

## 河道坡岸生态修复的土壤生物工程应用\*

张政<sup>1</sup>, 付融冰<sup>2\*\*</sup>

(1: 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

(2: 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要:** 土壤生物工程是一项利用存活植物构筑边坡, 以实现河道坡岸稳定和生态修复等生态功能的集成工程技术. 本文给出了我国第一个大规模采用土壤生物工程修复河道坡岸的工程实例, 工程选取本土植被, 采用活枝扦插、活枝柴笼和灌丛垫三种主要的土壤生物工程技术构筑河道边坡. 考察了工程实施前后河道坡岸植物新生根生物量、植物多样性、土壤剪切力、土壤紧实度和土壤湿度等生态参数, 结果表明, 工程实施 10 个月后, 与裸露坡岸相比, 施加土壤生物工程技术的河道坡岸稳定性大大提高, 土壤抗侵蚀能力增强, 物种增加, 生物栖息环境和人居环境得到改善. 该工程及研究为上海市浦东新区河道整治和坡岸生态修复提供了示范, 也为我国各类边坡的侵蚀控制和生态修复提供了新的工程技术和方法.

**关键词:** 上海市机场镇; 土壤生物工程; 河道坡岸; 生态修复

## Ecological restoration of riverbanks using soil bioengineering

ZHANG Zheng<sup>1</sup> & FU Rongbing<sup>2</sup>

(1: *School of Environmental Science and Engineering, State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China*)

(2: *Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, P. R. China*)

**Abstract:** Soil bioengineering is the use of living plant materials to construct structures that perform some engineering and ecological functions and can provide an effective means for slope stabilization and site restoration of riverbanks. The demonstration project was introduced that first applied large scale soil bioengineering to riverbank restoration at the Airport Town, Shanghai. The soil bioengineering techniques such as live staking, live fascines, brush layer with native pioneer species were integrated for riverbank preservation in the project. Ecological parameters including root characteristics and their biomass, species diversity, habitat, shear stress, soil tightness and soil moisture were measured for site characterization and evaluation of a demonstration project. Compared to the control site, the riverbank erosion was reduced significantly, along with an increase in species diversity and habitat, and improvement in aesthetics and inhabited environment after a ten-month project implementation period. The bioengineering techniques and experience from the restoration project at the Airport Town of Shanghai could have been applied to Chinese practices of a variety of slopes erosion control and ecological restoration of riverbanks.

**Keywords:** Airport Town of Shanghai; soil bioengineering; riverbanks; ecological restoration

土壤生物工程是一项建立在可靠的土壤工程基础上的生物工程, 它利用有生命力的植物根、茎(枝)或整体作为结构的主体元素构筑坡岸, 在植物群落建群和生长的过程中实现加固和稳定坡岸, 控制水土流失, 改善栖息地生境和实现坡岸生态修复等功能的集成工程技术<sup>[1-5]</sup>. 利用植物稳定边坡, 可以追溯到古代的中国和欧洲. 上世纪 30 年代, 土壤生物工程技术在欧洲得到大规模发展, 同时, 在美国加利福尼亚的自然

\* 国家高技术研究发展 863 计划专项(2003AA601020), 上海市科委重大科技攻关项目(05DZ12009) 联合资助. 2006-09-12 收稿; 2007-04-12 收修改稿. 张政, 男, 1966 年生, 博士研究生; zhangzheng1966@yahoo.com.cn.

\*\* 联系人; E-mail: rongermmfu@163.com.

森林公园综合运用了活枝扦插、柴笼和植物移植等方法修复退化边坡<sup>[6]</sup>。到七八十年代,美国实施了2项重大的土壤生物工程,分别是在塔霍湖实施的土壤生物工程<sup>[7]</sup>和在Redwood国家公园实施的重植工程<sup>[8]</sup>,该工程为美国西部运用此技术提供了重要的技术资料。1980年,Schiechtl出版了《土地利用及保护的生物工程》一书<sup>[1]</sup>,总结了欧洲许多重要的土壤生物工程师们的研究和实践工作。1996年和1997年,他先后出版了《边坡保护和侵蚀控制的地面生物工程技术》<sup>[2]</sup>和《河岸及海岸的水生物工程技术》<sup>[9]</sup>。这几本书成为土壤生物工程技术的最基本、最有影响的著作,为该技术的发展奠定了理论基础。实际上,1980年之后美国的关于该技术的几乎所有的著述如Brosius<sup>[10]</sup>、Greenway<sup>[11]</sup>、Turrin-Smith<sup>[12]</sup>、Gray和Sotir<sup>[3,4]</sup>以及Riley<sup>[13]</sup>、Lewis<sup>[14]</sup>等人的著作都直接或部分地建立在Schiechtl著作的基础上。在该技术的发展上,Gray和Leisert合著的《护坡与侵蚀控制的生物技术》<sup>[3]</sup>、Gray和Sotir的《边坡稳定的生物技术与土壤生物工程》<sup>[4]</sup>以及Coppin和Richards的《市政工程的植被应用》<sup>[15]</sup>等著作起了极大的推动作用。近20年来,该技术在欧美得到广泛应用。在我国,据史料记载,早在公元前28世纪,在渠道修整工程中就使用了柳枝、竹子等编织成的篮子装上石块来稳固河岸和渠道。但是,国内开展对土壤生物工程技术的研究起步较晚,20世纪90年代以前一般多采用撒草种、穴播、沟播、铺草皮、空心砖植草法、片石骨架植草。近年来,有人开始研究生态型护岸技术,提出了利用植物以及植物与工程措施相结合的护岸技术等,并得到了一定的应用<sup>[16,17]</sup>。

现代土壤生物工程要求运用生态学的原理,对实际的植物和土壤系统做出周密的考察和设计,利用植物对土壤结构的强化,对表层土壤颗粒运动的限制,以及对边坡生态系统的改善等作用,实现稳定边坡和控制水土流失,确保边坡植被水平和垂直结构合理,生态系统演替有序和景观优美。土壤生物工程具有生态、经济和美学优势,在实际应用中常常与其他传统工程技术相结合<sup>[18]</sup>,其生态修复效果和作用越来越受到重视。2004年,上海浦东新区机场镇实施了约16 km河道的生态坡岸示范工程建设。在此次工程中,使用了土壤生物工程技术,是我国第一次大规模地使用土壤生物工程技术构筑河道生态坡岸的工程实践。本文对土壤生物工程技术 and 工程方法做了研究,为上海浦东新区河道整治和坡岸生态修复提供示范,也为我国各类边坡(山地斜坡,江河湖库堤岸,海岸坡岸等)的侵蚀控制和生态修复提供了新的工程技术和方法。

## 1 河道生态修复工程实施范围

上海市浦东新区机场镇生态河道建设工程北起畅塘港,南到机场围场河,东临随塘河,西至东横港,整个区域面积为7 km<sup>2</sup>,水域面积61.81 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,河道约长30 km。生态坡岸示范工程长约16 km,其中采用土壤生物工程的坡岸长约1 km,主要为河岸交汇处和景观节点的坡岸。

## 2 土壤生物工程技术实施

### 2.1 土壤生物工程的植物

土壤生物工程中使用的植物一般采用可以扦插移栽并能迅速生长根系的乔灌木枝条,最常用的木本灌木和乔木是:柳(*Salix* spp.)、杨类(*Populus* spp.)、山茱萸类(*Cornus* spp.)或其他当地物种。除了生根要求之外,用于河道坡岸的植物,特别是在水位线附近的植物还必须有良好的耐水性能。本项工程采用的是灌木杞柳(*Salix suchowensis*)和乔木垂柳(*Salix babylonica*)的扦插枝。

### 2.2 植物栽种的基本形式和技术

在机场镇生态坡岸项目中使用土壤生物工程技术植物种植形式主要有三种:活枝扦插,柴笼和灌丛垫。使用垂柳活枝扦插2437 m<sup>2</sup>;杞柳柴笼604 m;灌丛垫315 m<sup>2</sup>。

2.2.1 活枝扦插(Live Stakes) 利用可以生根的植物活枝,直接扦插或按压进入坡岸土壤。如图1 a,将0.5 m长杞柳活枝插到河岸土壤中,2/5的芽孢留在地面以上。活枝生根后,将坡岸土壤颗粒联固在一起,并通过蒸发吸收多余的土壤水分<sup>[19]</sup>。活枝选择的一般要求是本土植物,能承受预期洪水,提供全年防护,在不同的土壤条件下易于成活,其根、茎、枝具有抵抗侵蚀水流的能力<sup>[20,21]</sup>。扦插的生态效果主要为强化土壤表面侵蚀控制能力,与周边植被一起改善植物自然生存环境,创建坡岸两侧的生物栖息地。该方法扦插速度快,工作量小,成本低,并可与其他土壤生物工程技术(例如柴笼方法)联合使用,适用于生态问题比较简单,水力学问题不大的河段。图2给出了畅塘港-沙脚河交界处坡岸的活枝扦插10 d和110 d后的生长实况。

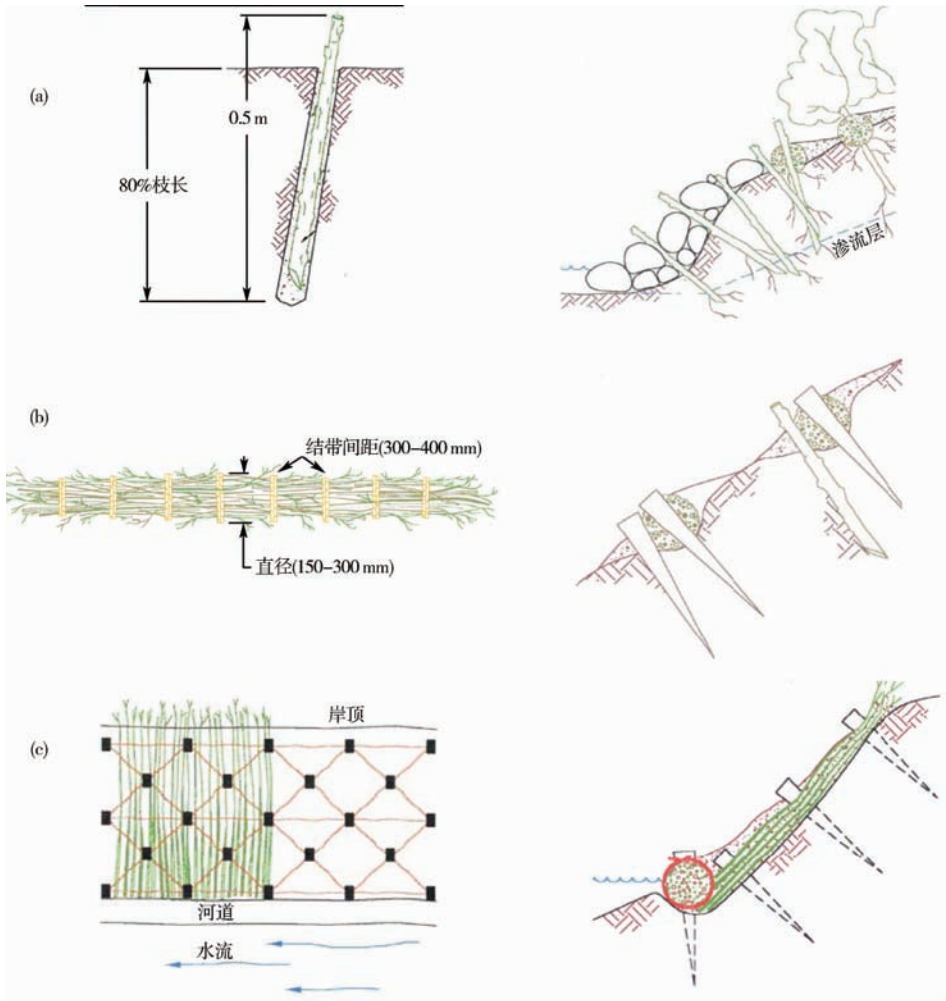


图 1 土壤生物工程的基本形式和不同种植方法 (a. 活枝扦插; b. 柴笼; c. 灌丛垫)

Fig. 1 Basic techniques of soil bioengineering and the configurations of different planting methods:

(a) live staking, (b) live fascines and (c) brush layering

2.2.2 捆栽 (柴笼) (Live Fascines) 把垂柳活枝捆成直径为 150 - 300 cm、长为 1.0 - 1.5 m 的圆柱状的活枝捆扎束,按水平方向浅埋入坡岸,其间可扦插单体活枝,以固定活枝捆扎(图 1b)。柴笼可有效保护水位线附近(水位变动区)的坡岸,与扦插联合使用时效果最佳<sup>[22]</sup>。其结构可截留土壤颗粒和稳定坡岸表面,形成有利植物生长的小生境,从而改善自然植被的定居。该技术可施工简单,造型容易,应用在坡岸常水位以上的地方,沿岸坡等高线布置形成阶梯,也可设置在河道交汇处的坡岸,以便于排水。柴笼生长成型后具有很好的景观效果,图 3 给出了八一河人工湖泊浮叶岛的活枝柴笼捆栽施工和种植后 160 d 后的生长实况。

2.2.3 层栽 (灌丛垫) (brush layering) 将长为 1.0 - 1.5 m 的垂柳枝条按交叉或重叠的方式水平种植在土层间,每米约 20 - 25 枝,枝条顶部向外,根部垂直埋入坡岸。植物枝条的结构是交互成层或者成排形状,枝条组成篱笆状,既可按水平或垂直方向布置,也可按不同的角度插栽(图 1c)。枝层间的土层可以使用土工织物包起,以防在枝条生长初期垮塌、淋蚀和冲蚀。该技术适用于坡岸较陡<sup>[23]</sup>,表面径流较大的河道,通常与其他结构,例如土工布 (Vegetated Geogrids)、石笼 (Vegetated Gabions)、堆石 (rock Riprap) 等联合使用,其施工技术较为复杂。生长成型后,具有较强的抗侵蚀、抗冲蚀和稳固岸坡的功能,景观效果较好。图 4 给出



图2 镇畅塘港 - 沙脚河交界处坡岸的活枝扦插

左图:扦插后 10 d(2004 年 3 月 19 日);右图:扦插后 110 d(2004 年 6 月 30 日)

Fig.2 The live staking on the riverbanks at the cross of Changtang River and Shajiao River. The left picture:10 days after planting (March 2004) and the right picture: 110 days after planting (July 2004)



图3 八一河人工湖泊浮叶岛的活枝柴笼捆插

左图:柴笼施工时情形(2004 年 3 月 19 日);右图:种植后 162 d(2004 年 8 月 30 日)

Fig.3 The live fascines on the riverbanks of Bayi River. The left picture: the day of planting (March 2004) and the right picture: 162 days after planting (August 2004)



图4 沥青河的活枝层栽(灌丛垫)

左图:刚种植完成时的情况(2004 年 4 月 5 日);右图:种植后 85 d(2004 年 6 月 30 日)

Fig.4 The brush mattress on the riverbanks of Liqing River. The left picture: few days after planting (April 2004) and the right picture: 85 days after planting (June 2004)

了沂青河的活枝层栽(灌丛垫)种植初期和85 d后的生长实况.

### 2.3 指标检测方法

坡岸植物新生根的测量采用现场挖掘法,在实验场地现场挖掘植物根系,测量植物单株新生根系的生物量和生长深度. 岸坡植被观测采用固定样地方法,即在不同类型的坡岸设置宽度为1 m的固定样带,调查记录固定样方内植物种类、生活型、数量、覆盖度、高度、物候相. 土壤湿度、土壤剪切力和紧实度采用英国的Delta-T仪器公司的WET土壤三参数速测仪、以色列Spectrum Technologies公司的简易土壤紧实度仪和荷兰的Eijkelpamp Agrisearch Equipment公司的现场叶片钻孔仪测量.

底栖动物(主要是对坡岸潮间带的破坏最大广盐性物种无齿相手蟹(*Sesarma denaani*))在2004年5月18日、6月10日和9月3日进行,对该物种在河道不同类型坡岸上的洞穴进行了观测和计数.

## 3 土壤生物工程对河道坡岸的生态修复效果

### 3.1 植物对河道坡岸的稳定作用

3.1.1 植物生物量及生长状况 现场种植结果表明,杞柳和垂柳枝的生根能力都很强. 垂柳枝生长至三个月后,最粗的根径可达5-7 mm,最长的根超过50 cm. 杞柳条生长三个月后,每一节都生长出3-5条不定根,根径粗细由1-2 mm到3-5 mm不等,根须发达.

表1和表2给出了植物生长至十个月时各种不同种植方法杞柳和垂柳根系新生根系生物量和生长深度的情况. 结果表明,经过十个月的生长,单枝杞柳和垂柳地下根系的深度可达约1 m;而采用活枝扦插+柴笼和灌丛垫方法,单位体积所获得的植物新生根系生物量最大,分别为0.20 kg/m<sup>3</sup>和0.34 kg/m<sup>3</sup>.

表1 现场单株植物生长10个月后的新生根的长度和生物量

Tab.1 The length and biomass of new roots from the cuttings 10 months after the implementation of the project

| 植物类型(单株) | 单株长度(m)     | 新生根长度(cm)     | 新生根生物量(g)(干重) |
|----------|-------------|---------------|---------------|
| 杞柳       | 0.42 ± 0.03 | 93.33 ± 10.41 | 10.13 ± 3.29  |
| 垂柳       | 1.22 ± 0.08 | 93.67 ± 7.09  | 13.67 ± 7.06  |

表2 植物生长10个月后不同种植方法下新生根的生物量

Tab.2 The planting density of cutting and root biomass by the various techniques of soil bioengineering 10 months after the project implementation

| 典型种植技术    | 植物类型    | 单株数量<br>(株数/m <sup>2</sup> ) | 新生生物量<br>(干重)(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| 活枝扦插      | 垂柳      | 12                           | 0.12                              |
| 柴笼        | 杞柳      | 12(活枝)                       | 0.16                              |
| 灌丛垫       | 杞柳      | 25                           | 0.34                              |
| 活枝扦插 + 柴笼 | 垂柳 + 杞柳 | 4 + 12                       | 0.20                              |

3.1.2 对河道坡岸的加固作用 植物对河道边坡稳定性至关重要. 植物覆盖阻止地表侵蚀,根系稳固河岸土壤,提高土壤剪切力. 有研究证明,土壤剪切力与根系生物量呈正相关关系<sup>[24]</sup>. 对现场裸露河道坡岸和土壤生物工程构筑的坡岸剪切力和紧实度等参数进行了测量,图5给出了不同类型河道坡岸土壤剪切力和紧实度的测量结果. 从图5a,b,c可见,在大多数情况下,施加了不同土壤生物工程技术的河道坡岸土壤剪切力和土壤紧实度大于裸露边坡土壤剪切力和土壤紧实度,特别是在河岸常水位线附近,土壤剪切力和土壤紧实度比裸露对照坡岸提高了2.25-3.23倍和2.6-5.5倍. 从图5d可见,土壤湿度一般是常水位处土壤湿地高于坡腰处土壤,坡腰处土壤高于坡顶处土壤. 施加了土壤生物工程技术的河道坡岸土壤湿度大于裸露边坡土壤湿度,以活枝扦插+柴笼构筑的坡岸湿度提高得较为明显,灌丛垫坡岸与裸露坡岸相差不大.

新区机场镇河道自 2004 年初疏竣和整治后,没有采取任何坡岸保护措施,坡岸长期裸露,植被得不到恢复,造成严重的坡岸侵蚀。以上结果表明,土壤生物工程大大改善了整个土质河道坡岸的稳定程度;尤其是对水位线附近的坡岸,其改善程度足以抵抗潮汐河道水位水流变化和暴雨及其径流的冲击。

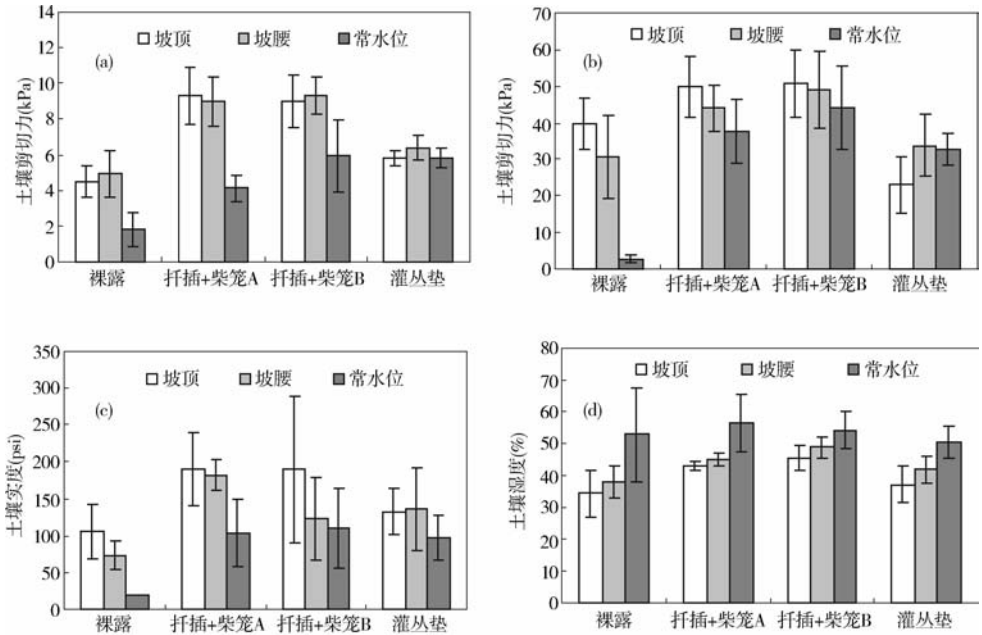


图 5 不同类型河道边坡的土壤剪切力(a: 地表;b: 地表以下 15 cm)、紧实度(c)和土壤湿度(d)与施工前的比较(裸露:裸露坡岸,为河道疏竣和整治后,没有采取任何坡岸保护措施的坡岸,位置为八一河与插网河交界处;扦插+柴笼 A:采用活枝扦插+柴笼构筑的坡岸,位置为八一河与插网河交界处;扦插+柴笼 B:采用活枝扦插+柴笼构筑的坡岸,位置为畅塘港;灌丛:采用土壤生物工程灌丛垫构筑的坡岸,位置为沥青河.  $n = 5$ , 平均值  $\pm$  标准偏差)

Fig. 5 Differences in shear strength (a: at the soil surface; b: at 15 cm below the soil surface), tightness (c) and soil moisture content (d) for the soils at the splash, bank zones and the top of the river bank at the control site and post-construction sites on the same day. (Bare riverbank and Live stakes + live fascines A at the junction of Bayi and Chawang Rivers. Live stakes + live fascines B at Changtang River. Brush layering at Liqing River.  $n = 5$ , mean  $\pm$  standard deviation)

### 3.2 对河道坡岸栖息地的改善

3.2.1 坡岸植物多样性大大增加 对上海市浦东新区机场镇的生态河道坡岸作的生态学调查表明,种植的生态坡岸灌木柳生长良好,同时为其他物种营造了适宜的生态生境,增加了生物多样性。图 6 给出了不同类型坡岸植物物种数量随季节的变化。调查结果表明,与裸露坡岸相比,采用土壤生物工程方法坡岸的物种数量明显增加,加拿大一枝黄花受到有效抑制。随着垂、杞柳群落的逐渐形成,低矮草本植物的生境得到改善,物种数量逐渐增加,由种植初期的 2-3 种增加到秋季的 14-18 种。整个坡岸乔灌木高低有序、纵横交错,沿河岸形成了植物群落交错带,坡岸的植物生态系统得到了恢复。

3.2.2 底栖动物对坡岸的破坏显著减少 浦东新区机场镇属于典型的潮汐河网,由于底栖动物如无齿相手蟹(*Sesarma denaani*)等喜好在坡岸潮间带打洞筑巢,土壤坡岸在潮汐的影响下很容易侵蚀剥落。石砌驳岸虽防止了坡岸的侵蚀剥落,但也彻底破坏了底栖动物的栖息地。采用柴笼技术的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。调查表明,在没有柴笼保护的坡岸,坡岸潮间带的无齿相手蟹洞穴每米有 10-15 个,而在种植柴笼的坡岸,坡岸潮间带的洞穴每米仅为 2-3 个。

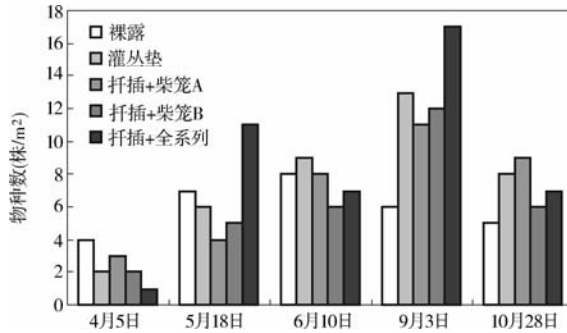


图 6 不同类型坡岸植物物种数量随季节的变化

Fig. 6 The species of the plants in riverbanks by the various techniques of soil bioengineering along with seasons

3.2.3 生物栖息及人居环境明显改善 工程实施对人类与其他生物的生活环境和质量有明显的改善作用。施加土壤生物工程技术的坡岸,经过十个月的时间,先锋物种杞柳和垂柳群落、结缕草 (*Zoysia japonica*) 群落、挺水植物茭草和菖蒲 (*Acorus calamus*) 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。用土壤生物工程建设 的各类边坡,随着植物群落的长成和成熟,植物根系的生长和扩张,边坡生态系统更加完善和稳定;对控制水土流失和土壤侵蚀,对整个陆生、水生河道生态系统和对河流水质的改善的作用越来越明显和突出。

## 4 结论

对上海市浦东新区机场镇河道生态坡岸示范工程的研究表明,土壤生物工程是一项极具生命力的坡岸生态修复技术方法,主要体现在:(1)工程方法简单,成本低廉,可以在较短的时间内,有效恢复坡岸生境,实现坡岸的生态重建和修复,本示范工程仅用三个月的时间,就恢复了坡岸的植被群落;(2)施加了土壤生物工程技术的河道坡岸,其土壤剪切力、紧实度比裸露河岸都有了较大的提高,有效改善了整个土质河道坡岸的稳定程度,尤其是对水位线附近的坡岸,大大地提高了其抗侵蚀能力;(3)改善和保护了坡岸和水生生态系统的完整性,极大地提高了河道坡岸地生物量,增加了生物多样性,改善了生物栖息地环境,既保留了底栖动物的栖息地,又减少了它们对坡岸的破坏;(4)提高了人居环境质量,水质和景观也得到了一定程度地改善。

该项示范工程及研究为上海市浦东新区河道整治和坡岸生态修复提供一个示范,也为我国各类边坡 (山地斜坡,江河湖库堤岸,海岸坡岸等) 的侵蚀控制和生态修复提供了新的工程技术和方法。土壤生物工程方法可以在我国发达地区使用,更应当在贫困地区得到推广。

## 5 参考文献

- [1] Schiechl H M. Bioengineering for land reclamation and conservation. Edmonton, Canada: University of Alberta Press, 1980:1 - 10.
- [2] Schiechl H M, Stem R. Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control. London: Blackwell Science Inc, 1996:5.
- [3] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control. Scarborough: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1982.
- [4] Grey D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. New York: A Wiley Interscience Publication, 1996.
- [5] Howell J. Application of bio-engineering in slope stabilisation: experience from Nepal. Landslide Hazard

- Mitigation in the Hindu Kush-Himalayas. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2001:147 - 161.
- [6] Kraebel C. Erosion control on mountain roads. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1936.
- [7] Leiser A T, Nussbaum J J, Kay B *et al.* Revegetation of disturbed soils in the Tahoe Basin. California: California Department of Transportation, Sacramento, 1974.
- [8] Weaver W E, Madej M A. Erosion control techniques used in redwood national park. Erosion and sediment transport in Pacific Rim Steeplands. Washington D. C. : International Association of Hydrological Sciences Publication, 1981:640 - 654.
- [9] Schiechl H M, Stern R. Water bioengineering techniques for watercourse bank shoreline protection. London: Blackwell Science Inc,1997.
- [10] Brosius M. The restoration of an urban stream using geomorphic relationships and biotechnical streambank stabilization. Athens, GA: The University of Maryland, 1985.
- [11] Greenway D R. Vegetation and slope stability. In: Anderson M G, Richards K S ed. Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology. New York: Wiley, 1987: 187 - 230.
- [12] Turrini-Smith L A. Restoration of a suburban stream using fluvial geomorphic principles and biotechnical engineering: a case study of San Jose Creek, Santa Barbara County, California. Nashville, Tennessee: Vanderbilt University, 1994.
- [13] Riley A L. Restoring streams in cities. Washington DC: Island Press, 1998.
- [14] Lewis L. Soil Bioengineering an alternative for roadside management: a practical guide. San Dimas, CA: USDA Forest Service San Dimas Technology and Development Center, 2000.
- [15] Coppin N J, Richards I G. Use of vegetation in civil engineering. London: Butterworths,1990.
- [16] 许晓鸿,王跃邦,刘明义等. 江河堤防植物护坡技术研究成果推广应用. 中国水土保持,2002, (1):17 - 18.
- [17] 高甲荣. 近自然治理——以景观生态学为基础的荒溪治理工程. 北京林业大学学报, 1999,12(1):80 - 85.
- [18] Henderson J E. Environmental designs for streambank protection projects. *Water Resources Bull*, 1986, **22** (4), 549 - 558.
- [19] David H B. Live pole slope stabilization in the tropics. Ground and water bioengineering for erosion control and slope stabilization. Enfield, NH, USA: Science Publisher, 2004: 303 - 308.
- [20] Schultze R F, Wilcox G I. Emergency measures for streambank stabilization; an evaluation. In: First N A-mer. Riparian ecosystems and their management: reconciling conflicting uses. Riparian Conf. USDA, Forest Svc., Fort Collins, Colorado. Gen. Tech. Rep. RM-120,1985: 59 - 61.
- [21] Henderson J E. Environmental designs for streambank protection projects. *Water Resources Bulletin*, 1986, **22**(4):549 - 558.
- [22] Iowa Department of Natural Resources. How to control streambank erosion,2006.
- [23] Schiechl H M, Stern R. Water bioengineering techniques for watercourse bank and shoreline protection. London: Blackwell Science Inc,1997:69.
- [24] Ziemer R R. Roots and shallow stability of forested slopes. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1981, **132**: 343 - 361.