

植物纤维材料在河道护坡工程中应用研究综述

陈雅雯¹, 蒋小雨¹, 邵钱宇¹, 杨子杰¹, 姜高群², 左建国³, 丁奠元¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;

2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009;

3. 昭通市水利水电勘测设计研究院, 云南 昭通 657000)

摘要: 新时期生态河道工程对低碳、生态材料的需求巨大。基于植物纤维材料已有的研究成果、文献和国内外工程实践案例, 该研究分析了植物纤维材料的水利生态功能和水利结构功能, 探讨了河道断面设计和施工工艺方面的注意事项。植物纤维毯主要用于河道岸坡完工初期, 发挥其保持水土作用, 纤维-土壤综合体的形成使得水土保持作用具有一定的持续性。纤维材料通过水土保持、改良土壤、促进植被恢复等作用, 促进岸坡生境系统发展。植物纤维材料的形状特征和工作环境, 决定了其水利结构功能, 具体包括生态护坡、水景观(生态围堰与生态岛)、岸坡护脚和河床护底等。植物纤维毯主要用于土壤能够达到自身稳定的岸坡, 其抗冲流速不大于3.0 m/s。植物纤维毯作为一种柔性材料, 施工简单方便, 多与其他措施配合应用, 设计和施工中应注意植物纤维材料功能的时空变化。

关键词: 生态护坡; 河道断面; 水土保持; 生境构建; 乡土植物

中图分类号: U417.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0027-09

Review on the Application of Plant Fiber Materials in River Slope Protection Engineering

CHEN Yawen¹, JIANG Xiaoyu¹, SHAO Qianyu¹, YANG Zijie¹,

JIANG Gaoqun², ZUO Jianguo³, DING Dianyuan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

3. Zhaotong Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Zhaotong, Jiangsu 657000, China)

Abstract: The ecological river course project in the new period has a great demand for low carbon and ecological materials. Based on the existing research results of plant fiber materials, engineering practice cases and existing literature all over the world, this work analyzed the ecological function of water conservancy and water conservancy structure function of plant fiber materials, and discussed the points for attention in river section design and construction technology. Plant fiber blanket is mainly used in the initial stage of river bank slope completion to play its role of water and soil conservation. The formation of fiber-soil complex makes the role of water and soil conservation have a certain continuity. Through soil and water conservation, soil improvement and vegetation restoration, the development of habitat system on bank slope is promoted. The shape characteristics and working environment of plant fiber materials determine the function of water conservancy structure, including ecological slope protection, water landscape (ecological cofferdam and ecological island), bank slope foot protection and river bed bottom protection, etc. Plant fiber blanket is mainly used in the bank slope where the soil reaches its own stability, and its anti-impact velocity is no more than 3.0 m/s. As a kind of flexible material, plant fiber blanket is simple and convenient in construction. It is often used with other measures. Attention should be paid to the temporal and spatial changes of plant fiber material function in design and construction.

Keywords: ecological slope protection; river cross section; soil conservation; habitat building; native plants

土壤生物工程技术 (Soil Bioengineering) 发展历史悠久。中国早在周代就利用柴捆加固堤岸,在明代总结了植柳措施防护河流岸坡的技术要点^[1]。19 世纪以来,土壤生物工程技术在日本和西方国家兴起。20 世纪 70 年代以来,为恢复河流系统的生态及水文功能,土壤生物工程技术受到更多重视,逐渐形成了较为完善的理论和技术体系^[2-5]。该技术的核心是基于绿色、环保、可持续发展的理念,利用自然的材料和植被,来应对自然、气候和人类活动给社会带来的负面影响,实现景观、人文和社会经济相统一的综合目标^[6-8]。土壤生物工程的材料主要分为两类,其一为本土植物,比如各类可扦插成活的植物(灌木植物和乔木植物)和乡土草本植物;其二为植物的副产品,例如木材、植物纤维等^[8-9]。在上述工程材料中,植物纤维材料属于天然材料,来源广泛,加工过程简便、低碳、环保,在土壤生物工程中得到了广泛应用。

植物纤维主要来源包括作物秸秆、杂草、椰壳、黄麻、棕榈纤维等自然材料,通常辅以网状化工材料(尼纶、聚丙烯、聚酯和聚乙烯等)进行应用^[10-11],其应用形式主要为毯状、块状和条状(见图 1)。近年来,植物纤维毯广泛应用在水土保持工程和道路边坡防护工程。前人已对植物纤维毯的生态防护效益(如水土保持、改良土壤、促进植被恢复)、护坡机理和应用优势等方面进行了综述性研究^[12-13]。河道岸坡作为河流生态系统的主要组成部分,承担了河流边坡防护、保持水土、拦截污染物、净化水体、涵养水源和构筑生物栖息地等重要功能。新时期河道整治和生态化修复等工程项目不仅需要满足水利基本功能(如防洪、排涝和灌溉等),还要满足生态可持续性、生物多样性和低碳减排等方面要求。虽然植物纤维材料在河道岸坡防护工程中工程实践较多,但是对植物纤维材料在水利生态、水利结构、水利设计和施工工艺等方面的研究较少。

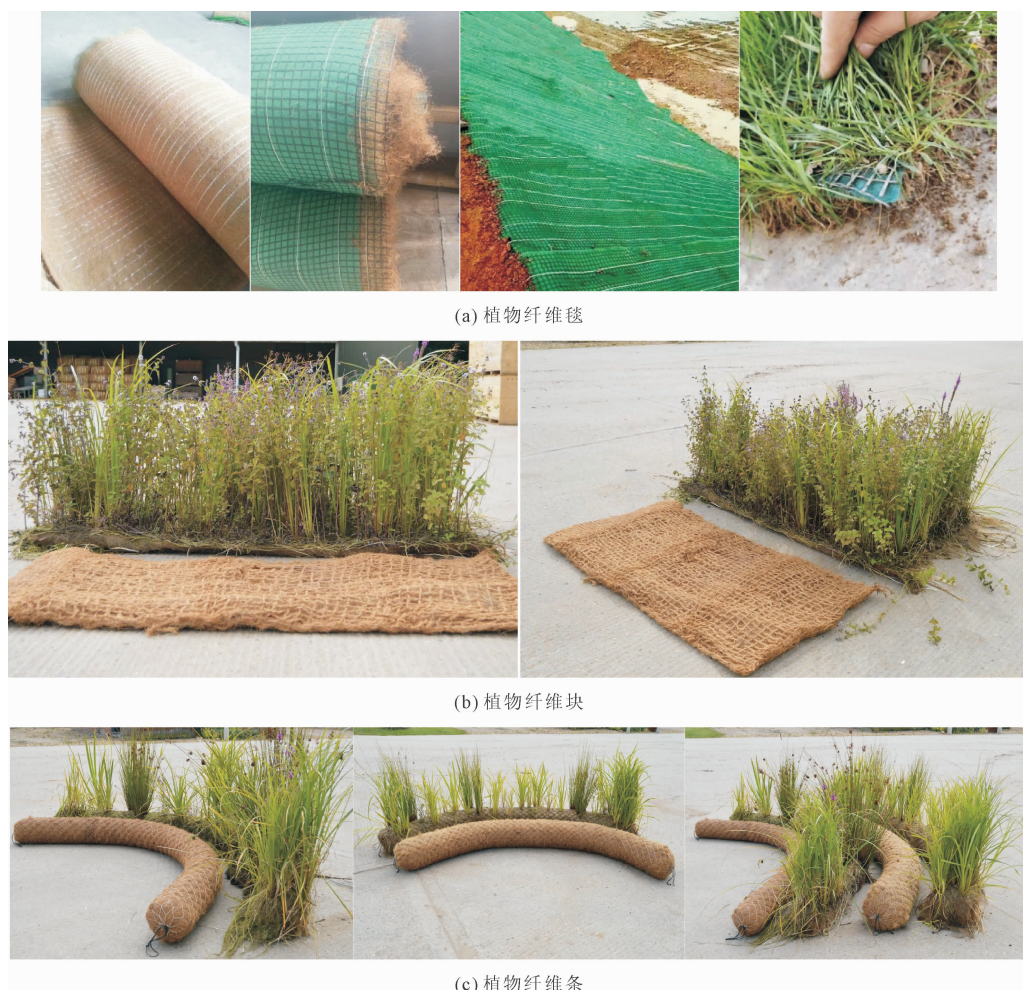


图 1 植物纤维材料常用形式示例

鉴于以上研究现状和存在问题,本研究基于生

态河道工程对低碳、生态材料的巨大需求,立足于植

物纤维材料已有的研究成果,总结归纳国内外工程实践案例和已有文献,拟从植物纤维材料的水利生态功能、水利结构功能、河道断面设计、施工工艺和未来发展等方面,探讨国内外植物纤维材料在生态河道工程中的应用现状、存在问题和发展前景,为生态河道工程材料发展、设计和施工提供技术和理论参考。

1 植物纤维材料的结构

目前国内植物纤维毯主要包括无草籽植物纤维毯和带草籽植物纤维毯,分别对应三层和五层结构的纤维毯^[14]。三层结构的纤维毯由上下两层用作固定的化工纤维网和中间的天然植物纤维层组成。相比于三层结构的纤维毯,五层结构的纤维毯多了第三层带有草籽的营养土和第四层营养纸(见图1(a))。天然植物纤维层可以根据当地的气候、土质和布置水位等情况进行选择。草籽层主要分为南方草籽和北方草籽。南方草籽比较耐潮湿,北方草籽比较耐旱耐寒。不同的材料组成所产生的效果也会有所不同,针对工程地区的具体需要,可以选择不同的植物纤维毯。植物纤维块与纤维毯结构类似,可以根据工程实际需要定制尺寸(见图1(b))。植物纤维条是由纤维毯包裹木屑等植生材料构成,外径可根据工程需要进行定制(见图1(c))。

2 植物纤维材料的水利生态功能

植物纤维材料多用于完工初期的河道岸坡、坡脚和护底,其首要水利生态功能为保持水土,抑制水流对河道侵蚀。随着新修岸坡生态的恢复,植物纤维材料对河道岸坡生境的构建也具有良好的促进作用。

2.1 水土保持作用

植物纤维毯对河道岸坡具有较好的水土保持作用^[15]。植物纤维毯保持水土的作用机理体现在多个方面。首先,植物纤维毯覆盖在土壤表层,能够较好地减弱降雨对土壤表面的溅蚀作用^[13,16]。植物纤维毯在减小雨水打击动能的同时,将降雨分流为表层截留、地表径流和垂直渗漏等多个流向,达到固土、截流、入渗的效果^[17-18];在降雨初期能减少径流量和延缓形成时间,一定程度上缓解河道的行洪压力,减弱对表土的冲刷作用^[10-11]。其次,由于植物纤维的形状特征与植物根系类似,部分纤维与土壤混合,混合纤维能够代替植物浅层根系,固定表层土壤,形成纤维-土壤综合体^[10],随着时间的发展,综

合体进一步增强^[11],优化岸坡的微地形^[19]。第三,由于土壤表层的植物纤维毯高强度的PP网具有较强的固结作用,有效地增强了河道岸坡的抗冲刷的性能,有利于维持高速过流时岸坡土壤的稳定。

随着应用时间的发展,植物纤维材料从工程结构锚固、提供基质养料到逐步降解过程,均影响水土保持作用的效果。根据植物纤维毯降解状态、植物生长过程和水土保持作用的发挥效果等,可将植物纤维毯全生命周期大致分为三个阶段。

(1) 纤维-土壤综合体形成阶段(植物幼苗发育)。本阶段是指从植物纤维毯铺设到纤维-土壤综合体建立的过程。由于土质和降雨过程的差异,该过程持续时间可能有所不同。在此阶段,植物幼苗快速发育,根系生长,占据坡面,形成初步的河道岸坡生态系统。植物纤维毯本身抗冲、防蚀、截流和强化入渗的效果,在综合体保持水土的过程中发挥了关键作用。

(2) 纤维-土壤综合体强化阶段。随着植物根系的不断发育,根系的加筋和锚固作用进一步增强了综合体的稳定性^[20-22]。同时,植物地上部分冠层的发育,冠层的水文效应越来越显著^[23-27],进一步减弱雨滴的打击作用,增强综合体保持水土的作用。此阶段中,植物根-冠系统对岸坡水土保持的协同作用越来越显著,而植物纤维毯的缓慢腐解使得其本身的作用效果逐渐减弱。

(3) 纤维-土壤综合体稳定阶段。当近表层植物根系发育到一定程度,根系对表层土壤的加固作用达到稳定阶段。随着植物纤维进一步腐解,植物纤维毯保持水土的作用逐渐减弱。此时根系的固土作用影响较大,植物纤维作用对综合体的影响较小,直至植物纤维完全分解。

由以上分析可知,综合体水土保持能力主要由纤维毯本身和附着的植物决定。植物纤维毯的水土保持能力主要体现在工程完工后的运行前期,后期植物冠层和发达的根系在保持水土过程中起主要作用。因此,水土保持能力作用主体存在由初期的纤维毯逐渐向植物转变的过程。随着植物纤维毯腐解和植物发育,水土保持作用的此消彼长,使得纤维-土壤综合体的水土保持作用具有一定的持续性^[28]。

2.2 岸坡生境构建

作为一种外源生物材料,植物纤维材料除了上述本身保持水土的作用外,还通过提高岸坡土壤含水量^[29-30]、减缓岸坡土壤温度波动^[31]、改善岸坡土壤肥力^[32]等方面,为种子萌发和植被生长创造了适

宜的生长环境,深刻影响着植物生长发育过程^[33-34]。研究表明,覆盖植物纤维毯样地的植物相比裸地,具有更高的生产力^[35],能有效提高困难立地条件下植物的成活率^[33],增强对土壤水分的保蓄作用,有效提高了河道岸坡生境对极端天气的耐性,尤其对气象干旱和水文干旱,具有较好的缓解作用;在极端干旱发生后,有助于植被快速恢复^[12]。植物纤维毯可提升多年生草本植物生产力,显著提高植物的密度,增加植物根系干重^[35]。

3 植物纤维材料的水利结构功能

植物纤维材料形状特征和工作环境,决定了其水利结构功能。根据植物纤维材料在河道岸坡中的铺装安设位置、形状特征和工作方式,植物纤维材料水利结构功能包括生态护坡、水景观(生态围堰与生态岛)、岸坡护脚和河床护底等。

3.1 生态护坡

实际工程中,植物纤维毯多以平铺的形式构建工程初期土壤的保护层;通过播撒草籽,建立岸坡生态防护体系。基于保护坡面生物多样性的考虑,护坡植物草籽多以混播的形式^[36]。通过不同比例草

籽的搭配,植物纤维毯充分利用不同植物生长发育特性,加强固土护坡作用。采用植物纤维毯时,植物的组合方式和比例关系可适当进行调整,以满足生态河道工程护坡位置、景观功能和水保功能等方面的要求,最大程度发挥植被护坡生态和景观效果。

3.2 水景观

植物纤维毯除了平铺的形式,还以条状的形态(植物纤维条)用于河道工程。当安设在流速不大的河流中,植物纤维条利用自身的重力、环状结构和木桩锚固作用稳定在某一位置,通过壅高水位,进一步减缓水流,在一定区域内形成小型挡水围堰(见图 2(a))。当纤维条与岸坡连接,可以形成水流相对静止的湿地区域(见图 2(a));作为岸坡向水中的延伸,可以在此区域中种植水生植物,进而打造生态岛(见图 2(b))。此类纤维条一般以黄麻为原料,在水中缓慢分解;同时,植物纤维条作为植物种子生长基质,为方便后期施工作业,施工人员可以在植物纤维条中预先培植挺水植物。纤维条的腐解可以为植物生长提供养分,促进植物根系的生长。植物根系的快速生育发展在一定程度上缓解了纤维条腐解带来的失稳效应,有助于维持水生生态系统。



图 2 植物纤维条构建生态围堰与生态岛示例(英国 威尔士 彭布罗克公地河改善工程)

3.3 岸坡护脚

植物纤维条与扦插植物和木桩组合,可以作为岸坡的护脚,抵御水流对坡脚冲刷(见图 3)。用做护脚时,植物纤维条的上部多预先培植根系发达的挺水植物,随着植物的生长,植物根系不断深入底部土壤;通过植物根系的锚固作用和加筋作用进一步加固坡脚,维持和进一步强化岸坡的稳定。

3.4 河床护底

对于发生阶段性洪水的河流和阶段性排水沟

渠,河床和岸坡全部铺设植物纤维毯,可以较好地保护沟渠已有的植被,有效维持河床生态的稳定(见图 4)。当沟渠过水时,植物纤维毯表层的网状结构可以有效过滤和防冲,保护植物根系及其周边土壤;过水结束后,促进植物继续生长。此外,植物纤维毯在沟渠底部形成的微生态系统为植物根系的生长提供了适宜的环境,根系的良好发育更进一步增强了沟渠河床的稳定。



图 3 植物纤维条构建岸坡护脚示例(英国 威尔士 彭布罗克公地河改善工程)



图 4 植物纤维毯河床护底示例(英国 英格兰约克郡 威弗利煤矿生态恢复工程)

4 植物纤维材料的河道断面设计

植物纤维材料的水利结构功能决定了其生态河道断面的设计。在实际应用中,毯状的植物纤维材料一般作为生态河道完工初期水保材料和植被生长的基质材料(见图 5(a))。植物纤维毯主要用于土壤达到自身稳定的岸坡,仅承受压应力,不承受拉应力。因此,植物纤维毯对岸坡抗滑稳定性影响较小。除了计算岸坡的抗滑稳定性之外,还应考虑其抗冲特性。一般条件下,植草垫(植物纤维毯)抗冲流速不大于 3.0 m/s ^[37],适用于流速较小的平原河道和圩区河道;并常常配合其他固土护坡的措施,比如柴捆、扦插植物等^[38](见图 5(a)),发挥工程的综合效应。

植物纤维条多跟方木桩配合,主要用于岸坡护脚,还可以壅高水位,打造生态湿地(岛)。设计中,一方面考虑生态湿地(岛)的范围,确定植物纤维条的打桩位置;另一方面,合理选择种植的植物类型;

沿河道岸坡方向,在生态湿地(岛)的范围内多种植挺水植物,往岸坡上游依次选择种植湿生植物和旱生植物(见图 5(b)和图 5(c))。

5 植物纤维材料的施工工艺

5.1 坡面植物纤维毯

根据河道断面设计,坡面植物纤维毯(带草籽)的施工工艺主要包括清理杂物、挖方工程、坡面整理、铺设纤维毯和浇水养护等方面(见图 6)。

施工中注意坡面处理应根据土壤含水量状况,适当洒水作业,满足植物种子萌发的要求。纤维毯铺设时,其搭接方式应与水流方向保持一致,搭接宽度应保持在 $10\text{ cm} \sim 15\text{ cm}$ 之间。植物纤维毯应埋入边坡顶端垂直沟槽中,覆土压实,其锚固沟宽和深度均不小于 20 cm ;端部和端部重叠处锚固间距不得超过 30 cm 。附加的锚固应以菱形图案放置在每个毯子的中心,确保纤维毯和地面的充分接触。锚固钉的深度应根据土质和压实程度适当调整,对于

直径为纤维条粗细 2/3 的沟,将纤维条埋入沟中(见图 5(a));用方木桩穿过纤维条的网状结构,插入土中,保证木桩把纤维条两边固定到位;利用可生物降解的麻绳将相邻的方木桩端部绑扎,并压实方木桩周围的土壤。通过定位桩,确保上下游及纤维

条两边达到稳定要求,使其顺利过渡到河道岸坡。小型围堰和生态岛的施工工艺与岸坡护脚类似,关键在于利用方木桩固定纤维条,达到稳定要求(见图 5(b)和图 5(c))。

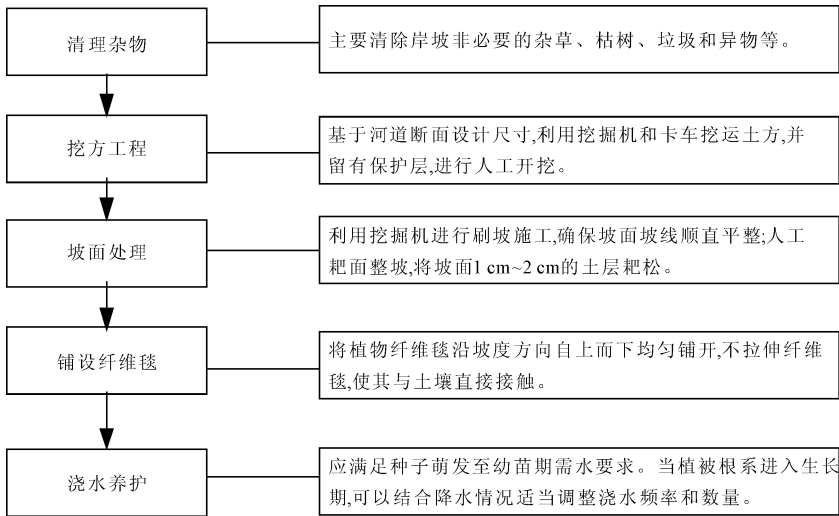


图 6 植物纤维毯施工流程图

植物纤维毯作为一种柔性材料,常常与其他岸坡防护措施配合应用,设计和施工中应注意纤维毯功能随时间和空间的变化。前坪水库岩基边坡生态修复工程中采用“岩体中植入锚杆+镀锌铁丝网+草纤维客土混喷植生护坡+植物纤维毯护坡+裸根栽植落叶灌木护坡”复合式生态植被支护技术^[39]。此工程前期充分发挥了植物纤维毯保持水土的作用,有效防止土壤皴裂,保持土壤结构,实现雨季减少冲刷,冬季增强保温性能,促进岸坡生境构建和发展。安徽合肥怀宁路下穿天鹅湖隧道工程项目为保护天鹅湖的生态环境与景观风貌,采用组合式生态围堰施工技术,前期利用了植物纤维毯抑制尘土和水土保持作用,后期主要利用了植物纤维毯生境构建和维持景观的作用^[36]。

6 问题与展望

(1) 植物纤维材料的水力学特性。研究人员对植物纤维毯性能的测试主要集中在抗蚀性、防冲性(雨水)、入渗性等方面,以水土保持工程和生态恢复工程居多。实际水利工程中,工程师常常根据工程经验确定植物纤维材料的水力学特性参数,而对于植物纤维材料在河道过流、行洪、防冲、破坏及其机制等方面研究较少,一定程度上限制了植物纤维材料在河道岸坡工程上的研究和应用。因此,针对

植物纤维毯/条/块各种工况,开展相关的控制试验,以检测植物纤维材料水力学特性,成为将来进一步推广应用的重要环节。

(2) 原材料的拓展应用。植物纤维材料是一种典型的农业固体废弃物回收利用产品。我国是农业大国,粮食生产产生的大量麦秆、秸秆等废纤维为植物纤维材料的生产提供了原料。以秸秆为主要原材料的草帘、草席等产品已在水利工程混凝土养护等方面广泛应用,但是目前市场上植物纤维毯多以椰丝为主,以秸秆为原材料的纤维毯还较少。进一步研制和优化以秸秆为材料,并适用于河道岸坡工程的植物纤维毯成为重要的研究方向。

(3) 乡土植物的搭配。我国幅员辽阔,跨度极大,不同流域的水文、气象和生态环境都各不相同。植物纤维毯能有效解决单一植物群落退化的脆弱性问题,并在短期内提供绿化效果,集长效保护、次生灾害有效保护、防止水土流失和滑坡保护于一体,具有良好的工程和环境效益。但是与植物纤维毯搭配的植物生境系统演化受多种因素影响,植物的种类和种植结构的差异引起生态演化多样性和不确定性,进而影响工程景观效果,甚至限制生态功能的发挥。乡土植物具有很强的适应性、抗逆性、多样性、经济性,是构建当地河道生态群落不可替代的主体。在景观方面也能体现出当地的自然风采。乡土植物

既取材方便,又能快速适应当地的条件,有助于维护河道岸坡工程生态环境。目前带草籽的植物纤维毯多以市场上主流草籽为主,在设计和生产过程中,未能充分发挥当地乡土草类植物的作用。因此,在河道岸坡工程设计中,设计人员应注重乡土草类植物的选择;科研人员应加大对植物纤维材料中乡土草类植物的发芽率、根系下扎以及冠层生长等方面的研究。

7 结 论

植物纤维材料来源广泛,具有较好的低碳、环保特性,其推广应用有助于我国水利工程践行“双碳”目标。本研究通过分析总结已有的研究成果和工程示例,得出以下结论:

(1) 植物纤维材料具有较好的水利生态功能,不仅可以在工程完工后运行前期保持河道岸坡水土,达到固土护坡的作用,而且为植被的生长提供良好的水分、温度和肥力条件,构建较好的植物生境。

(2) 根据植物纤维材料的形状,可以实现不同的水利结构功能。一般情况下,植物纤维材料以毯状平铺在土壤表面,可以用于构建生态护坡和排水沟渠护底;植物纤维条可以用于保护坡脚,并利用自身壅高水位的能力,构建生态围堰和近岸湿地。

(3) 河道断面设计中,植物纤维毯一般用于土壤自身稳定的岸坡,并考虑其抗冲特性。一般条件下,植草垫(植物纤维毯)抗冲流速不大于 3.0 m/s 。

(4) 坡面植物纤维毯(带草籽)的施工工艺主要包括清理杂物、挖方工程、坡面整理、铺设纤维毯和浇水养护等方面。

(5) 在将来研究中,研究人员可以重点研制以秸秆为原材料的植物纤维材料,并强化对植物纤维材料的水力性能的测试,进一步确定与之配套的乡土植物。

参考文献:

- [1] 温全平. 城市河流堤岸生态设计模式探析[J]. 中国园林, 2004(10): 22-26.
- [2] 高甲荣, 刘 瑛, Hanspeter Rauch. 土壤生物工程在北京河流生态恢复中的应用研究[J]. 水土保持学报, 2008(3): 152-157.
- [3] 李小平, 张利权. 土壤生物工程在河道坡岸生态修复中应用与效果[J]. 应用生态学报, 2006(9): 1705-1710.
- [4] 陈 鹏, 李泽实, 王可健, 等. 不同土壤生物工程植物发展特征动态研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 165-168, 172.
- [5] Preti F, Capobianco V, Sangalli P. Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions[J]. Ecological Engineering: The Journal of Ecotechnology, 2022, 181: 106687.
- [6] George N Zaimes, Guillermo Tardio, Valasia Iakovoglou, et al. New tools and approaches to promote soil and water bioengineering in the Mediterranean[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133677.
- [7] Sangalli P, Fernandes J P, Tardío G. Soil and water bioengineering as natural based solutions [M]. Springer, Cham: Urban Services to Ecosystems, 2021: 317-332.
- [8] 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): 10505.
- [9] Andre Evette, Sophie Labonne, Freddy Rey, et al. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe[J]. Environmental Management, 2009, 43: 972-984.
- [10] 刘宏远, 刘 亮, 李秀军, 等. 植物纤维毯道路边坡防护技术综合效益评价[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (1): 345-352.
- [11] Rickson R J. Controlling sediment at source: an evaluation of erosion control geotextiles[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(5): 550-560.
- [12] 李宏钧, 孔亚平, 张 岩. 植物纤维毯生态防护效益研究述评[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 146-154.
- [13] 张 平, 王树森, 马迎梅, 等. 植物纤维毯对黄土沟壑区沟道边坡产流产沙及土壤的影响[J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(2): 15-22.
- [14] 潘晓海, 刘 龙, 张彦丰, 等. 植物纤维毯防护对植物种子出苗的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(1): 44-47.
- [15] 逢 红, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 北京市人民渠生态护岸技术应用研究[J]. 中国水土保持, 2007(6): 37-39.
- [16] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A, et al. Effectiveness of biological geotextiles for soil and water conservation in different agro-environments[J]. Land Degradation & Development, 2011b, 22(5): 495-504.
- [17] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A. Using palm-mat geotextiles on an arable soil for water erosion control in the UK [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011a, 36(7): 933-945.
- [18] Smets T, Poesen J, Langhans C, et al. Concentrated flowerosion rates reduced through biological geotextiles

- [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(4):493-502.
- [19] Mitchell D J, Barton A P, Fullen M A, et al. Field-studies of the effects of jute geotextiles on runoff and erosion in Shropshire, UK [J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2):182-184.
- [20] 乔娜, 余芹芹, 胡夏嵩, 等. 植物对土壤加强作用及其生态护坡研究综述[J]. *人民黄河*, 2011, 33(7):106-109, 143.
- [21] Su Lijun, Hu Bingli, Xie Qijun, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11):2784-2795.
- [22] 李云鹏, 陈建业, 陈学平, 等. 五种护坡草本植物根系固土效果研究[J]. *中国水土保持*, 2021(1):5, 41-45.
- [23] 林国财, 谢兴华, 阮怀宁, 等. 降雨入渗边坡非饱和和渗流过程及稳定性变化研究[J]. *水利水运工程学报*, 2019(3):95-102.
- [24] Cazzuffi D, Cardile G, Giofrè D. Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications [J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2014, 1(3):262-300.
- [25] Hu Xia, Li Zongchao, Li Xiaoyan, et al. Influence of shrub encroachment on Ct-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 150:1-9.
- [26] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植被护坡中植物根系的阻裂增强机理研究[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2009, 55(5):613-618.
- [27] 龙诚璧, 胡伟, 李光范, 等. 热带不同植被边坡水文效应室内模型试验[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32):383-388.
- [28] 张平. 植物纤维毯对黄土丘陵沟壑区沟道边坡的生态防护效益[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [29] Bowden W B, Fahey B D, Jagath E, et al. Hillslope and wetland hydrodynamics in a tussock grassland, South Island, New Zealand [J]. *Hydrological Proc Hydrological Processes*, 2001, 15(10):1707-1730.
- [30] 石鑫, 孙海龙, 李绍才. 秸秆纤维网覆盖下纤维用量对土壤蒸发的影响[J]. *中国水土保持*, 2012(2):47-49.
- [31] 杨越, 曹波, 孙保平, 等. 生态垫对流动沙地土壤温湿度和养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 16(3):81-83, 87.
- [32] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A, et al. Use of palm-mat geotextiles for soil conservation: I. Effects on soil properties [J]. *Catena*, 2010, 84(3):99-107.
- [33] 王代军, 胡桂馨, 高洁. 公路边坡侵蚀及坡面生态工程的应用现状[J]. *草原与草坪*, 2000(3):22-24.
- [34] 赵方莹, 逢红, 祁有祥, 等. 城市河渠生态护坡技术效益对比——以北京市新开渠为例[J]. *中国水土保持科学*, 2006(S1):67-70.
- [35] Jankauskas B, Jankauskiene G. Soil conservation on road embankments using palm-mat geotextiles: field studies in Lithuania [J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2):266-275.
- [36] 胡先宽. 湖底隧道组合式生态围堰施工技术[J]. *工程与建设*, 2020, 34(4):712-714, 717.
- [37] 水利工程生态护岸设计规程: T/GDHES 001—2022 [S]. 广州, 2022.
- [38] 肖兴富, 李文奇, 常佩丽, 等. 棕榈纤维垫法恢复水库岸边植被施工技术[J]. *南水北调与水利科技*, 2005(4):26-28.
- [39] 靳记平, 王永强, 皇甫泽华, 等. 前坪水库岩基边坡生态修复技术与应用研究[J]. *治淮*, 2018(4):101-103.