

河道水下地形重构与底泥精准治理技术研究

薛彦超

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：河道水下地形重构与底泥精准治理技术作为河道生态修复中的重要技术，其能够有效提升生态修复的效能。其中，水下地形重构主要利用多波束测深技术、地理信息系统（GIS）数据处理技术等技术精准呈现河床地貌和淤泥分布；欧蒂尼精准治理则是利用原位与异位处理路径，通过水下清淤设备完成对污染底泥与砂石的精准分离，然后再通过进一步处理达成污染处理和资源化利用的目的。文章对河道水下地形重构与底泥精准治理技术的原理以及适用范围进行总结分析，并结合工程实例，系统分析相关技术在应用中的工艺技术要点，并指出技术中的关键注意事项，以供参考。

【关键词】：河道治理；水下地形重构；底泥精准治理；多波束测深；生态清淤

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.014

引言

河道作为水生态系统中最为重要的一部分，河道的行洪能力和水质状况与区域生态环境以及周边居民的生活密切相关。然而河道在长期运行过程中，经常会出现淤积导致行洪不畅、底泥污染物释放造成水质恶化等问题，影响河道生态功能。然后传统河道治理技术，由于地形数据精度不足、底泥治理效率低且易引发二次污染等问题，难以获得良好的治理效果。基于此，本文重点围绕水下地形重构与底泥精准治理技术展开相关研究，对技术的原理、适用范围以及工艺细节及注意事项进行了全方位的总结分析，以期研究成果能够更好促进河道生态修复工作的开展。

1 河道水下地形重构与底泥精准治理技术的概述

1.1 水下地形重构技术

水下地形重构技术主要是利用多波束测深技术与智能算法来精准获取水下地形数据。由于测量船上搭载的换能器阵列同步发射多个波束，形成扇面状覆盖^[1]，这样就能够实时采集宽幅水下地形信息，测量精度一般情况下能够达到厘米级。在完成数据的采集处理后再利用地理信息系统（GIS）软件对采集到的离散数据进行网格化处理，之后再通过克里金插值、反距离加权等算法，就能够构建出河底三维数字高程模型（DEM），直观呈现水下地形地貌特征^[2]。

水下地形重构技术广泛适用于河道、湖泊、水库、海洋等不同场景的水下地形测绘，在河道治理项目中，通过多波束系统全面扫描目标水域，能够精准识别河道淤积区域，为清淤工程提供精确的工程量数据；而在航道规划中则可以清晰呈现河床起伏及障碍物位置，为航线设计提供有效帮助。

1.2 底泥精准治理技术

底泥精准治理是利用原位处理与异位处理相结合的方式，完成对河道污染底泥的高效治理和资源化利用。其中，原位处理是利用淘洗式生态清淤系统淘洗河底污泥，将砂石与污染底泥进行精准分离。在作业中，其主要利用机器人完成相关淘洗作业，由于作业机器人中搭载有高压喷漆和真空吸盘装备，并且配置有传感器，所以在作业过程中，机器人能够自动调整作业的强度和吸排速度，在不破坏水体生态平衡的前提下完成对污染底泥的清理^[3]。而异位处理是利用将底泥输送至处理场地后，利用湍流剪切力设备搅拌分离底泥，之后通过振动筛、旋流器等设备，将底泥颗粒按照粒径大小进行分级，从而形成无机大颗粒覆盖层，有效隔离底泥中的污染物，提升水体透明度。而分离出的污染底泥，则通过固化技术，在污染底泥中加入一定比例的水泥粉煤灰等固化剂，将污染物固化；也可以利用发酵工艺，通过在污染底泥中加入微生物菌剂实现对其中污染物的降解，并将其制成工程骨料、营养土等材料，从而实现污染底泥的资源化利用。底泥精准治理技术能够用于各类污染水体的底泥治理，比如城市黑臭水体、富营养化湖泊、工业污染河道等治理工程中均可获得良好应用效果。

需要注意的是，在底泥精准治理技术应用前，相关技术人员必须做好对底泥的污染状况、分布范围、厚度等相关信息的详细调查分析，以此为基础制定相应的技术方案^[4]。而在水下原位处理过程中，必须做好对机器人作业范围和强度的有效控制，避免因过度淘洗导致底栖生物栖息地破坏，同时还需要实时监测作业区的水质变化，如果水质变化过大，则必须及时调整作业参数；而在异位处理则必须做好底泥运输管理，避免在转运过程中出现渗漏一洒问题，以免造成二次污染。

2 河道水下地形重构与底泥精准治理技术的应用分析

2.1 工程概况

某县某河道中支全长 11.54 公里,流域面积 52.3 平方公里。长期淤积导致河道行洪能力下降,底泥污染物释放使水质长期处于 IV 类以下。工程目标为恢复河道生态功能,提升防洪标准至 50 年一遇,同步实现底泥减量化与资源化。

2.2 技术应用方案分析

针对 11.54 公里城市河道的复合型淤积与污染问题,项目组依据防洪标准提升至 50 年一遇的刚性需求,通过水力模型演算明确需将河道过水断面面积扩大 18.2%,基于该目标,将项目分解为以下三部分。

第一,水下地形重构。通过多波束测深系统对涉及河道区域进行全段扫描,生成 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 网格精度的数字高程模型 (DEM)。模型重点标注三类关键区域:重度淤积区(淤泥厚度 $>1.2\text{m}$)、障碍物富集区(暗礁密度 ≥ 3 处/km)及生态敏感区(底栖生物覆盖率 $>40\%$),淤积量测算误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。

第二,采用污染指数法划分治理单元。基于底泥采样数据(每 200m 布设 1 个采样点),将河道划分为三个治理等级:轻度污染区(重金属含量 $<$ 风险筛选值 70%)、中度污染区(有机质含量 6%~8%)及重度污染区(氨氮释放速率 $>2\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。差异化匹配治理工艺:轻度区实施原位淘洗(作业强度 $\leq 200\text{m}^2/\text{h}$),中度区采用薄层抽吸(清淤厚度 $0.25\text{m} \pm 0.05\text{m}$),重度区启动异位分级处理(固化剂掺量 $\geq 15\%$)。

第三,底泥资源循环利用。根据底泥组分检测结果(砂石占比 32%、粘粒占比 41%),设计了三条资源化利用路径:砂石骨料用于堤防加固(转化率 45%);固化土制备生态护坡砖(转化率 25%);有机质发酵生成营养土(转化率 30%)。

同时考虑到空间分布特点对原位清洗设备和异位处理站的位置进行了优化,原位清淤设备部署在水深 4~6m 的河道弯道区(流速 $0.8 \sim 1.0\text{m}/\text{s}$),异位处理站设在 3.2km 处废弃滩地,运输半径压缩至 1.5km 以内。

2.3 施工工艺分析

2.3.1 多波束测深流程

多波束测深是获取高精度水下地形数据的关键技术,其流程严谨且环环相扣,确保数据的准确性与可靠性。

(1) 设备校准为保证测量精度,需在静水区开展声呐参数标定工作。测量团队选定长 200m、宽 50m 的矩形静水区(水

深 $4.5\text{m} \pm 0.2\text{m}$,坡度 $\leq 2.8^\circ$),按网格状布设 6 个不锈钢校准靶标(直径 1.2m,已知高程误差 $\pm 1\text{cm}$)。校准过程分三步实施:首先通过声速剖面仪(CTD)每 10 分钟采集水温、盐度数据,动态生成声速修正模型;其次利用靶标回波信号调整换能器阵列的发射角($120^\circ \pm 0.5^\circ$);最后通过船体姿态模拟平台验证横摇 $\pm 8^\circ$ 、纵摇 $\pm 5^\circ$ 工况下的测深稳定性。校准后系统误差从 $\pm 5\text{cm}$ 降至 $\pm 1.8\text{cm}$ 。

(2) 航线规划:航线规划采用"主测线+检查线"双网加密模式:主测线沿河道中心线平行布设(间距 18m,为扫宽 45m 的 40%),检查线按 15° 斜交角布设(密度达主测线 20%)。针对河道突变区(宽度变化 $>30\%$ 、曲率半径 $<50\text{m}$),增设环形闭合航线(半径 20m,重叠率 60%)。规划后测量覆盖率达 100%,重复探测点占比 35%。

(3) 数据采集。测量船以 $1.48 \sim 1.52\text{m}/\text{s}$ 航速匀速航行,每 200 毫秒采集 1 组数据包(含 256 个波束测深值、姿态仪三轴角度、GPS 定位信息)。同时为了更加精准检测吃水变化,在船首尾安装了压力式水位计,并配合加速度计能够消除波浪引起的船体垂荡影响,提高数据采集精度。

(4) 后处理。在该环节需要先利用潮位改正算法,消除水位变化对测量深度的影响,然后再通过曲面滤波算法去除数据中的噪声和异常值,最终生成数字高程模型 (DEM)。

2.3.2 生态清淤工艺

生态清淤工艺通过预处理、分层开挖、底质保护等环节,在去除河道淤泥的同时保护生态环境。以下将围绕每个环节的作用,详细阐述具体做法和技术要点。

(1) 预处理。预处理作为生态清淤的前置环节,主要是通过物理隔离与污染防控技术,将清淤作业对周边生态的扰动降至最低。在作业中,需在疏浚区上下游及两侧按间距 5~10 米布设生态围隔,围隔采用聚丙烯纤维与生态胶黏剂复合材质,该材质具有良好的透水率,并且还能够截留 90% 以上粒径大于 $50 \mu\text{m}$ 的悬浮物。同时还需要在围隔底部设置可调节高度的配重基座,确保围隔的稳固性,避免淤泥扩散对非疏浚区域的生态污染。

(2) 分层开挖。施工中采用绞吸式挖泥船进行分层开挖作业,单次疏浚深度严格限制在 0.2~0.3 米区间,通过多船协同作业,以平行推进或阶梯式开挖方式,分 5-8 层完成淤泥清除。此外,在开挖边坡设置倾斜度监测装置,实时控制坡比在 1:2-1:3 之间,控制边坡稳定性系数不低于 1.2,以防止坍塌风险。

(3) 底质保护。底质保护能够有效保留原生底泥生态功

能,维持河道生态系统完整性。在淤泥清除阶段,需要在预留的底泥层喷洒生物修复剂,具体剂量可以按照 $1\sim 2\text{kg}/\text{m}^2$ 的剂量均匀施加复合微生物菌剂和腐植酸(浓度 $3\sim 5\text{g}/\text{L}$),以此来提升有机质分解转化率^[5]。同时,还需要在保留底泥区域设置生态浮床,种植芦苇、菖蒲等水生植物,有效改善底泥微环境。

3 技术应用中的注意事项

3.1 生态保护与监测评估

为降低施工所产生的生态扰动,在项目建设中必须形成全生命周期的动态保护机制。首先,在施工前需要先做好水生生物本底调查,绘制鱼类栖息地、洄游路线图,避免施工影响鱼类繁殖洄游。同时,还需要在施工区域部署水质传感器,做好pH、溶解氧、氨氮等指标的监测,并配合多波束测深仪及底泥浊度监测设备采集到的结果对区域生态环境进行实时监测,如果某项指标超过预警值,必须及时找出异常原因并采取有效的措施,确保区域水生态环境安全。

3.2 底泥资源化利用管理

底泥资源化利用必须遵循减量化、无害化和资源化原则,在底泥处理前需要先做好底泥中重金属、有机质等的检测,按照土壤污染风险管控标准,对企业进行分级,如果底泥中的重金属或者有机质含量超标,可以采用化学药剂固化和高温热解的复合处理工艺对其进行有效处理,并且处理后的样品必须经检测金属浸出浓度低于风险筛选值,才可进入资源化利用环

节。资源化产品也必须经过相应的指标检测,经检测合格才能够用于循环利用。

3.3 施工安全与风险防控

针对水域施工的高风险特性,但是施工中需要从技术和人员两方面入手做好安全管理。第一,作业船需要配置北斗定位系统与 360° 声呐避障装置,以便于在作业期间能够实时识别障碍物距离,当障碍物小于5米时,能够自动触发警报,避免出现安全事故。第二,完善应急预案。针对极端天气、设备故障、人员落水等各类突发场景制定针对性的应急预案,并定期进行演练,同时在部分危险施工前必须提前做好安全技术交底,确保所有施工人员都能够掌握相关技术要点,增强施工人员的安全意识。第三,水深超过15米的深水区,在作业中需要额外配置辅助保障船,主船负责疏浚挖掘,辅船提供物资补给、设备抢修及应急救援支持,为施工作业提供连续安全保障。

4 结论

通过河道水下地形重构与底泥精准治理技术,能够精准高效完成对河道底层污染的治理,改善生态环境。但是在具体应用中必须做好对河道实际情况的勘察调研,明确河道治理的关键和重点,制定有针对性的技术方案,并加强对各施工工艺的有效控制,以此来确保治理目标的实现。同时随着智能化技术、数字化测量技术的发展,在今后河道水下地形重构与底泥治理中应进一步探索数字化测量技术、人工智能技术的融合应用,不断提高测量的精度和治理的效率。

参考文献:

- [1] 董营营,杜相波,杨森,等.基于宽孔径双频多波束声呐的水下地形3D重构[J].广东水利水电,2023,(06):82-88.
- [2] 邓豪,肖欣政,吴宇峰.基于ADCP水深数据的水下地形重构方法[J].测绘,2025,48(02):103-107.
- [3] 张华俊,张文磊.贵州省污染河流底泥治理现状及原位修复研究[J].中国资源综合利用,2025,43(01):183-186.
- [4] 刘玉佳.水环境治理工程中的内源治理技术要点探究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(11):116-118.
- [5] 徐一尧.疏浚底泥的原位生态护岸技术在河道治理中的应用研究[J].城市道桥与防洪,2025,(05):192-196.