

河道治理工程中生态护坡与水动力条件的协同设计方法

田赛禹

北京怀柔科学城建设发展有限公司 北京 101400

摘要：生态护坡与水动力条件的协同设计是河道治理工程的核心技术环节。该设计以生态优先、安全稳定等为原则，通过三维水动力数值模拟优化护坡布局，依据水流剪切力、流速等参数选择适配的基质、加筋材料及植被，结合生态丁坝、深潭-浅滩序列调控水动力，同时构建监测反馈机制动态调整。其核心在于实现护坡结构稳定性与水动力适应性的统一，兼顾生态功能修复与防洪安全，为河道生态系统修复提供技术支撑。

关键词：河道治理工程；生态护坡；水动力条件；协同设计方法

引言

河道治理中，生态护坡的效能发挥与水动力条件密切相关，二者协同不足会导致护坡失稳或生态功能退化。传统设计常割裂二者联系，难以平衡安全与生态需求。本文基于工程力学与生态学原理，探讨生态护坡与水动力条件的协同设计方法，从布局优化、材料选择、水动力调控及监测反馈等方面构建技术体系，旨在为提升河道治理工程的生态效益与安全稳定性提供科学方案。

1 生态护坡与水动力条件概述

1.1 生态护坡

生态护坡是融合工程力学、生态学与恢复生态学原理，通过构建由植物、微生物、工程材料组成的复合系统，实现边坡稳定性维持与生态功能修复的综合技术体系，其核心在于打破传统硬质护坡对生态系统的阻隔，在保障边坡抗冲刷、抗滑塌等力学性能的基础上，重建坡面与水体、土壤、大气之间的物质循环与能量流动通道。这类护坡系统通常包含植被层、基质层、加筋层及基础层四个结构单元，植被层通过根系固土、茎叶消能削减水流对坡面的直接冲击，基质层为植物生长提供养分与水分持留空间，加筋层借助土工格栅等材料增强土体抗剪强度，基础层则通过调整坡比、设置反滤结构减少地下水渗透引发的边坡失稳风险。生态护坡的生态效益体现在多方面，如为小型水生生物与鸟类提供栖息场所，通过植物蒸腾与土壤渗透调节区域微气候，利用根系-微生物协同作用降解水体中的氮磷污染物，进而提升滨水生态系统的生物多样性与自我净化能力。

1.2 水动力条件

水动力条件是描述水体运动状态与能量特征的综合参数体系，涵盖流速、水深、径流流量、波浪参数、剪切力等关键指标，其时空变化直接影响水体与滨岸带之间的物质交换强度及边坡表层土体的侵蚀-堆积平衡。天

然水体中，水动力条件受流域水文过程、地形地貌及气象因素共同调控，汛期的高流速与大流量会显著增大水流对坡脚的淘刷作用，而枯水期的低水位则可能导致坡体表层土壤因失水收缩产生裂隙。对于生态护坡而言，水动力条件的临界阈值决定了植被选型与工程设计的合理性，例如流速超过0.8m/s的区域需选用根系发达的挺水植物如芦苇、香蒲，其粗壮的茎秆可分散水流能量，而流速较低的区域则适合种植鸢尾、菖蒲等草本植物，通过密集的根系网络巩固表层土壤。波浪产生的周期性冲击荷载会加剧坡体的疲劳破坏，因此在河道弯曲段或迎浪面，需结合块石抛护与植被缓冲带形成复合防护结构，利用块石的透水性削弱波浪能量，同时通过植被根系的拉结作用防止块石间隙的土壤流失。

2 河道治理工程中生态护坡与水动力条件的协同设计原则

2.1 生态优先原则

生态优先原则作为河道治理工程的基石，着重强调对自然生态系统固有结构与功能的悉心维护及积极修复。在构建生态护坡体系时，需将生态效益置于核心地位，充分考量各类生物的栖息需求与生态习性。例如，于护坡植被选型阶段，优先选用本地乡土植物品种，因其历经长期自然选择，对当地气候、土壤及水文条件具备天然适应性，不仅能高效降低后期养护成本，还可极大程度减少外来物种入侵风险，维系区域生态系统的物种多样性与稳定性。在设计过程中，模拟自然生态系统的结构与功能，构建多样化的微生境，像是设置浅滩、深潭、湿地等复合地貌，为水生生物、两栖动物及鸟类提供适宜的繁衍、栖息与觅食空间，助力恢复受损的生态链，促进生态系统物质循环与能量流动的顺畅进行，让河道生态系统逐步重归自我调节、自我修复的良性发展轨道，最终实现人与自然和谐共生的理想愿景^[1]。

2.2 安全稳定原则

安全稳定原则是河道治理工程得以长期有效运行的根本保障,对生态护坡的结构稳固性与水动力适应性提出了严苛要求。从结构稳固性层面来看,需综合运用工程力学原理,对边坡的坡度、高度及土体力学参数展开精确计算与分析,依据不同地质条件合理选用适宜的护坡结构形式,如浆砌石护坡、格宾网护坡、植被混凝土护坡等,并科学设置反滤层、排水孔等设施,及时疏导地下水,降低孔隙水压力,防范边坡因土体饱水而引发的滑动、坍塌等安全隐患。面对复杂多变的水动力条件,生态护坡要具备良好的抗冲刷、抗淘蚀能力。针对高流速、强水流区域,可通过铺设抗冲刷材料、种植根系发达且植株高大的水生植物,如芦苇、菖蒲等,利用植物根系的锚固作用与茎叶对水流能量的消散作用,有效抵御水流对坡脚与坡面的直接侵蚀,确保在洪水期等极端水动力条件下,生态护坡仍能坚守稳定,保障河道两岸人民生命财产安全及周边基础设施的正常运转。

2.3 协同优化原则

协同优化原则致力于实现生态护坡各组成部分之间以及生态护坡与周边水动力环境的高效协同、整体优化。生态护坡内部,植被层、基质层、加筋层与基础层并非孤立存在,而是相互关联、协同作用的有机整体。植被层借助根系固土,同时为微生物提供栖息场所,微生物参与土壤养分转化,促进植被生长,两者形成良性循环;基质层为植被生长供给养分与水分,加筋层增强土体抗剪强度,基础层奠定稳定基础,各层紧密配合,共同提升护坡整体性能。在与水动力环境的协同方面,要依据不同水动力条件,精准调控生态护坡的设计参数。例如,在水流流速较小、水深较浅区域,选择耐湿性强、根系细密的草本植物,利用其密集根系稳固表层土壤,同时借助缓慢水流促进植物对水体中污染物的吸收净化;在流速较大、水位变幅明显区域,搭配使用抗冲刷材料与根系发达的大型挺水植物,既满足护坡抗冲刷需求,又能发挥植物生态功能,实现生态护坡与水动力条件在功能与结构上的深度融合、协同共进,达成生态、安全与经济效益的最大化^[2]。

2.4 因地制宜原则

因地制宜原则充分尊重不同区域的自然地理条件、气候特征与社会经济发展水平差异,强调生态护坡设计应依地定制,贴合当地实际情况。在自然地理条件方面,山区河道地势起伏大、水流落差高、流速快,生态护坡设计需侧重抗冲刷与结构稳固性,可采用块石护坡结合植被防护的方式,利用块石抵御高速水流冲击,植

被涵养水土;平原地区河道水流平缓、地势平坦,但地下水位较高,此时生态护坡应注重排水与耐湿性,选择适宜的水生植物与透水材料,确保坡面土体稳定且植物生长良好。气候因素同样关键,在降水丰富地区,需强化护坡的排水功能与抗侵蚀能力;干旱地区则要考虑植被的耐旱性与水资源高效利用。结合当地社会经济发展水平,合理把控工程建设成本与后期维护投入,若当地劳动力资源丰富,可适当采用人工种植植被等低成本、劳动密集型的生态护坡措施,实现生态保护与经济发展的平衡协调,让生态护坡工程切实落地生根,发挥最大效益。

3 河道治理工程中生态护坡与水动力条件的协同设计方法

3.1 基于水动力模拟的生态护坡布局设计

(1) 借助三维水动力数值模型对河道水流场进行精细化模拟,通过输入流域水文数据、地形参数及边界条件,精准计算不同工况下的流速分布、水位变幅及剪切力等值线,为生态护坡的分区布局提供量化依据,例如在河道主流区与回流区的过渡带,根据模拟结果划分出高冲刷区与低扰动区,针对性设计差异化的护坡结构。

(2) 结合模拟得到的水流动力轴线,将生态护坡划分为迎水区、淹没区及陆域过渡区,迎水区因受水流直接冲击需强化抗冲刷能力,可采用植被与块石组合的复合结构,淹没区则根据淹水时长选择具两栖生长特性的植物,陆域过渡区侧重构建乔灌草结合的立体植被带,形成梯度化的防护体系。(3) 针对河道弯曲段的环流效应,借助高精度水动力模拟技术,全面且精准地识别出凹岸的高流速冲刷带与凸岸的淤积区。在凹岸巧妙布置透水性块体与深根系植被的组合防护,让块体分散水流能量、植被根系锚固土壤;于凸岸精心设计缓坡湿地,利用淤积泥沙培育水生植被,实现冲淤平衡与生态修复的协同。

3.2 生态护坡材料的水动力适应性选择

(1) 根据水流剪切力大小筛选基质材料,在剪切力超过15Pa的高扰动区域,选用级配碎石与土工格室复合基质,其孔隙结构既能保证透水性又可抵抗水流淘刷,而剪切力较低的区域采用腐殖土与膨润土混合基质,通过膨润土的保水特性为植被提供稳定生长环境,同时避免基质被水流带走。(2) 加筋材料的选择需匹配水流脉动强度,在周期性波浪荷载作用区域,优先采用高强度聚酯土工格栅,其耐候性与抗疲劳性能可适应波浪的往复冲击,在单向水流主导的顺直段则选用玻璃纤维格栅,利用其与土壤的高摩擦力增强土体整体性,减少水

流沿坡面向下的渗透侵蚀。（3）植被材料的力学特性需与水动力条件动态匹配，在流速1.0-1.5m/s的区域选择芦苇等茎秆中空的挺水植物，其柔性茎秆可随水流摆动消耗能量，在流速0.3-0.8m/s的区域种植菖蒲等丛生草本，通过密集的茎叶群形成水流缓冲层，而流速低于0.3m/s的区域则搭配沉水植物与浮叶植物，构建水下植被网络稳定河床质^[3]。

3.3 水动力条件的生态化调控设计

（1）通过布设生态丁坝与导流墩改变局部水流形态，丁坝伸入河道的长度控制在河宽的1/5-1/3，其迎水面采用透水结构设计，使部分水流从坝体孔隙渗透，在坝后形成回流区降低流速，为水生植物生长创造低扰动环境，导流墩则沿水流方向呈流线型布置，引导主流远离坡脚以减少淘刷。（2）构建深潭-浅滩序列调控纵向水动力梯度，在河道局部拓宽区域开挖深潭，利用水深增加形成流速降低区，搭配周边浅滩的缓坡设计，使水流在深浅交替处形成紊动扩散，既增强水体复氧能力又降低对坡体的冲刷强度，同时深潭与浅滩的水位差可促进物质循环，提升生态系统净化效率。（3）利用植被缓冲带的阻水效应巧妙调节横向水动力分布，于坡脚至水体边缘科学规划并设置5-10m宽的植被带。挑选根系发达、茎秆坚韧的植物，依靠其茎秆阻力，让近岸水流速度显著减缓。利用植被群落空间异质性构建错落水流通道，让水流能量在缓冲带中逐步消散，避免集中冲刷致坡体失稳。

3.4 协同设计的监测与反馈调整

（1）构建水动力-生态耦合监测体系，在护坡区域按不同坡段地质与水流特性，针对性布设流速仪、水位计、土壤侵蚀传感器，实时精准采集水流参数与坡体稳定性数据。借助遥感影像宏观监测和实地调查微观记录，掌握植被覆盖率、生物多样性等生态指标，形成多维度监测数据库，为设计效果评估提供基础数据支撑。

（2）建立动态反馈调整机制，依据监测数据来识别水动力条件同生态护坡之间的适配偏差。比如，当监测到某区域植被存活状况不佳且对应流速超出设计所允许的范围时，及时增补抗冲刷材料或者更换适应性更优的植物品种；若监测发现坡体位移量超出预警标准，则通过增设加筋层或者调整坡比的方式来优化结构设计。（3）采用数值模拟反演与现场试验结合的验证方法，将监测数据输入原水动力模型进行参数修正，模拟不同调整方案下的护坡响应，同时选取典型区域开展小规模试验，对比不同植被组合、材料配比的实际防护效果，通过模拟与试验的结果互证，形成精准的优化方案，确保协同设计持续适应水动力条件的动态变化^[4]。

结语

综上所述，河道治理中生态护坡与水动力条件的协同设计需统筹生态、安全与水动力特性，通过科学布局、材料适配、水动力调控及动态监测实现多目标平衡。该方法既保障了护坡在复杂水动力下的稳定性，又修复了滨岸生态系统，为河道治理提供了系统性思路。未来需进一步深化水动力-生态耦合机制研究，提升设计的精准性与适应性，推动河道治理向生态化、可持续化发展。

参考文献

- [1]梁雅铭.河道治理工程中生态护坡的应用及设计[J].大众标准化,2025(9):152-154.
- [2]罗帅领.河道治理工程中生态护坡的设计分析[J].河南水利与南水北调,2025,54(3):11-12,30.
- [3]陈高臣.河道治理工程中生态护坡方案比选研究[J].中国水运,2024(23):70-72.
- [4]冯宇涛.河道治理工程中生态护坡的设计与应用探究[J].建材发展导向,2023,21(16):183-185.