



伊洛瓦底江管道穿越河流的 综合治理与成效分析

韩建强¹, 王 强¹, 王世华¹, 李 涛¹, 刘 超¹, 胡 琴¹, 刘 源², 甘 磊²

(1. 中油国际管道有限公司, 北京 102206; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 伊洛瓦底江(伊江)江心岛2010年起进入退化期, 岸线消退, 管道穿越的河段存在险情。为维持河道稳定, 消除油气管道安全隐患, 采用了膜袋混凝土、透水丁坝群、刚性护岸、半刚性护岸和简易护坡等手段进行河道和岸坡的长期治理。为评价伊江管道穿越河流治理方案和成效, 结合伊江河段的演化特点和历年治理工程, 采用江心岛面积、冲蚀程度和管道埋深等指标综合评判不同阶段治理方案对穿越段河道和管道安全的影响。结果表明: 以调节水流、加强护岸、落淤护滩为核心措施的治理方案延缓了江心岛的退化及主河道向西迁移的趋势, 在汛期有效保障了管道安全, 露管现象逐渐消除。伊江系统治理经验可为类似工程整治提供借鉴。

关键词: 伊洛瓦底江; 管道穿越; 综合治理; 治理效果; 护岸工程

中图分类号: TV139.2+6; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0105-08

Comprehensive management and effectiveness analysis of Irrawaddy River pipeline crossing rivers

HAN Jianqiang¹, WANG Qiang¹, WANG Shihua¹, LI Tao¹, LIU Chao¹, XU Qin¹, LIU Yuan², GAN Lei²

(1. SINO-Pipeline International Co., Ltd., Beijing 102206, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Since 2010, the island in the heart of the Irrawaddy River (Yi River) has entered a period of degradation, with receding shorelines and dangerous conditions in the river section crossed by the pipeline. In order to maintain the river stability and eliminate the safety hazards of oil and gas pipelines, membrane bag concrete, permeable ding dam cluster, rigid bank protection, semi-rigid bank protection and simple slope protection have been used for long-term river and bank management. To evaluate the management scheme and effectiveness of the river crossing of Yi River pipeline, this paper combines the evolutionary characteristics of the Yi River section and previous years' management projects, and uses indicators such as the area of the river core island, the degree of erosion and the burial depth of the pipeline to comprehensively evaluate the impact of different stages of management schemes on the safety of the river and pipeline in the crossing section. The results show that the treatment scheme with the core measures of regulating water flow, strengthening bank protection and siltation protection has slowed down the degradation of the river core island and the trend of westward migration of the main river channel, and has effectively ensured the safety of the pipeline during the flood season. The phenomenon of exposed pipe has been gradually eliminated. The experience of Yi River system management can provide a reference for similar projects.

Keywords: Irrawaddy River; pipeline crossing; comprehensive treatment; treatment effect; bank protection project

收稿日期: 2023-05-01

作者简介: 韩建强 (1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为长输油气管道运营建设。

通信作者: 甘磊 (1987—), 男, 博士, 教授, 从事水利工程安全评价研究工作。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

受自然因素演化或人为工程干预, 河道在泥沙淤积、水沙运动、雨季涨水和岔流变化等因素影响下, 随时间推移不断发生演变。在长期动态演变过程中, 不同地貌及地理位置下的河流, 其变化特征不一, 给河网防洪、供水、航运、生态、环境、涉河工程的安全评价带来挑战^[1]。

河流演变过程复杂, 针对不同河段属性, 为维持河道稳定, 众多学者对河流演变下的河道治理工程开展了大量研究。譬如长江马鞍山河段自1954年开始至2000年后在恒兴洲、小黄洲头等陆续实施了护岸工程, 对控制崩岸、维持岸线稳定及稳定河势起到了良好作用^[2]。云南小江流域上游支流的吊嘎河存在河床侵蚀下切现象, 致使岸坡失稳, 诱发滑坡和泥石流等, 余国安等^[3]为此研究人工阶梯对控制河床侵蚀下切的影响, 发现人工阶梯-深潭系统是治理下切河流的有效方法, 且对改善水下生态环境有益。三峡水库运行后, 水沙下泄条件发生变化, 因河道清水下泄及洪峰调蓄力度增加, 长江中下游部分浅滩发生冲深, 洲滩形态出现不利转变, 王致维^[4]总结分汊河道形态演化特征, 讨论相应的治理思路和整治措施, 针对不同类型的分汊河段特性, 提出各情况适用的治理方案。闫霞等^[5]分析长江上游航道的淤积问题, 系统评价了疏浚方案在河床演变、实施时间、航道改善效果等不同方面的优劣性。结果表明: 对航道展开疏浚工程治理可在维持河势稳定情况下保障航运需求, 且施工方便, 便于调控管理, 但航道可持续性较差, 对天然河道变化仍需及时检测及治理。何用等^[6]分析珠江河口的河网河道等演变特征, 探讨河口变化对水生态环境、防洪供水等方面的影响, 提出了珠江河口的治理方案。

本文结合伊江管道穿越工程, 分析伊江管道穿越河流的演变及管道工程建设运行20余年来河段的综合治理过程, 对比不同年份穿越处管道露管、上覆埋深、江心洲洲头及沿岸冲蚀情况, 评价不同防护治理措施和方案的治理成效, 提出合理的治理经验, 以期为类似工程提供借鉴。

1 工程背景

中缅油气管道是我国四大能源战略通道之一, 伊洛瓦底江穿越是中缅油气管道工程建设及运行过程中的关键性工程, 油气管道采用定向钻方式穿越^[7], 于2011年5月25日开工, 2012年2月15日完工。管道在马圭省敏布区穿越伊洛瓦底江岔河, 后沿江心岛敷设约4 km, 在仁安羌市吉吉村与达斡村之间穿越伊洛瓦底江干流。原油管道和天然气管道位于同一位置, 两者间距20 m, 其分布位置见图1。结合实际情况, 2012年在已建管道的基础上拟再穿越两条备用管道, 与原管道平行, 其位置分居于原管道两侧, 间隔原油、气管道均7.5 m。

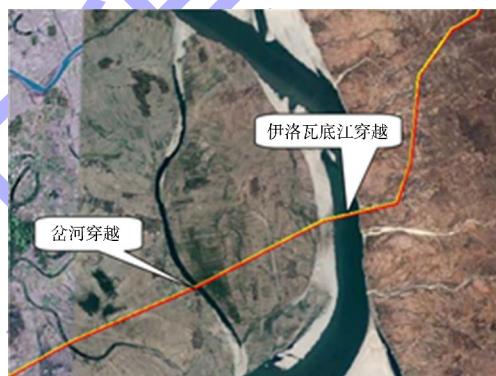


图1 油气管道管线布置

因受自然因素和相关工程影响, 主河河道逐渐向西岸转移, 2011年汛期过后主河道江心岛侧受侵蚀严重, 管道穿越段处出土点与岸坡水平距离由130 m降至52 m, 垂直下切深度约4 m, 严重威胁管道的正常运行。为阻止岸线后移及河床下切, 于2011年汛期过后在江心岛侧铺设混凝土膜袋作为护岸, 但主河道向西扩展和江心岛退化的自然变迁趋势未得到遏制, 在2015—2016年因原护坡垮塌, 开展了护坡修复工程, 2017年至今对伊江河道进行综合治理。

2 演变过程

伊洛瓦底江穿越处的江心岛形成于西岸某支流的冲积扇, 经两岸支流所携带泥沙的持续淤积逐渐扩展, 后受相关水利工程影响, 泥沙淤积量减少, 无法维持冲积扇形态, 最终演变为江心岛。其形成期约开始于1984年, 至2000年江心岛进

入演变稳定期。自2010年起,受雨季、支流和相关工程等多方面影响,下游东岸支流所带来的淤积泥沙持续压迫主河道,江心岛逐渐进入退化期。

因主河道西岸侧和岔河处水流冲刷作用加强,江心岛自洲头到两侧岸线发生了较大程度的冲刷,洲头部位冲刷情况最为严重,冲刷宽度及范围显著大于下游。江心岛上游受冲刷作用消退,下游流速减缓后泥沙逐渐淤积,整体向下游呈推移趋势^[8]。由图2可知,相比2007年,2022年时江心岛大幅度后移,期间虽多次整治,但总体上江心岛面积缩减较快,河道进水宽度增加明显,岔河进水口宽度由380 m展宽至1 100 m,导致下游水流冲刷能力大幅提升。管道穿越处距原洲头约4 000 m,江心岛洲头受冲刷严重,穿越处距洲头距离逐渐缩小,且江心岛岸线呈消退趋势,穿越处附近河道演变形势见图3。图3为管道穿越段的河床断面,其横轴以护岸起始端为原点,以西岸指向东岸为正向, x 为断面各点距原点的水平距离, H 为断面各点海拔高度。由图3可知,随时间推移,主河道西侧江心岛岸坡持续侵蚀消退,至2017年,穿越处天然气和原油管道水平向的露管长度 L 分别达76和56 m,管道安全受到严重威胁。图4为江心岛面积变化图。由图4可知,相比2007年,2016年时江心岛面积由2 010万 m^2 降至1 650万 m^2 ,消亡率达18.2%,江心岛岸线最大消亡距离可达588 m。

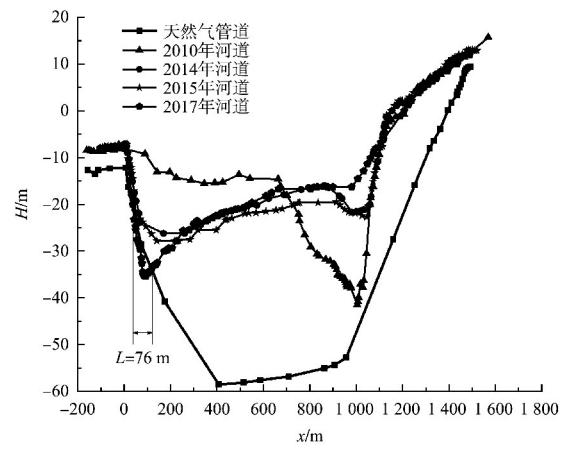


a) 2007年汛期江心岛状态

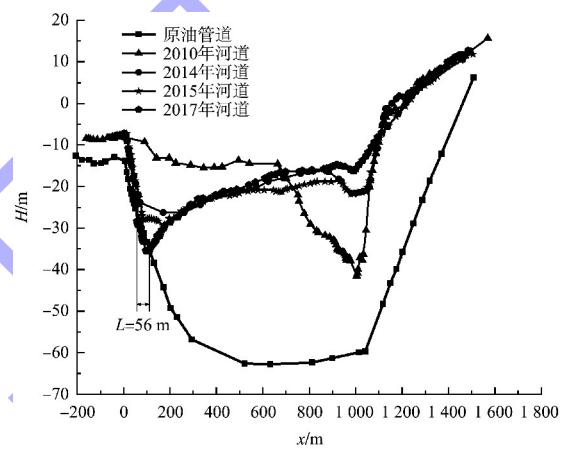


b) 2022年汛期江心岛状态

图2 典型年份江心岛俯视图



a) 天然气管道穿越处河道演变



b) 原油管道穿越处河道演变

图3 管道穿越处河道形势演变

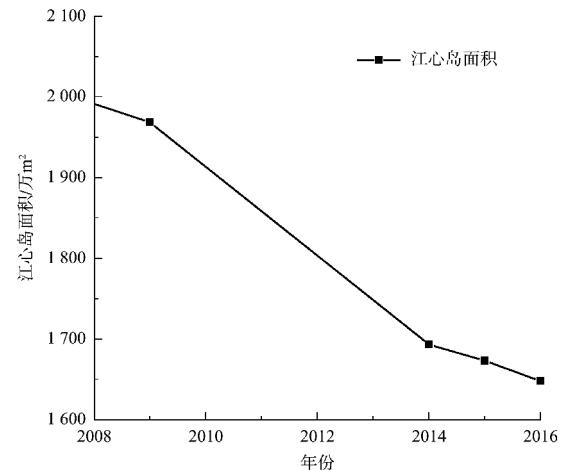


图4 江心岛面积变化

支流变化等因素除加速江心岛退化外,其主要影响在于主河道变化。主河道东岸存在一处深沟,2014年时东岸处的附近河道同勘察设计之初相比较,其深沟已被充填,西岸处从江心岛岸开

始, 至距东岸约 1/3 处范围内, 原河床不断消退, 河床底高度逐渐降低, 江心岛岸处的河床底高度降低最大。主河道逐渐由东岸向西岸迁移, 导致 2009 年以后主河道开始冲刷穿越西河岸处, 河道变化与江心岛处的侧向侵蚀作用相互影响, 西岸侧主河道逐渐恶化, 给穿越处管道正常运行带来风险。

综合比较可知, 伊江管道穿越处主要安全隐

患为江心岛管道穿越处岸线消退和河床的垂直及横向下切, 其地质灾害风险高^[9]。此外, 江心岛洲头部位消退程度严重, 伴随长期演化其影响范围可扩展至管道穿越处, 江心岛洲头冲蚀进深演化情况见表 1。江心岛周边浅滩侵蚀, 导致管道上方覆层逐渐降低, 若不加防护, 会加剧河道变化和江心岛退化程度, 进而影响穿越处管道正常运营。

表 1 江心岛洲头冲蚀进深演化情况

年份	2007—2010	2010—2014	2014—2016	2016—2018	2018—2021	2022
冲蚀进深/m	426	227	59	387	415	326

3 治理方案

伊洛瓦底江油气管道穿越处河段的河道变迁明显, 江心岛受侵蚀作用面积缩减, 且持续后移。受限于工程规模、周期等因素, 管道穿越处位置不宜变动, 因此选取治理河道, 修建护岸等工程措施, 以维持江心岛稳定, 保障管道穿越工程安全性。伊江河段的综合治理可以按两个阶段划分: 第一阶段是针对单项突出问题的工程治理, 主要是对江心岛护坡工程的修建及加固; 第二阶段在总结已有工程经验、效果的基础上, 确定以调节水流、加强护岸的综合治理方式保障江心岛不受侵蚀, 迫使主河道向东岸转移, 消除穿越段油、气管道的悬空危险。

管道穿越工程完成后, 受主流摆动影响江心岛岸被持续冲刷, 侧向侵蚀严重^[10]。2011 年江心岛岸线发生第 1 次消退, 在穿越处消退近 46 m, 附近浅滩大面积减少, 如不阻止此趋势, 随岸线后退和河床下切发展, 下降段管线易出现悬空现象, 存在严重安全隐患。自 2011 年汛后, 为提高江心岛岸坡抗冲刷能力, 维持江心岛稳定, 开始在江心岛管道穿越处附近开展护岸工程, 并依据水情变化调整护岸形式和布置范围, 延缓岛岸线消退趋势, 避免河床侧向侵蚀及下切, 护岸布设位置见图 2a)。2011 年在江心岛管道穿越处附近共布设 185 m 长膜袋混凝土护岸, 坡脚处设置钢筋石笼, 以避免崩岸现象发生^[11], 见图 5。2011 年汛

后至 2015 年汛前期间, 膜袋混凝土护岸有效维持了管道穿越处的岸坡稳定。2015 年汛期部分混凝土护岸垮塌, 汛后以铅丝石笼护坡简易修复了损毁的膜袋混凝土护岸, 新式护岸结构性增强, 见图 6。2016 年汛期原膜袋混凝土护岸完全垮塌, 汛后对垮塌部分进行恢复, 铺设 110 m 石笼护坡连接 2015 年汛后护岸工程, 形成完整防护体系。2017 年汛后在下游冲毁处新建 200 m 护岸与已有工程衔接, 沿用 2016 年所用护岸形式, 在护岸外围打入钢轨和混凝土预制桩, 见图 7。江心岛岸线在 2018 年汛期平稳度过, 汛后开始分期向上游延长护岸长度, 以每年不低于 100 m 的长度向上游延伸, 连续实施 3 a。

自膜袋混凝土护岸塌陷后, 即采用石笼护坡围绕管道穿越处逐段进行施工, 管道穿越处附近岸坡形成完整刚性护岸防护体系, 有效缓解了河道下切和岛岸线消退, 2015—2018 年汛后的护岸布置分布见图 8。

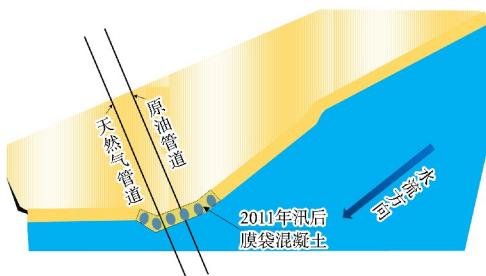


图 5 2011 年汛后护岸布设

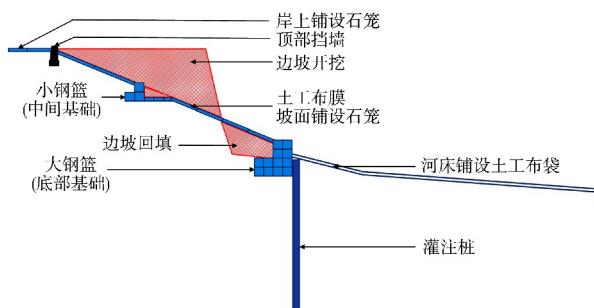


图6 石笼护岸结构形式

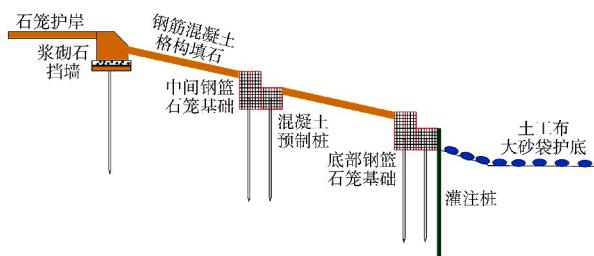


图7 2017年护岸结构形式

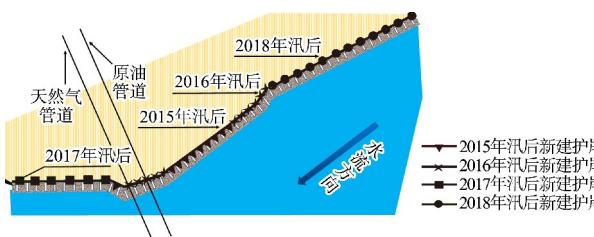


图8 2015—2018年汛后护岸布设

第二阶段整治工作采取“调节水流、加强护岸、落淤护滩、保江心岛、消除悬空、持续监控”的治理原则, 对不同部位存在的问题进行系统治理, 其主要工作可分为3方面: 1) 穿越处附近护岸加固; 2) 通过人工干预减缓主河道向江心岛侧的偏移趋势; 3) 江心岛洲头治理。

河道变迁是江心岛退化的主要因素, 随时间推移, 主河道东侧深沟自然填埋, 河床升高, 西侧河床侧向侵蚀和下切严重, 为延缓江心岛退化趋势, 在治理护岸的同时, 通过修建丁坝、河道疏浚及抛沙回填等方式改善河道形态, 以达到减缓水流速度和分流的效果^[12], 降低河流对江心岛侧河岸的冲刷强度。2016年汛后在上游设置4道丁坝群; 2017年汛后设置6道丁坝群, 并在上游第1道丁坝群外加设过滤桩, 形成逐级保护, 加大落淤和挑流范围; 2019年在洲头附近加设5道挑流丁坝; 2020年汛前在原洲头挑流坝处增设6道

长度为34 m的挑流坝, 上游侧增设透水丁坝。除加设丁坝外, 自2016年汛后开始对河道进行抛沙回填工作, 一方面利用耙吸船将东岸侧河道中的河沙转移至露管处深坑; 另一方面对江心岛侧的深坑直接回填, 以增加管道上方的覆层厚度。

伊江管道穿越工程所面临的主要安全风险为穿越处附近岛岸线消退和河床侵蚀下切, 但随着其洲头部位的长期消退, 江心岛自洲头到两侧岸线发生了较大幅度的冲刷, 且逐渐逼近管道穿越处。为保障江心岛洲头退化控制在安全范围内, 2017年汛后在洲头位置新建488 m木桩护岸, 2019年增修护岸803 m。2020年汛期岔河一侧水文地质条件发生较大改变, 洲头位置遭受严重冲刷, 见图9。2021年汛前沿原岔河洲头冲毁岛岸线进行半刚性护岸建设, 坡面分为三级, 为斜面-平台-斜面形式, 护岸总长2 072 m, 半刚性护岸由木桩横梁结构连接, 表层覆盖土工布, 上压土工袋, 坡脚设置钢管桩护岸, 内部填充土工布袋作为压脚, 其结构形式见图10; 沿原岔河洲头冲毁岛岸线布置14道半透水丁坝, 共计1 317 m; 在14道半透水丁坝首尾布置2道透水丁坝, 江心岛前方布置3道透水丁坝, 共计1 218 m。2022年汛前在洲头岔河凹岸处新建简易护坡780 m, 并在简易护坡上、下游分别做20 m削坡, 其结构见图11。



图9 江心岛洲头演变及汛后治理

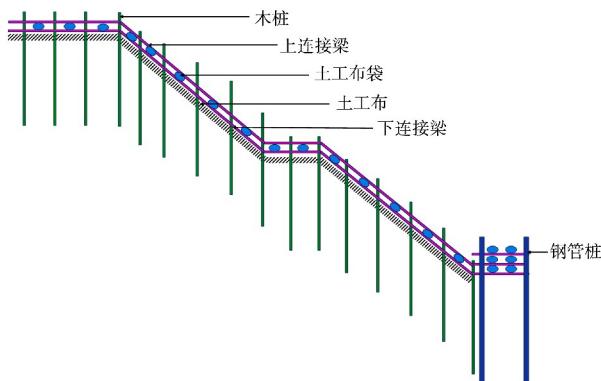


图 10 半刚性护岸结构形式

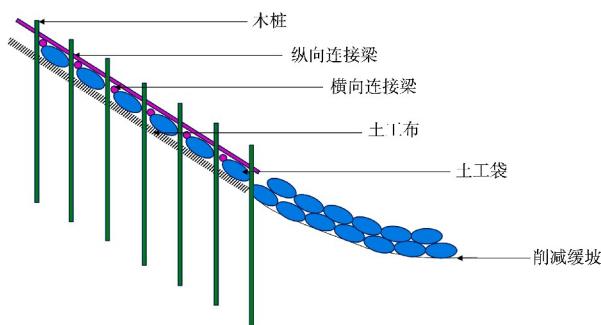


图 11 简易护坡结构形式

4 治理成效分析

膜袋混凝土护岸形式确保了 2011 年汛后至 2015 年汛前的伊江穿越护岸保持稳定，未发生护岸大面积垮塌事件，对维持管道正常运行起到了预期效果。但因河道变迁对江心岛岸处的冲刷侵蚀作用越来越强，兼之膜袋混凝土结构偏弱，与土质岸坡衔接部位未做到有效防护，且岸坡土质多为砂土和强风化砂岩，抗侵蚀能力差，受到水流冲刷时不断消退可使护岸工程因基础失效成为悬空状态，引起塌陷^[13-14]。随时间推移膜袋混凝土护岸工程作用逐渐降低，自身安全度下降。直至 2015 年时膜袋混凝土护岸部分垮塌，2016 年汛期过后，穿越处膜袋混凝土护岸完全垮塌，致使管道穿越处岛岸线消退 13 m，河床横向侵蚀现象未得到完全遏止。

自 2017 年开始，伊江河道展开综合治理。在护岸形式更换为结构性较好的石笼护坡以后，确保了 2017 年汛期管道穿越处的岛岸线稳定，仅发生了局部少量坍塌，其整体性和可靠性较之膜袋混凝土明显提高。2018—2021 年，在汛期周期内，

管道穿越处护岸均保持完好状态，岸线保持稳定，效果明显。

关于河道治理工程主要采取了“束水冲沙、落淤护滩”的治理方案。自 2016 年起沿主河道西岸即开始布设透水性木桩丁坝群，并根据汛后情况进行修复和扩建，当汛期水流通过丁坝时，动能损失，流速下降，所携带泥沙淤积于丁坝前后，随时间推移逐渐形成浅滩^[15]，而底部浅滩初步成型后阻碍水流行进，反过来加速浅滩形成。丁坝群将高速水流挑至河道中心，在限制河道游荡摆动、护岸固滩、稳定河势、束水冲沙等方面起到了积极作用^[16]，使伊江穿越处上游形成稳定的河床。2017 年汛期过后，2016 年所设丁坝附近的外围浅滩产生明显淤积，自 2011 年在管道上游浅滩全部消失之后，首次重新出现淤积；2018 年回淤面积增加，其外围浅滩逐渐扩大，随护岸工程一起发挥综合作用，削减了水流对江心岛岸线的破坏。至 2021 年汛期后，河床整体淤积范围扩大，从江心岛侧至东岸侧回淤厚度逐渐加厚，江心岛侧得益于丁坝及上游水流夹砂未发生冲蚀情况，在汛期原管道穿越处深冲沟逐步实现回淤。

通过建设丁坝群、抛沙回填等措施，河道的综合治理起到了良好效果，穿越处管道安全性也大大提高。2019—2022 年汛期露管范围变化见图 12，经过历年工程建设，露管长度总体上呈逐渐下降趋势，至 2021 年后，已完全消除露管现象。其中，2022 年汛期内虽有 10 m 左右管道再次出现悬空，但之后的监测显示管道上方覆层厚度随时间增加而加深，露管现象自行消除，其汛期露管变化见图 13。

经长期治理，主河道江心岛侧穿越处附近的埋管环境虽大为改变，在汛期已基本消除露管现象，但江心岛洲头治理效果并不明显。由图 1 可知，江心岛头部冲蚀最为严重，河道进水宽度增加，其冲蚀趋势可大范围蔓延至管道穿越处附近，可能造成护岸损毁，致使江心岛穿越处陆地段埋管露出。如无人工干预情况下，其变化范围预计见图 14。

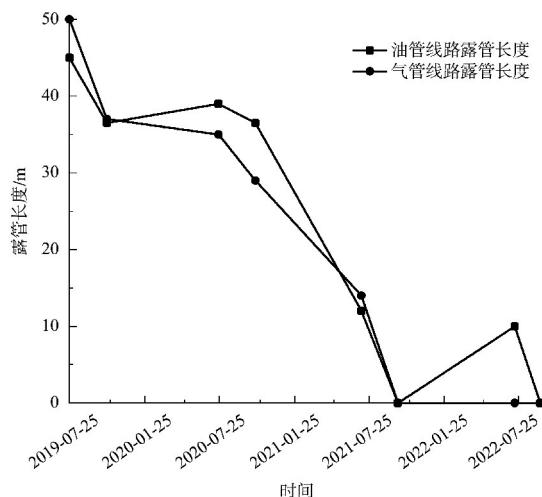


图 12 汛期露管长度变化

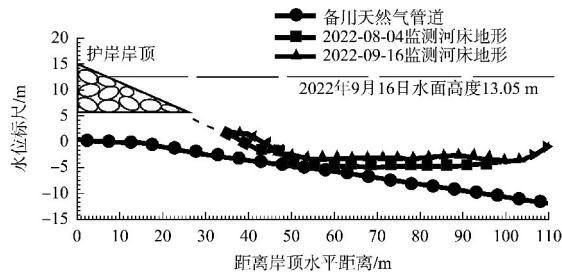


图 13 伊江主河管道监测



图 14 预测的江心岛冲蚀退化平衡状态

洲头部位自 2017 年汛后即建设了大规模木桩护岸, 但 2020 年汛期因上游地形改变, 洲头来水方向发生较大变化, 岔河内江心岛一侧缺乏防护, 上游来水对其产生了显著侵蚀, 洲头部位受冲蚀严重。2021 年开始对洲头侵蚀退化进行 2 期防护治理, 通过半刚性护岸整治, 汛期过后河岸岸线消退较少, 基本保持汛前状态, 但是半刚性护岸完全损毁长度达 482 m(洲头部分), 岔河顺洲头开始沿河岸发生不同程度的冲蚀, 冲蚀长度近 1 600 m, 冲蚀进深 3~15 m 不等; 2022 年汛后洲头迎水面冲蚀面积超 31.0 万 m², 正面进深为 326 m, 冲蚀宽度为整个洲头迎水面及江心岛岔河一侧, 紧邻

2022 年治理施工区域下游发生冲蚀, 冲蚀岸线长度为 1 135 m, 最大冲蚀进深为 129 m。简易防护工程所在区域为经受冲蚀最强烈的区域, 在汛期以受损毁为代价, 延缓洲头本身受冲蚀程度, 形成挑流以间接保护下游岛岸线。但是洲头及洲头西侧岸线退化速度快, 仍需要进行重点治理。

5 治理经验

伊江管道穿越处河段通过 2011 年至今的整治工程实施, 基本达到了预期的治理效果, 保证了油气管道正常运行, 积累了一些宝贵的治理经验。

1) 把握工程主要安全风险。伊江管道穿越工程所面临的主要安全风险主要为 4 方面, 分别为穿越处附近岛岸线消退、穿越处附近河床下切和侧向侵蚀、江心岛洲头岛岸线消退和河道内浅滩消退。其中前两者为直接影响, 可使穿越处附近岸坡土体发生崩岸或消退, 增加油气管道暴露风险; 后两者为间接影响, 洲头岛岸线消退后河道进水口宽度增大, 经长期演变后可逐渐影响至穿越处附近, 对岛内埋管产生威胁; 浅滩消退可减少管道上方覆盖层, 加速河床侵蚀。

在治理前期, 穿越处附近的岛岸线稳定为主要安全风险, 自 2011 年起, 通过对穿越处附近岸坡进行护岸施工, 配合后期在主河道内展开河道治理工作, 管道穿越处附近岸线通过人工干预已基本保持稳定。但江心岛洲头部位的消退趋势对管道穿越的威胁日益增加, 因洲头为江心岛迎水部位, 受冲蚀程度强, 且上游水情复杂, 通过护岸和丁坝群尚难以使洲头部位岛岸线保持稳定。

2) 准确把握管道工程与河势变化的关系^[17]。伊江管道穿越工程附近主河道东侧受支流变化影响, 淤积程度逐渐提高, 迫使河道向西侧转移, 江心岛岛岸受河流冲刷侵蚀作用, 逐渐进入退化期。2011 年为保障油气管道安全, 紧急对江心岛穿越处岸坡铺设混凝土膜袋, 但并未整治外围浅

滩消退趋势，致使主河道持续向西岸迁移，护坡工程在水流冲刷作用下于 2016 年汛期完全垮塌。后经在主河道实施河道整治工程，护坡工程达到动态稳定状态，消除了露管现象，总体整治效果达到基本目标。

3) 伊江治理是一个长期系统治理工程。伊江治理需合理调配工期，依据不同阶段水情变化选择主要治理对象。治理初期因穿越处附近岛岸线不断消退，管道面临露管风险，治理工作重心是维持管道穿越处附近岸坡稳定。实施护岸工程后为减小水流冲刷，减缓河床下切和侧向侵蚀趋势，其工作重心是通过“束水冲沙、落淤护滩”对主河道开展治理，迫使主河道向东迁移。定期人工干预保持主河道和穿越处岛岸线相对稳定，之后转为洲头防护治理，以期为后续治理赢得时间。

4) 因地制宜合理选用材料，制定河道治理方案。在伊江河道治理过程中，2011 年所铺设混凝土膜袋适用于短期内大规模施工，后续工程所采用的石笼护岸多选用当地材料，以木桩和石材为主，便于收集和快速施工，同时提高了结构整体性，满足防护要求；所设丁坝群以棕榈树桩为主要材料。结合实际情况合理选材，一方面可有效缩短工期，降低工程投入，避免因工期过长而致使河道环境再次恶化，增加整治难度和管道穿越风险；另一方面在后续维护中便于改进。从工程效果而言，相关整治建筑物在已建工程和河势的动态变化中保持相对稳定。

6 结论

1) 近年来管道穿越处附近的伊江河段的主河道由东岸向西岸迁移，受主流摆动和水流冲刷侵蚀作用，江心岛岸线消退，西岸处河床下切现象严重，伊江主河与岔河河道进水口宽度增加，下游冲刷强度加强。

2) 伊江治理过程通过铺设护岸工程以维持江心岛岸线稳定，实践表明以铅丝石笼护坡为主体结构的刚性护岸可有效避免西岸水流对江心岛岸

的侵蚀下切，岛岸线稳定方面较单一膜袋混凝土护岸方案好。此外，在洲头及两岸沿线加设丁坝群，起到挑流分水和加速淤积作用，配合人工挖沙填埋改善主河道形态，可迫使主河道向东岸迁移，以降低江心岛退化趋势。该方案改善河道演变特征，增加了埋管覆层深度，减小露管风险。

3) 江心岛洲头位置受冲刷严重，消退速度远大于其他部位。岔河来水量增大，原有木桩护岸，半刚性护岸等护岸形式不适宜在洲头大规模铺设，在凹岸段铺设简易护岸，以护岸损毁为代价延缓洲头受冲蚀程度的做法，可为后续治理争取时间，总体效果较好。

参考文献：

- [1] 唐洪武,肖洋,袁赛瑜,等.平原河流水沙动力学若干研究进展与工程治理实践[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):414-423.
- [2] 吕丽君,李振青,刘小斌.长江马鞍山河段河道演变及整治研究[J].长江科学院院报,2009,26(12):13-16.
- [3] 余国安,王兆印,张康,等.应用人工阶梯-深潭治理下切河流—吊嘎河的尝试[J].水力发电学报,2008,27(1):85-89.
- [4] 王致维.三峡水库运行后长江中下游分汊河段航道治理[J].水运工程,2023(1):143-151.
- [5] 闫霞,陈立,姚仕明,等.2018 年度长江上游航道维护性疏浚工程后评价[J].水运工程,2021,(3):132-137.
- [6] 何用,吴尧,卢陈.珠江河口演变与治理保护探讨[J].泥沙研究,2022,47(6):1-8.
- [7] 郭守德,王强,林影,等.伊洛瓦底江管道穿越处风险评价及治理[J].油气储运,2019,38(8):949-954.
- [8] 刘锋,赵越,宋立才,等.伊洛瓦底江上游水系形成时代研究:以滇西龙川江为例[J].中国地质,2015,42(1):199-206.
- [9] 周志维,马秀峰,喻蔚然.土石坝防洪风险等级划分与风险评价[J].中国水能及电气化,2018,165(12):46-49.
- [10] 朱玲玲,陈迪,葛华.长江中游主流摆动效应研究[J].泥沙研究,2014(1):21-26.

(下转第 125 页)