

# 气候变化背景下港口航道泥沙淤积预测与疏浚优化策略

豆异敏

交通运输部广州打捞局 广东 广州 510220

**摘要:** 作为全球贸易的关键节点,港口航道的安全、高效运行直接关系到国家经济命脉。泥沙淤积是影响港口航道通航能力的核心问题之一。在气候变化的驱动下,海平面上升、极端天气事件频发、流域水文情势改变等因素共同作用,使得泥沙输运过程变得更加复杂、不确定且难以预测。传统的淤积预测模型与疏浚管理策略已难以应对这一新态势。本文旨在系统探讨气候变化对港口航道泥沙淤积过程的影响机制,评估现有预测模型的局限性,并在此基础上,提出一套融合多源数据、先进算法与适应性管理理念的淤积预测与疏浚策略优化框架。研究强调,未来港口航道管理必须从被动响应转向主动适应,通过构建“感知-预测-决策-反馈”一体化的智能疏浚体系,提升港口在气候变化背景下的韧性与可持续发展能力。

**关键词:** 气候变化;港口航道;泥沙淤积;数值模拟;机器学习;疏浚优化

## 引言

港口作为海陆枢纽,在全球供应链中地位关键,超80%国际贸易量靠海运完成,航道设计水深对船舶安全通行意义重大。但自然力与人类活动致航道泥沙淤积,威胁航行安全,港口需投入大量资金疏浚。21世纪,气候变化不可逆转。IPCC报告显示,全球平均海平面加速上升,极端天气增多,降水格局改变,干扰了河口海岸带泥沙动力学平衡。海平面上升改变潮汐棱体、增强潮流动力;极端风暴搅起海底沉积物并长距离输运;流域降水变化影响入海径流量与输沙量。这些新变量使淤积更具非线性、突发性和长期趋势性,给传统预测和规划带来挑战。当前港口疏浚管理存在“重工程、轻预测”“重经验、轻数据”问题,估算淤积量依赖历史统计,疏浚作业模式单一,成本高、效率低。在多重压力下,需发展智能化淤积预测与疏浚策略优化方法。本文将梳理影响路径、分析模型不足、提出综合框架、探讨实践应用并展望未来方向。

## 1 气候变化对港口航道泥沙淤积的影响机制

### 1.1 海平面上升的直接影响

海平面上升影响深远复杂。航道设计水深以固定基准面为参照,海平面抬升使有效水深减少,形成“被动淤积”效应,提高疏浚频率和强度。它还会淹没近岸浅滩,扩大纳潮水域,增强潮流动力,在流速骤减区域促使悬浮泥沙沉降,形成淤积热点。此外,水深增加使波浪破碎点向岸推移,波浪与潮流耦合增强底床剪切应力,诱导复杂淤积形态,威胁航行安全。

### 1.2 极端天气事件的冲击

热带气旋、强温带风暴等极端天气事件强度、频率

和路径变化,对港口航道构成短期破坏性冲击。强风暴伴随的异常高潮位虽能暂时增加航道水深,但其强大波浪能量会大规模重新悬浮海底沉积物,风暴过后泥沙快速沉降,形成突发性、高强度的“风暴淤积”,单次淤积量常超常态<sup>[1]</sup>。同时,局地短历时强降雨加剧,对河口型港口,强降雨引发流域性洪水,将泥沙以脉冲形式输入河口,在航道入口等缓流区大量落淤,形成另一种突发性淤积。这两种淤积模式打破传统管理逻辑,考验港口应急响应和长期规划能力。

### 1.3 流域水文情势改变的长期效应

全球变暖改变大气环流和水循环模式,影响大河流域水文情势,通过河流-河口系统传导至港口航道泥沙平衡。一方面,上游水利工程建设拦截入海泥沙,减轻航道淤积压力,但气候变化引入不确定性,干旱致植被退化、土壤抗蚀力下降,后续暴雨可能产生高瞬时输沙率,长期减少与短期激增叠加,使入海泥沙通量预测困难。另一方面,气候变化改变径流季节分配规律,如冰川融水补给型河流径流峰值提前,雨季时间漂移,打乱泥沙输运季节节律,使疏浚计划和窗口期失效,增加疏浚作业盲目性。

### 1.4 综合效应与非线性反馈

气候变化驱动的各因素并非孤立,通过非线性相互作用和反馈机制共同塑造港口航道泥沙环境。如海平面上升放大风暴增水对航道的影 响,风暴事件造成的地形重塑改变潮流和波浪场结构,影响后续泥沙输运和淤积位置,形成新的动态平衡点。这种多层次、跨尺度耦合效应使港口航道泥沙系统成为复杂非线性系统,未来状态充满不确定性,传统预测与管理方法难以应对,需发

展新一代综合应对策略。

## 2 现有淤积预测模型的局限性与挑战

### 2.1 经验统计模型的失效

长期以来,许多港口依赖于基于历史疏浚量数据的经验统计模型来估算未来的淤积量。这类模型通常通过回归分析建立淤积量与少数几个易于观测的环境因子(如年均风速、年径流量)之间的经验关系。然而,这种方法的根本缺陷在于其对历史数据统计规律的过度依赖。当气候变化驱动系统进入一个全新的状态空间——例如遭遇前所未有的超强台风、或面临远超历史记录的海平面上升速率时,模型所依据的历史相关性将不复存在,其外推预测结果必然严重失真。更重要的是,经验模型本质上是一种“黑箱”操作,它无法揭示泥沙输运背后的物理机制,既不能解释淤积发生的内在原因,也无法对未曾发生过的管理情景(如不同疏浚方案或工程措施的效果)进行可靠的模拟和评估,极大地限制了其在前瞻性规划中的应用价值。

### 2.2 传统数值模型的瓶颈

基于物理过程的数值模型,如Delft3D、MIKE系列等,通过求解描述水流、波浪及泥沙运动的基本控制方程,能够较为真实地再现复杂的泥沙输运过程,是目前淤积预测领域较为先进的工具。然而,在应对气候变化这一充满不确定性的背景时,这些模型同样面临着难以逾越的瓶颈。首先,模型的预测精度极度依赖于精确的边界条件和初始条件,而气候变化恰恰使得这些关键输入(如未来几十年的上游流量与含沙量过程、开边界的潮位序列、风场特征)充满了巨大的不确定性。使用单一的、确定性的未来情景进行模拟,其结果的参考价值十分有限<sup>[2]</sup>。其次,模型在时空尺度上存在天然的冲突。要准确捕捉台风等极端事件对淤积的瞬时、剧烈影响,需要极高的时空分辨率,这带来了巨大的计算成本;而要评估海平面上升等长期趋势的累积效应,则需要进行跨越数十年甚至上百年的连续模拟,同样对计算资源构成严峻挑战。如何有效地耦合不同时间尺度(小时级的风暴事件与百年级的海平面趋势)和空间尺度(全流域水沙过程与局部航道精细地形)的模拟,至今仍是技术上的难题。此外,现有模型对一些关键物理过程,如细颗粒泥沙在咸淡水交汇区的絮凝沉降机理、生物膜对床床稳定性的增强作用等,其数学描述仍显简化,这在复杂的河口环境中可能导致对淤积形态和速率的系统性偏差。

### 2.3 数据驱动模型的机遇与挑战

近年来,以机器学习和深度学习为代表的驱动

模型为淤积预测开辟了新的路径。这类模型能够从海量、多源的观测数据中自动挖掘变量间复杂的非线性映射关系,展现出强大的拟合能力。其优势在于对数据的高度适应性,以及在训练完成后进行快速预测的能力,特别适合处理遥感影像、声呐点云等高维、非结构化数据。然而,纯粹的数据驱动方法也面临着自身的困境。其“黑箱”特性导致模型决策过程缺乏物理可解释性,管理者难以理解预测结果背后的因果逻辑,从而降低了对它的信任度。更为关键的是,模型的性能高度依赖于高质量、长时间序列的训练数据,而现实中许多港口恰恰缺乏系统性、连续性的长期环境与地形监测数据。最根本的挑战在于,与经验模型类似,纯粹的数据驱动模型本质上是在学习历史数据的分布规律。当未来气候情景导致系统行为超出历史数据的分布范围时,模型的泛化能力将急剧下降,其预测结果的可靠性将大打折扣。因此,如何将数据驱动的灵活性与物理模型的稳健性有机结合,成为突破现有局限的关键所在。

## 3 面向气候变化的淤积预测与疏浚策略优化框架

为克服上述局限,本文提出一个四层递进的综合框架,旨在实现从精准感知到智能决策的闭环管理。

### 3.1 第一层:多源异构数据融合与高精度环境感知

构建一个全面、实时、高精度的环境感知体系是整个框架的基石。这要求打破传统单一数据源的局限,整合来自“天-空-地-水”多个维度的观测信息。天基遥感卫星能够提供大范围、周期性的地表水体、悬浮泥沙浓度和岸线变迁信息,为宏观态势感知提供支撑。空基平台,特别是搭载多光谱或激光雷达载荷的无人机,可以对港口重点区域进行高频次、厘米级分辨率的地形和水色测量,弥补卫星在时空分辨率上的不足。在地面和水下,则需布设由ADCP、OBS、CTD等组成的原位传感网络,对航道关键断面的水动力和泥沙参数进行连续、实时的监测,并辅以定期的多波束测深船作业,获取高精度的海底地形数据<sup>[3]</sup>。这些多源、异构的数据流并非简单堆砌,而是需要通过先进的数据同化技术,如集合卡尔曼滤波,将其有机地融入到数值模型中,用以不断校正和优化模型的初始场与边界条件,从而确保模型能够始终紧贴真实世界的动态变化,为后续精准预测提供可靠的状态估计。

### 3.2 第二层:多尺度、多情景耦合数值模拟

在高精度环境感知的基础上,需要构建一个能够协同模拟不同时间尺度过程的耦合模型系统。针对台风、洪水等极端事件,应运行高分辨率的三维水动力-泥沙模型,精细刻画风暴期间及过后的泥沙再悬浮、输运与

沉降全过程,生成详细的“事件淤积图”,为应急疏浚提供科学依据。对于常态下的淤积演化,则可运行考虑潮汐、波浪和常规定常径流的模型,进行季节至年际尺度的模拟。而对于海平面上升等长期趋势,则需采用经过降尺度处理的全球气候模型输出作为驱动,结合简化的长期演变模型,评估航道在未来数十年乃至百年的稳定性。尤为重要,必须摒弃单一情景的确定性思维,转而采用多情景分析方法。针对每个时间尺度,都应设置多种代表性的未来气候情景(如SSP1-2.6、SSP5-8.5),并通过蒙特卡洛模拟等手段,生成一组概率性的淤积预测结果,从而将未来风险以概率分布的形式清晰地呈现出来,为风险管理决策提供坚实基础。

### 3.3 第三层:数据-物理融合的智能预测引擎

为了弥合物理模型与数据驱动模型之间的鸿沟,本框架的核心在于构建一个数据-物理深度融合的智能预测引擎。这一引擎不再将二者视为对立选项,而是探索它们的协同增效。一种可行的路径是混合建模,即将物理模型的输出(如流速场、水深场)作为高阶特征输入到机器学习模型中,由后者专注于学习物理模型未能完全捕捉的复杂残余项或非线性关系。另一种更具前景的方向是采用物理信息神经网络(PINN),该方法通过在神经网络的损失函数中嵌入控制方程的物理约束,强制模型的学习过程遵循基本的物理定律,从而在保证高拟合精度的同时,显著提升模型的外推能力和物理可解释性<sup>[4]</sup>。该智能引擎的终极目标,不仅是提供未来淤积量和空间分布的精准预报,更是要能够动态评估航道各区域的疏浚紧迫性,回答“何时何地需要疏浚”这一核心管理问题。

### 3.4 第四层:基于风险与成本效益的疏浚决策优化

预测的最终目的是为了指导最优决策。因此,框架的最后一层聚焦于将复杂的预测信息转化为切实可行的疏浚行动方案。疏浚决策本质上是一个多目标优化问题,需要在保障通航安全(满足最小水深硬性约束)、控制疏浚成本(包括疏浚量、船机调度、燃油消耗等)、以及满足日益严格的环保要求(如疏浚物合规处置、最小化对底栖生态的扰动)等多个相互制约的目标

之间,寻求全局最优或帕累托最优的平衡点。为此,可以引入随机动态规划或深度强化学习(DRL)等先进算法。DRL智能体可以在由前述预测引擎构建的虚拟环境中,通过无数次的试错学习,自主掌握在不同淤积状态和未来气候风险下,采取何种疏浚策略(包括疏浚的具体位置、最佳时机、合理方量)能够最大化长期的综合效益(或最小化全生命周期总成本)。这一过程天然地内嵌了对决策长期后果和未来不确定性的考量。最终,所有这些层次可以集成到一个港口航道的“数字孪生”平台之中,管理者得以在虚拟世界中对各种疏浚预案进行沙盘推演和效果评估,择优后付诸实施,并通过实时回传的监测数据不断更新孪生体,真正形成一个“感知-预测-决策-执行-反馈”的智能管理闭环。

## 4 结语

气候变化深刻改变港口航道泥沙淤积格局,给全球港口可持续运营带来严峻挑战。本文分析了海平面上升等因素对淤积的影响机制,指出传统方法不足,提出融合多源感知、多尺度模拟等的综合性框架。该框架核心是拥抱不确定性,构建智能疏浚管理体系,其成功实施依赖先进技术集成与管理理念变革。未来研究应着重:深化气候变化背景下关键物理过程基础研究,为数值模型改进提供理论支撑;针对中小型港口发展适用AI算法,降低技术应用门槛;探索疏浚物资源化利用途径,实现范式转变,降低环境与成本压力;将港口航道视为社会-生态系统,纳入经济、社会公平等维度,寻求更具整体韧性和包容性的适应性方案。

## 参考文献

- [1]陈文锋.港口航道泥沙淤积与疏浚技术研究[J].珠江水运,2025,(10):28-30.
- [2]李孟国,韩志远,许婷,等.伶仃洋港口航道泥沙问题研究[J].水运工程,2021,(09):1-8.
- [3]季则舟.粉沙质海岸港口航道泥沙问题及防沙减淤措施研究[D].天津大学,2021.DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000436.
- [4]王晓群.港口航道防沙疏浚策略分析[J].中国储运,2024,(06):101.