

黎河河道护坡技术演变与生态友好型护岸结构创新研究

杨 葳

天津市引滦工程黎河管理中心 天津 300000

摘 要：为解决黎河传统护坡结构破损、生态割裂、功能单一等问题，梳理流域护坡技术三个发展阶段，对比各类护坡工程、生态及经济性能，剖析现有生态护岸适配性短板。结合河道水文、土质特征，创新提出格宾护脚、生态混凝土中层、本土植被顶层的三级复合护岸结构。经数值模拟与现场监测验证，该结构稳定性、抗冻抗冲性能优异，可有效修复河道生态、降低运维成本，适配黎河综合治理需求。

关键词：黎河河道；护坡技术演变；生态友好型护岸；结构创新

引言：黎河作为海河流域重要河道，现有硬质护坡破损突出，存在行洪隐患、生态退化、水质不佳等多重问题，传统护坡模式已无法适配防洪安全、生态修复与景观提升的多元治理目标。为优化河道治理方案，本文系统梳理黎河护坡技术演变历程，评价各类生态护岸技术适配性，针对区域工况短板开展护岸结构创新设计，通过性能验证明确技术优势，为北方平原河道生态护坡改造提供实操参考。

1 黎河河道概况及护坡技术演变历程

1.1 黎河流域基础概况

(1) 流域自然条件：黎河属海河流域蓟运河水系，全长约 76 公里，流域面积约 562 平方公里，地处暖温带半湿润大陆性季风气候区。多年平均降水量约 620 毫米，6 至 9 月汛期降水占全年 75% 以上。河道纵坡约 1/2000，岸坡土质以粉质黏土和砂壤土为主，局部含粉细砂层，地形以缓坡和平原微丘为主，岸坡高度 2 至 5 米^[1]。(2) 河道治理现状：黎河现有护坡工程约 72.6 公里，其中浆砌石和混凝土硬质护坡占 90%，生态型护坡占 25%，自然岸坡仅存 10%。硬质护坡存在开裂、基础掏空、坡面鼓胀等破损，破损率约 15%，局部河段行洪能力不足，存在岸坡崩塌和水体富营养化等问题。(3) 流域治理需求：需满足 50 年一遇防洪标准，修复滨水生态系统，改善河道水质至 IV 类标准，同时兼顾滨河景观带建设，实现防洪安全、生态修复、水环境改善与景观提升的多元协同目标。

1.2 黎河传统护坡技术发展阶段

(1) 原始自然护坡阶段（20 世纪 80 年代前）：岸坡完全依托自然植被和原生土体固岸，无人工构筑物，

抗冲能力弱，但水陆连通性好，生物多样性丰富，适配低强度人类活动下的原生态河道。(2) 硬质工程护坡阶段（20 世纪 80 年代至 21 世纪初）：采用浆砌石挡墙、现浇混凝土面板、预制块等硬质结构，边坡系数 1:1.5 至 1:2.0，抗冲流速 4 至 6 米/秒，结构稳固但全断面硬化导致生态割裂，栖息功能基本丧失。(3) 简易人工生态护坡阶段（约 2005 年至 2020 年）：采用植草护坡、三维植被网、生态袋等技术，植被覆盖率 60% 至 80%，改善表层水土保持和景观效果，但基层仍以硬质材料为主，生态通道有限。

1.3 各阶段护坡技术应用特征对比

(1) 工程性能对比：自然护坡抗冲能力弱，仅适宜流速低于 1 米/秒河段；硬质护坡稳定性强，抗冲流速 4 至 6 米/秒，耐久性好但易老化开裂；简易生态护坡抗冲能力中等（约 2 至 3 米/秒），整体稳定依赖基层硬质结构。(2) 生态效益对比：自然护坡水陆连通最佳，栖息功能完善，自净能力强；硬质护坡阻断物质交换，栖息地退化，自净能力削弱；简易生态护坡恢复部分植被，但底部硬化限制地下水补给和底栖生物生存^[2]。(3) 经济运维对比：硬质护坡建设成本较高（350 至 500 元/平方米），施工成熟，运维较少；简易生态护坡成本略低（250 至 400 元/平方米），但植被养护费用逐年增加；自然护坡无建设成本，但洪水后修复投入大。

1.4 传统护坡技术现存核心问题

(1) 结构缺陷：硬质护坡受冻融循环和不均匀沉降影响，易产生裂缝、鼓胀、基础掏空，整体性不足，极端暴雨下局部垮塌风险增大。(2) 生态缺陷：硬质和半硬质护坡阻断地表水与地下水连通，破坏底栖动物、

鱼类产卵场和两栖类栖息环境,导致河道生态结构简化、自净能力减弱。(3)功能缺陷:传统护坡景观效果单一,水土涵养能力弱,无法满足当前防洪、生态、景观、休闲等多元需求,亟需向绿色生态方向升级。

2 典型生态友好型护岸技术适配性分析

2.1 生态友好型护岸核心理论与设计原则

(1)核心理论:融合河流生态学、岩土力学与水动力学。河流生态学指导维持水陆交错带连通性与生物多样性,支撑栖息地修复;岩土力学保障岸坡稳定与结构承载力;水动力学模拟水流冲刷机制,指导抗冲设计。三学科交叉,构建安全与生态协同的设计理论体系。(2)设计原则:遵循安全性、生态适配性、经济合理性、景观协调性。安全性要求满足抗滑、抗冲、抗倾覆等力学指标;生态适配性强调透水结构与本土植物,恢复自然生态功能;经济合理性统筹建设投入与运维成本;景观协调性注重岸线形态和植被配置与周边环境和谐统一。(3)功能定位:构建兼顾防洪固岸、生态修复、水土保持与景观美化的多功能体系。防洪固岸为基础,保障行洪安全与岸坡稳定;生态修复重建水陆交错带栖息环境;水土保持强化坡面抗蚀能力;景观美化提升滨水空间生态休闲服务价值。

2.2 主流生态护岸结构类型及技术特征

(1)植物型生态护岸:包括草本植被护坡(狗牙根、高羊茅等)、灌木固岸(柳树、紫穗槐等)及乔灌木复合护坡。根系固土深度0.3至1.0米,植被覆盖率超80%,抗冲流速低于2米/秒,适用于水流平缓、岸坡较缓河段,景观融合度高但抗暴雨冲刷能力有限。(2)土工材料生态护岸:涵盖生态袋(聚丙烯无纺布充填种植土)、土工格室(三维蜂窝限位结构)、三维植被网(聚乙烯网垫固土植草)。抗冲流速2.5至3.5米/秒,施工快捷、植被恢复快,但材料5至8年易老化,需定期更换^[3]。(3)生态混凝土护岸:包括植草混凝土(孔隙率25%至35%,填充营养基材)和透水混凝土(透水系数>1厘米/秒)。抗压强度8至15兆帕,抗冲流速3至4米/秒,兼顾强度与植物生长条件,但抗冻融仅50至75次,北方需改良配合比。(4)复合型生态护岸:采用“硬质护脚(浆砌石或混凝土基础)+柔性护坡(生态袋或格室)+植被修复”组合结构,抗冲能力3至4米/秒,结构整体性和生态性能均较优。

2.3 各类生态护岸技术黎河工况适配性评价

(1)水文适配性:黎河汛期最大流速3.5至4.5米/秒,水位变幅2至3米。植物型护岸抗冲不足(<2

米/秒),仅适用于滩地缓流区;土工材料型适用于中缓流速段(2.5至3.5米/秒);生态混凝土和复合型抗冲能力较强(3至4米/秒),可覆盖主流冲刷段,超4米/秒弯道凹岸需配套硬质护脚加强。(2)土质适配性:黎河岸坡以粉质黏土和砂壤土为主。植物型在粉质黏土段锚固良好,砂壤土段固土不足;土工格室和生态袋对土质适应性强,能有效约束土体变形;生态混凝土在砂壤土段需设碎石反滤层防掏空;复合型护岸通过分级放坡适应不同土质,适配性最佳^[4]。(3)生态适配性:黎河流域植物以芦苇、苔草、垂柳为主,水生动物有鲤、鲫、草鱼及中华蟾蜍等。植物型与本土植被衔接自然,为两栖类提供良好通道;土工材料型植被恢复快但透水性有限;生态混凝土孔隙利于微生物附着和鱼类产卵,孔隙率需达25%以上;复合型护岸设生态鱼巢和植生孔,异质性强,生态适配性最优。

2.4 现有生态护岸技术应用短板

(1)结构适配性不足:单一生态护坡形式难以适配黎河弯道凹岸冲刷剧烈、顺直段流速平缓、过渡段水位变动频繁等复杂水文地质条件,缺乏针对不同河段水力特性的差异化结构设计。(2)耐久性较差:土工材料(聚丙烯、聚乙烯等)在紫外线和冻融循环作用下,5至8年即出现老化脆裂;生态混凝土抗冻融循环能力仅50至75次,低于北方河道100次以上要求,长期运维效果难以保障。(3)标准化缺失:黎河所在区域缺乏生态护岸本土化设计规范与施工质量验收标准,设计参数多参照一般规定取值,未针对黎河粉质黏土特性优化材料配比和结构型式,导致不同标段治理效果差异显著。

3 黎河生态友好型护岸结构创新与应用验证

3.1 新型复合生态护岸结构创新设计

(1)结构设计思路:针对黎河传统护坡结构缺陷与生态短板,提出“柔性基础抗冲+透水中层护坡+植被顶层修复”一体化设计理念。以保障岸坡整体稳定为基础,以恢复水陆生态连通性为核心目标,兼顾施工可行性与长期运维便利性,形成刚柔并济、生态优先的新型复合护岸方案。(2)整体结构构造:设计“格宾石笼护脚+生态混凝土中层+本土植被顶层”三级复合护岸结构。底部为格宾石笼护脚(高度1.5至2.0米),发挥抗冲刷和基础承载功能;中部为植草生态混凝土护坡(厚度0.15至0.20米),提供结构防护与植物生长基质;顶层覆盖本土植被(厚度0.20至0.30米种植土层),形成坡面生态修复层。三级结构总厚度约2.0至2.5米,边坡系数1:2.0。(3)核心参数优化:格宾石笼采用镀锌铅丝笼,网目尺寸8×10厘米,填充粒径80至150毫米块石,

孔隙率 25%至 30%；生态混凝土采用 C20 透水混凝土，骨料粒径 10 至 20 毫米，设计孔隙率 25%至 30%，添加适量有机质营养基材，28 天抗压强度不低于 10 兆帕；顶层种植土掺混 20%腐熟有机肥，厚度不小于 0.20 米，确保植物根系生长空间。

3.2 创新护岸结构关键施工技术

(1) 基底处理与护脚施工技术：岸坡清理需清除表层杂物和松散土体，按设计坡比修整坡面，相对密实度不低于 0.92。格宾石笼施工要求石料粒径均匀、填充密实，笼体之间采用钢丝绑扎连接牢固，每层厚度不超过 0.5 米，分层错缝码砌，石笼背部铺设土工布反滤层（规格 200 克/平方米）防土体流失。(2) 中层生态混凝土浇筑技术：透水混凝土采用强制式搅拌机拌和，水灰比控制在 0.32 至 0.38，拌和时间不少于 3 分钟。浇筑采用分层摊铺、平板振捣器振实，每层厚度不超过 0.10 米，浇筑后覆盖塑料薄膜保湿养护 7 天，养护期间禁止行人踩压，确保孔隙率和整体强度达标。(3) 顶层植被配置与种植技术：筛选黎河本土植物狗牙根、高羊茅、紫穗槐、垂柳等构建乔灌草复层群落。种植采用液压喷播与穴栽结合方式，草本播种量 25 至 30 克/平方米，灌木株行距 1.0×1.0 米，乔木株距 2.0 米。养护期内保持土壤湿润，成活率应达 90%以上，生长期施肥以有机肥为主^[5]。

3.3 创新结构性能与效益验证分析

(1) 工程性能验证：采用 FLAC3D 数值模拟分析表明，复合护岸在设计工况下安全系数 1.55，满足规范不小于 1.30 要求。抗冲流速可达 4.5 米/秒，高于黎河最大汛期流速（4.0 米/秒），抗冻融循环经室内加速试验可满足 100 次要求。现场监测设置位移观测点 3 个，水位计 2 套，运行期内坡面位移量小于 5 毫米，整体稳定性良

好。(2) 生态效益分析：相比传统浆砌石护坡，新型结构透水系数提高至 0.8 厘米/秒，水陆连通性显著增强。植被覆盖率达 90%以上，新增灌草群落面积约 3200 平方米，底栖动物种类由实施前 6 种增至 12 种，河道水质氨氮去除率提高约 18%，总磷去除率提高约 22%，生态修复效果明显。(3) 经济与社会效益分析：新型复合护岸综合建设成本约每平方米 580 元，较传统浆砌石护坡增加约 15%，但全生命周期（按 20 年计）运维成本降低约 30%。景观绿化显著改善河岸风貌，滨河休闲空间增加约 1800 平方米，流域居民满意度调查达 85%以上，防洪安全保障覆盖下游 3 个乡镇，综合社会效益突出。

结束语

本文完成黎河护坡技术演变梳理、生态护岸适配性分析及新型复合护岸结构创新研究，有效解决了传统护坡结构不稳、生态连通性差、耐久性不足等核心问题。创新结构兼顾工程安全、生态修复、经济运维与景观价值，适配黎河复杂水文地质条件。研究成果可为北方同类平原河道生态护岸改造、本土化技术规范完善提供借鉴，助力河道治理实现生态与安全协同发展。

参考文献

- [1] 楼琳, 何凡, 王向东, 等. 河道生物护岸技术研究进展与思考 [J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(2): 162-172.
- [2] 魏红岩. 游荡型河道堤脚水平柔性护垫生态防护结构研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022, 13(5): 68-73.
- [3] 王静. 基于生态护坡技术的华北输水河道整治方法 [J]. 河北水利, 2023, 34(6): 41-42.
- [4] 曹凌敏, 王斌. 水利工程中河道生态护坡施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(6): 97-99.
- [5] 赵进勇, 王琦, 彭文启. 基于生态水工学的河道岸坡防护自然化改造技术体系 [J]. 中国水利, 2024, 9(8): 45-48.