



河道生态护坡技术研究现状^{*}

李凌云^{1,2}, 野博超³, 刘心愿^{1,2}

- (1. 长江科学院河流研究所, 湖北 武汉 430010;
 2. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010;
 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过分析国内外一些典型生态护坡技术形式和易出现的问题, 可以看出国内外的生态护坡技术存在明显差异。国外的生态护坡技术多使用草、灌、木、石等自然原生材料, 着重于岸坡生态系统的恢复, 但植物护坡的抗冲刷能力有限, 防护强度不高; 而国内的生态护坡技术在材料使用上会统筹考虑防护强度和生态性能, 不限于自然原生材料, 在受冲刷较严重的岸段, 较多使用半硬质护坡, 但应进一步探索硬质材料与土壤、生物更好的结合方式。随着各种技术的不断发展, 河道生态护坡应在提高岸坡强度的同时更有利于河流生态系统的保护和修复。

关键词: 生态河道治理; 生态护坡技术; 水土生物工程; 生态修复

中图分类号: U 61; TV 861

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0205-06

Research status of river ecological slope protection technology

LI Ling-yun^{1,2}, YE Bo-chao³, LIU Xin-yuan^{1,2}

(1. River Research Institute of Yangtze Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River,

Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China;

3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By analyzing some typical forms of ecological slope protection technology at home and abroad and the problems that easily occur, we know that there are obvious differences between domestic and foreign ecological slope protection technology. Most of the foreign ecological slope protection technologies use natural raw materials such as grass, shrubs, wood, and stones, focusing on the restoration of the opposite bank slope ecosystem, but the erosion resistance of plant slope protection is limited, and the protection strength is not high; while the domestic ecological slope protection technology will take both the protection intensity and ecological performance into account in choosing materials, which is not limited to natural raw materials. In the more severely scoured bank sections, more semi-hard slope protections are used, but it is necessary to further explore a better combination of hard materials, soil and organisms. With the continuous development of various technologies, ecological techniques for riverbank protection should be more conducive to the protection and restoration of the river ecosystem while increasing the strength of the bank slope.

Keywords: ecological river treatment; ecological slope protection technology; soil and water bioengineering; ecological restoration

收稿日期: 2021-11-23

*基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2020BCA083); 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0408904); 中国长江三峡集团有限公司科研资助项目(0704167)

作者简介: 李凌云(1982—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事河流动力学及河流生态方面的研究。

我国早期河道护坡着重于提高岸坡的结构强度，却在很大程度上阻断了水体和土壤的物质交换，对江河生物多样性的保护和发展是不利的，所以生态护坡应运而生。国外对生态护坡的研究可见于 1965 年德国对莱茵河的生态治理工程，我国可见于 1990 年赤峰市林业科学研究所对老哈河生态经济型护岸林的研究。我国虽然起步比较晚，但发展迅速。国外的生态护坡技术多利用自然原生材料，侧重于对河岸的生态恢复，国内会统筹考虑岸坡的防护强度和生态效益，不限于使用自然原生材料。

1 国外河道生态护坡技术

欧洲一些国家将“生态护坡”称为“水土生物工程”(soil and water bioengineering)，且不限于应用在河道护坡。美国、巴西等将河道生态护坡称为“土壤生物工程”(soil bioengineering)^[1-2]。将国外的生态护坡技术可以大致分为 2 类：1) 单一技术形式的植生式护坡；2) 几种技术组合结构形式的护坡。

1.1 单一技术形式的植生式护坡

1.1.1 柳木桩(willow posts)

打柳木桩技术在美国密西西比中东部的哈兰德溪(Harland Creek)护坡工程中得以应用^[3]。柳木桩排布较为密集，且可以生根发芽，桩身和后期长成的根茎、枝叶都可以减缓水流对岸坡的侵蚀，相当于增加了岸坡的糙率。但这项技术实施后，柳木的成活率并不高，主要原因是虫害以及靠近水域的柳木桩根部浸水而缺氧死亡，且工程初期易受到洪水影响，因此适用于水流平缓的小型河流。

1.1.2 柳桩栅栏(willow spiling wall)

柳桩栅栏护坡技术应用于英国东安格利亚斯图尔河(River Stour, East Anglia)护坡^[4]。它是利用粗柳枝作为桩身，将其三分之二插入土壤中，留出三分之一用长柳枝编在一起，形成一道围栏，以防止岸坡侵蚀和崩塌(图 1)。该技术用材自然环保，活柳桩可以生根发芽，对土壤有固定作用，

但结构强度低，适用于水流平缓的小型河流岸坡或湖岸。



图 1 柳桩栅栏

1.1.3 植物淤地坝(vegetative check dams)

植物淤地坝用于尼泊尔西瓦利克斯山(Sivaliks, Nepal)的某处山麓^[5]，以减少洪水对山麓的冲刷。该植物淤地坝其实是一种宽 0.6 m、高 0.8 m、长 4.0~16.0 m 的用竹竿搭建的竹笼，竹笼内部用沙袋或石头填充。在淤地坝前后两侧及后方陆地上种植植物(图 2)。该技术适用于山间小型河道，其稳固山麓、促淤和植生效果良好。



图 2 植物淤地坝

1.1.4 液压喷播(hydroseeding)

液压喷播是一种使用液压设备将混有植物种子的泥浆散喷在岸坡上的快速种植方式^[6]。该种植方式提高了播种效率，能够使种子均匀散布在岸坡上，但依然需要人工操作，因此坡度不宜过陡，且刚喷播的含有种子的泥浆容易被大雨冲蚀。

1.1.5 国外其他常见技术

国外还有一些用于河岸防侵蚀的土壤生物工程方法^[7]，其中单一技术形式的植生护坡有活性柴捆(live fascine)、活性木桩、柴席(brush mattress)、灌丛垫(brush layering)、椰壳纤维卷(coconut fiber rolls)、防侵蚀垫(erosion control blanket)等。

这些护坡技术虽然结构较为简单，但却是护

坡技术的基本形式, 可以将这些技术结合实际工程情况组合使用。

1.2 几种技术组合结构形式的护坡

美国卡森河(carson river)的生态恢复工程采用加有杜松枝的活性柳条柴捆(live willow clumps with a juniper tree)、柴席、防侵蚀椰纤维织物(erosion control fabric)、灌丛垫以及抛石等护坡技术^[8]。在防侵蚀椰纤维下埋有草籽, 同时起到保护土壤不被冲蚀的作用。抛石会有一部分伸向河心, 形成“倒刺”, 类似于上挑丁坝的作用, 使水流方向偏向河心, 减弱水流对临水岸坡的冲刷(图3)。该技术适用于中、小型河流岸坡防侵蚀保护和生态修复。



图3 卡森河生态恢复工程

Maxwald等^[9]介绍一些应用在中南美洲的生态护坡技术, 如: 应用在厄瓜多尔拉斯马拉维拉斯(Las Maravillas, Ecuador)河流护坡的活木垛墙(live crib wall)(图4), 活木垛墙是由原木相互纵横交错搭建的框架结构, 可在其结构的空隙中填以土壤、岩石并植种。但采用该技术的护坡在洪水过后部分结构被冲毁, 可见其结构强度有待提高。应用在危地马拉康塞普西翁(La Nueva Concepción, Guatemala)某条河流护坡的单层木枝栅(single walled crib wall), 是将长木枝成排固定在河坡上形成木栅, 并在其上覆盖一层土壤, 插上活性枝条并固定, 用于岸坡植被恢复(图5)。巴西南圣克鲁斯(Santa Cruz do Sul, Brazil)的某条河流护岸工程中组合使用植生抛石(vegetated riprap)、活性栅栏(living palisades)、锚固活枝和枯枝(anchoring of living and dead tree spurs)等护坡技术。其中植生抛石是将活灌木或活树枝从石头缝隙插进土壤,

后期植物生长的根茎和枝叶会对抛石和土壤起到一定的加固作用。

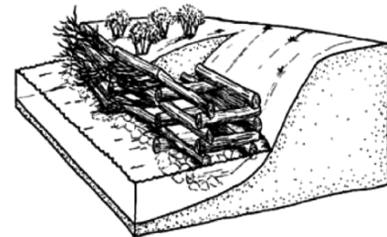


图4 活木垛墙



图5 单层木枝栅

2 国内河道生态护坡技术

根据国内生态护坡技术对自然土壤的封闭程度可大致分为以下2类: 1)植物护坡; 2)半封闭式硬质护坡。植物护坡主要是利用草木的根、茎、叶或结合一些加筋材料对岸坡土体进行加固和侵蚀防护, 对土壤封闭程度最低; 半封闭式硬质护坡是将硬质材料作为发挥护坡结构强度的主体部分, 留有的空隙可以使水体和土壤进行物质交换, 同时为动植物提供生存空间。

2.1 植物护坡

2.1.1 单纯种植植物式护坡

单纯的植物护坡如人工种植草木护坡、平铺草皮护坡、液压喷播植草护坡、客土喷播植草护坡、TBS植草护坡等。这些技术适用于水流平缓的城市小型河流的河岸生态修复和其他市政绿化。植物生长后也能对岸坡起到防侵蚀保护作用, 减少水土流失。

人工种植草木护坡和平铺草皮护坡具有施工简单、造价低等优点。但人工播种和铺设草皮都有可能被较大的水流冲走, 需要定期养护, 而且在较陡的岸坡上施工困难。

液压或客土喷播植草护坡是对人工种植和铺

草皮护坡技术的改进，它能用于较陡或土壤较少的岸坡，造价也低，但喷播初期强度低。TBS 植草护坡技术的造价要比前两种稍高，但由于基质厚度较大，提高了初期喷播强度和坡面稳定性。

2.1.2 加筋式植物护坡

加筋式植物护坡技术包括新出现的植入型生态固滩技术^[10] 和十字块压护大网格土工格栅技术^[11] 等。

植入型生态固滩技术应用于长江中游倒口窖心滩，效果良好。该技术是利用肥化处理的优质黏土对滩面的表层土壤进行改良，再将草绳方格网固定在滩面上，草种植在网格内，起到降低侵蚀和促淤作用。类似的还有在土壤中铺设土工网、土工格栅等。该技术适用于诸如倒口窖心滩地形复杂、面积大而又多沙质土、营养匮乏的滩地，主要用于生态修复。

十字块压护大网格土工格栅应用于长江下游的狼山沙高滩防护，该高滩长有芦苇等挺水植物。该技术是先铺设一层耐久性较好的大网格土工格栅，然后将混凝土预制十字块绑定于土工格栅上，每 4 个十字块可拼接成一个 38 cm² 的框格，起到压护作用。工程实施后植物生长茂盛，防护效果良好。该技术对土壤封闭程度较低，对滩地原本植物的生长影响较小，适用于对生态良好滩地的抗侵蚀保护。

2.2 半封闭式硬质护坡

2.2.1 自嵌砖式护坡

自嵌砖式护坡包括自嵌式挡土墙植生护坡^[12]、联锁块式护坡^[13] 等。该类技术的共同点是护坡块体可自嵌，且砖体会留有较大的植物生长空间。

应用在北京密云县山区小型河道的自嵌式挡土墙是一种自嵌锚固式的重力结构。自嵌砖彼此嵌套码放，并由锚固棒连接，锚固棒又连接着埋在墙后土体中的土工格栅。土工格栅依靠与土体之间的摩擦力和土的抗剪力对墙体起到牵拉作用。但该技术可能会出现局部土工格栅断裂导致挡土墙倒塌的现象。李永华等^[14] 认为该现象是由于挡墙与墙后反滤层弹性模量不同，产生不均匀沉降，

导致土工格栅在二者交界处出现复合受力，极限抗拉强度降低而断裂。该技术适用于防洪要求不高且岸坡较陡的小型山区河道或城市河道，且具有良好的植生效果和景观效益。

联锁块式护坡有二维和三维铺面。二维铺面是指联锁块只在平面 2 个方向上进行互嵌，且应用较多，例如应用于鳗鱼沙右槽右河漫滩的立体网格生态护坡^[15] 等；三维铺面除了在平面 2 个方向上进行互嵌，还在竖直方向上有凸起部分，底面的凸起可嵌入土壤中，上面的凸起可起到消能减浪作用。三维铺面会具有更好的抗滑稳定性，但如果结构设计太复杂，将不易制模，难以批量化生产。该技术适用于中、小型河道，具有一定的抗冲刷能力和稳定性，且景观和生态效益良好。

2.2.2 网笼式护坡

应用在长江中游段的生态卵石笼、网膜卵石排、钢丝网石垫为网笼式护坡^[16]。该种护坡技术的共同点是利用钢丝网或者聚乙烯纤维网将石块聚拢成一个整体，可防止堆石被水流冲散冲走。

生态卵石笼和网膜卵石排都用于水下护脚：生态卵石笼是将卵石装入经防腐处理的低碳钢丝编织的网箱内，码放在水下坡脚处；网膜卵石排是将卵石装入束状的聚乙烯纤维网袋中，成排放置于坡脚。钢丝网石垫是将卵石装入经防腐处理的低碳钢丝编织的网垫内平铺于坡面，用于水上护坡。这些网笼式护坡都具有抗冲刷性能强、透水性好、适应地基变形能力强、施工便捷等优点，而石头缝隙又可为一些小型水生生物提供栖息场所，可适用于水流速度较高的大型河道以及受冲刷严重的重点防护岸段。但目前经防腐处理的低碳钢丝石笼或石垫，造价相对较高。

2.2.3 加筋现浇生态混凝土式护坡

应用在长江中游段的生态混凝土现浇网格护坡、宽缝加筋生态混凝土护坡^[17] 等为加筋现浇生态混凝土式护坡。该种护坡技术的共同点是将加筋 C20 混凝土预制件与现浇生态混凝土相结合。

生态混凝土现浇网格护坡主体结构是将预制的加筋混凝土连杆纵横交错布置形成大网格，锚

定后再向网格内现浇生态混凝土; 宽缝加筋生态混凝土护坡是先将预制的加筋混凝土四方块彼此留有宽缝放置在坡面上, 并连接筋条, 再向宽缝内浇筑生态混凝土, 形成一个整体。该种护坡在生态性能方面依靠的是生态混凝土多孔和透水特性, 且植物的生长依然需要土壤, 因此在其表面或孔洞中要有土壤。优点在于利用强度较高的混凝土预制件弥补了生态混凝土在力学性能上的不足, 且具有良好的整体性、耐久性和抗冲性能, 同样适用于水流速度较高的大型河流护岸。现浇生态混凝土施工技术成熟, 成本低, 适合大规模建设。

2.2.4 生态模袋护坡

应用在江安河岸温江区段^[18] 和上海市城市河道^[19] 的生态袋植草护坡均为生态模袋护坡。该类护坡的共同点是利用袋装土和植物根茎提高岸坡的抗冲刷能力并对河岸进行生态修复。

生态袋植草护坡技术用途广泛, 在河道护岸中多码放于常水位以上岸坡或挡土墙之上, 码放时需用标准扣将水平和竖直的相邻生态袋锁定, 还可与混凝土框格梁组合使用。袋身常用高分子聚合物编织袋, 装填的植生材料可以为素土或改良后的客土, 可在袋上喷播或扦插种植。植物存活后, 根茎可扎进袋中的植生材料中。应根据植生袋所处水土条件选择植物, 靠近常水位处可选择挺水植物, 远离水面的岸坡上可选择根系发达的旱生植物。该种护坡的优点在于利用高分子聚合物编织袋为土体提供早期保护, 可为植物提供较为稳定的生长环境, 具有很好的生态恢复效果和景观效益, 但工程中袋身的用材质量难以把控, 有出现老化破损的情况。适用于水流速度不高的城市或山区中小型河流护岸。

2.2.5 人工鱼巢

人工鱼巢包括鱼巢砖^[20]、生态巢穴石^[21]等。该种护坡技术的共同点是考虑为鱼类提供繁衍和栖息的条件。

鱼巢砖是一种镂空自嵌式砖, 常作为一种挡土墙应用在城市或山区小型河流的护岸。鱼巢砖

中的镂空部分可填充土壤, 从而为水生植物提供生长条件, 进而为鱼类提供栖息的环境。

生态巢穴石用于水下护脚, 是一种四面带孔洞的无盖箱形大体积混凝土预制件, 可替代抛石使用, 内部巢室可为鱼类提供一个低流速的栖息环境^[22], 但巢穴石的结构强度和耐久性研究较少。适用于大、中型河流的水下护脚, 也可码放于枯水平台之上。相比于传统抛石具有更好的生态效益。

人工鱼巢都为混凝土预制件, 在设计其形状时应考虑制模难度, 以降低成本。

3 河道生态护坡技术现状评价

3.1 国外河道生态护坡

1)使用的材料多为自然原生型。这些自然原生材料大多可以降解或再生长, 并注重利用当地优势种和植物的根、茎、叶对岸坡进行保护和生态修复, 因此须注意当地的土壤气候条件。

2)在工程初期须及时养护。这些技术的关键是植物能够存活, 在植物生长初期较为脆弱, 表层的土壤、种子或扦插的植物可能无法抵御暴雨的侵蚀, 如果土壤、植株被冲走, 需要及时维护。

3)抗冲刷强度小, 耐久性较弱。植物护坡的抗冲刷强度不高, 一些木质材料在长期潮湿的环境下会腐烂, 从而降低工程的结构强度和耐久性。所以这些技术多用于流速不高的小型河流或溪流, 也包括一些路堤和山坡。

3.2 国内河道生态护坡

1)技术形式多样。国内的生态护坡技术涵盖护滩、水下护脚、水上护坡等多种应用形式, 且使用材料多样, 应用时应注意材料特性。

2)在工程初期即可对岸坡起到保护作用。这些技术由于结合了一定的硬质材料, 例如钢丝网石垫、自嵌砖、生态混凝土等, 在植物生长之前即可对岸坡起到一定程度的保护作用, 但一些技术会出现植生效果差的问题。

3)有预制件类的护坡技术, 设计时应注意制

模、脱模工艺难度。例如自嵌砖式护坡和人工鱼巢类护坡，碍于目前的制模和脱模技术，其结构形式不宜设计太复杂。

4 结论

1) 河道的受冲刷岸段需要硬化措施来保护和修复。由于植被的抗水流侵蚀能力有限，要想使岸坡有足够的结构强度和耐久性来抵抗水流侵蚀，在不采取丁坝、潜坝等更改水流方向、促淤减浪等工程措施的情况下，需要对岸坡进行硬化来提高其强度，但同时须提供动植物及微生物的生存条件。

2) 河道生态护坡要结合实际情况。硬化措施对岸坡起到的防护作用和留予动植物及微生物生存条件的生态作用是一种矛盾关系，要根据具体河段的防洪、航运、生态等方面的要求调节二者之间的关系，要结合具体河流的水流条件、岸坡的不同位置、河道治理的需求选择合适的护坡技术。

3) 硬质材料、土壤、生物更好的结合方式有待进一步研究。例如现浇生态混凝土类护坡其上铺设的一层土壤存在容易被冲刷、植物的根系扎不深等问题。另外，不同品种的沉水植物、挺水植物等根系的固土作用也需进一步研究。

4) 随着技术的不断进步，生态护坡应在兼顾结构强度的同时朝着对自然环境更亲近、更有利干河流生态系统保护和修复的方向发展。

参考文献：

- [1] HOLANDA F S R, ROCHA I P D, OLIVEIRA V S. Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2008, 12(6): 570-575.
- [2] SIMON K, STEINEMANN A. Soil bioengineering: Challenges for planning and engineering[J]. Journal of urban planning and development-Asce, 2000, 126(2): 89-102.
- [3] WATSON C C, ABT S R, DERRICK D. Willow posts bank stabilization[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(2): 293-300.
- [4] ANSTEAD L, BOAR R R, TOVEY N K. The effectiveness of a soil bioengineering solution for river bank stabilisation during flood and drought conditions: two case studies from East Anglia[J]. Area, 2012, 44(4): 479-488.
- [5] DHITAL Y P, TANG Q H. Soil bioengineering application for flood hazard minimization in the foothills of Siwaliks, Nepal[J]. Ecological engineering, 2015, 74: 458-462.
- [6] REY F, BIFULCO C, BISCHETTI G B, et al. Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration[J]. Science of the total environment, 2019, 648: 1210-1218.
- [7] HOLANDA F S R, ROCHA I P D. Streambank soil bioengineering approach to erosion control[C] // CARPI A. Progress in Molecular and Environmental Bioengineering: From Analysis and Modeling to Technology Applications. New York: IntechOpen, 2011: 564-566.
- [8] PIPER K L, HOAG J C, ALLEN H H, et al. Bioengineering as a Tool for Restoring Ecological Integrity to the Carson River[EB/OL]. (2014-06-04) [2021-8-8]. https://www.researchgate.net/publication/253864858_Bioengineering_as_a_Tool_for_Restoring_Ecological_Integrity_to_the_Carson_River.html.
- [9] MAXWALD M, CROCETTI C, FERRARI R, et al. Soil and water bioengineering applications in Central and South America: a transferability analysis[J]. Sustainability, 2020, 12(24): 1-31.
- [10] 李明. 河流心滩守护中的生态固滩方法研究: 以长江倒口窑心滩植入型生态固滩工程为例[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 78-83.
- [11] 曹民雄, 申霞, 应翰海. 长江南京以下深水航道生态型整治建筑物结构研究[J]. 水运工程, 2018(1): 1-11.
- [12] 卜自珍, 焦梦妮, 马学冬, 等. 自嵌式挡土墙在小型河道护岸工程中的应用[J]. 北京水务, 2014(1): 35-38.
- [13] 邵琪, 沈建霞, 钟华林, 等. 一种用于护岸的混凝土三维生态联锁块[J]. 水运工程, 2017(2): 89-93.
- [14] 李永华, 刘一涛, 叶美娇. 降雨入渗条件下自嵌式挡土墙倒塌机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 76-84.
- [15] 曹民雄, 汪路瑶, 申霞, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道工程的技术难点与建设特点分析[J]. 水运工程, 2019(10): 1-8.

(下转第 245 页)