基于数值模拟的单向输沙河口导堤非对称优化设计研究

季　飞[1]，叶跃飞[1]，陈青山[1]，刘海源[2]
（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；
2. 交通运输部天津水运工程科学研究所，天津 300456）

摘要：针对单向输沙河口导堤设计中堤长影响的普适规律与长效预测方法不足的问题，以某河口为案例展开研究。基于 MIKE 21 Litline 模块构建岸线演变模型，通过系统模拟不同北导堤长度方案下的岸线响应，结合无量纲拟合与长期动力学分析，揭示了导堤拦沙的核心规律。结果表明：1）导堤拦沙效应具有显著的空间不对称性与非线性特征。2）建立拦沙效率与非对称几何参数（北堤与南堤长度比）之间的标度律，据此提出了将非对称设计系数控制在 1.5～1.8 的量化设计准则。3）明确了堤根拦沙体“初期快速发育、后期渐近稳定”的演化规律，通过负指数模型拟合，量化了达到准稳定态的时间尺度。研究形成了一套从参数优化到长效评估的完整方法论，为单向输沙河口导堤的精细化设计提供了定量依据。

关键词：河口整治；导堤；拦沙效果；数值模拟；非对称设计；动力稳定时间
中图分类号：U617.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0088-06

Asymmetric optimal design of estuarine training dike under unidirectional sediment transport based on numerical simulation

Ji Fei[1], Ye Yuefei[1], Chen Qingshan[1], Liu Haiyuan[2]
(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: To address the lack of universal principles governing the influence of training dike length and long-term prediction methods in unidirectional alongshore sediment transport estuaries, this study takes a specific estuary as a case. A shoreline evolution model is constructed using the MIKE 21 Litline module. By systematically simulating the shoreline response under different north dike length scenarios and combining dimensionless fitting with long-term dynamic analysis, the core mechanisms of sediment trapping by dikes are revealed. The results show that: 1) The sediment trapping effect exhibits significant spatial asymmetry and non-linear characteristics. 2) A scaling law between trapping efficiency and asymmetric geometric parameters (the length ratio of north to south dike) is established, leading to a quantitative design guideline recommending the asymmetric design coefficient be controlled within 1.5－1.8. 3) The evolution pattern of the sedimentation body at the dike root, characterized by “rapid initial development followed by asymptotic stabilization” is clarified. Through negative exponential model fitting, the time scale to reach a quasi-steady state is quantified. This research forms a comprehensive methodology from parameter optimization to long-term performance assessment, providing a quantitative basis for the refined design of training dikes in unidirectional sediment transport estuaries.

Keywords: estuary regulation; training dike; sediment trapping effect; numerical simulation; asymmetric design; dynamic stabilization time

收稿日期：2026-03-28　　**录用日期：**2026-05-15

作者简介：季飞(1981—)，男，硕士，高级工程师，从事港口航道与海岸工程设计工作。

水运工程

河口作为陆海交互作用的关键区域，其水沙动力过程与地貌演变直接关系到航道维护、防洪安全及沿岸生态与社会经济发展。全球气候变化与高强度人类活动共同影响下，流域来沙减少、海平面上升及极端天气等因素，加剧了许多河口的拦门沙发育、航道淤积与岸滩侵蚀。为稳定河口流路、维持通航水深，修建导堤等整治建筑物已成为普遍采用的工程措施，通过束流导沙、调控局部流场，将泥沙拦截于堤外或导向目标区域[1-2]。导堤的拦沙效能与长期效益很大程度上取决于几何参数的精细化设计，其中堤长是最关键的参数之一，直接决定了水流挑离岸线的范围与控沙能力。

近年来，国内外学者针对河口海岸工程的水沙数值模拟与导堤优化开展了大量研究。Hsu 等[3]提出抛物线海湾形状方程，为预测平衡岸线形态奠定了理论基础；Lausman 等[4]进一步探讨了该方程应用中的不确定性。在模型开发方面，Passeri 等[5]利用 XBeach 模型模拟了屏障岛的长期演化；Scala 等[6]则开发了专门用于预测岸线演变并量化防护结构物影响的 COAST-PROSIM 模型。国内学者中，周建军等[7]创新性地提出了黄河口多出口入海新格局理论并进行了数值模拟论证。在具体工程应用上，宋伟龙等[8]基于 MIKE 21 模型对人工补沙与拦沙堤结合的沙滩修复方案进行了成功比选；Mi 等[9]的研究表明，结合丁坝与盐沼湿地的混合方案能显著提升泥沙滞留效果。此外，混合防洪策略及复合屏障系统的地貌动力学模拟也得到关注[10-11]。

尽管如此，现有研究仍存在若干亟待深入探究的问题：1)多数研究聚焦于航道整体冲淤或工程后岸线的一般性变化，对“堤外侧拦沙能力”(直接影响工程寿命的核心指标)的参数化研究尚不充分；2)在稳定单向输沙条件下，双导堤系统表现出的不对称拦沙效应及其对上、下游导堤差异化设计的要求，尚未形成明确的设计准则；3)将精细化数值模拟与工程设计参数优化深度结合，提出定量化、可推广设计建议的研究案例仍相对有限。

为此，本文以某单向输沙河口为案例，基于 MIKE 21 Litline 模块构建岸线演变模型，通过系统模拟不同北导堤长度方案下的岸线响应，结合无量纲拟合与长期动力学分析，旨在揭示导堤拦沙的空间不对称性与非线性规律，建立拦沙效率与非对称几何参数之间的标度律，明确堤根拦沙体的动态演化规律，从而形成一套从参数优化到长效评估的定量方法，为导堤精细化设计提供科学依据。

1　数值模拟设计

1.1　研究工程案例与概况

为深入研究导堤长度变化对拦沙效果、淤积形态的影响，本文选取一处现状条件下，河道宽度处于稳定状态、沿岸年净输沙方向为自北向南的河口，工程对该河口实施疏浚作业，疏浚量为 9.0 万 m^3，并在河口建设南北两座导堤拦截泥沙，南堤长 150 m，北堤长 220 m，见图 1。

图 1　某沿海河口整治修复项目双导堤设计方案
Fig. 1　Design scheme of double training dikes for a coastal estuary regulation and restoration project

1.2　模型基本原理与控制方程

采用丹麦水工试验所开发的 MIKE 21 软件的 Litline 模块，构建岸线演变模型，计算预测导堤实施后工程区附近的岸线变化。

Litline 模块可模拟海岸结构物建设引起沿岸输沙能力变化所导致的岸线演化问题。模块基于求解海岸带区域内的泥沙质量守恒方程的方法模拟岸线演化问题，控制方程如下：

$$\frac{\partial[y_c(x)]}{\partial t}=\frac{1}{h_{act}(x)}\cdot\frac{\partial[Q(x)]}{\partial x}+\frac{Q_{sou}(x)}{h_{act}(x)\Delta x} \tag{1}$$

式中：$y_c(x)$为离岸距离；t 为时间；h_{act} 为存在冲淤的横向剖面高程；$Q(x)$ 为沿岸体积输沙强度；

x 为沿岸坐标；Δx 为沿岸方向空间步长；Q_{sou} 为单位空间步长的泥沙源汇强度。

1.3 模型配置与参数设置

1）水深地形采用实测水深数据。

2）岸线。采用工程区大潮平均高潮位作为初始计算岸线。

3）粒径。采用工程区的沉积物分析结果，中值粒径为 0.33～1.00 mm。

4）波浪。采用工程区海洋站的波浪统计资料，见表 1。

5）模型网格。沿岸岸线网格间距 5 m，垂向剖面地形网格间距 5 m。

表 1 工程区海洋站 15 年间波浪统计

Tab. 1 Wave statistics of the marine station in the project area over a 15-year period

浪向	平均波高/m	最大波高/m	平均周期/s	波浪频率/%	$H_{1/10}$/%		
					$H_{1/10}<0.5$ m	0.5 m$<H_{1/10}<$1.5 m	1.5 m$<H_{1/10}<$3.0 m
N	0.7	5.4	3.2	10.1	2.0	7.9	0.2
NNE	0.9	3.7	3.3	14.3	1.3	12.5	0.5
NE	0.8	2.7	3.3	6.6	0.9	5.4	0.2
ENE	0.6	1.6	3.2	0.4	0.1	0.3	0
E	0.7	1.4	3.3	0	0	0	0
ESE	1.4	1.6	4.2	0	0	0	0
SE	0.6	1.5	3.1	0	0	0	0
SSE	0.8	4.5	3.6	0.1	0	0.1	0
S	0.8	3.8	3.3	6.3	0.3	5.9	0.1
SSW	0.8	2.9	3.3	18.8	1.7	16.8	0.3
SW	0.6	4.8	3.6	12.4	5.0	7.3	0.1
WSW	0.5	4.5	3.6	6.0	3.6	2.3	0.1
W	0.5	3.4	3.5	3.2	2.1	1.0	0.1
WNW	0.4	2.6	3.7	2.9	2.2	0.7	0
NW	0.4	3.0	3.5	6.9	4.7	2.1	0.1
NNW	0.5	2.7	3.3	11.9	6.1	5.7	0.1

1.4 模型验证

验证资料采用现场 2009—2012 年岸线变化结果，利用搭建的模型进行计算，两者对比结果见表 2。由表可知，误差均在 10%以内，满足 JTS/T-231—2021《水运工程模拟试验技术规范》[12]要求。

表 2 实测岸线与模拟岸线最大淤积宽度

Tab. 2 Maximum deposition widths between measured and simulated shorelines

年份	位置	最大淤积宽度/m	
		实际演变	模拟结果
2009	北堤外侧	145	155
	南堤外侧	116	105
2012	北堤外侧	200	220
	南堤外侧	195	210

2 数值模拟结果与分析

2.1 导堤模拟方案设计

为系统揭示导堤堤长变化对拦沙效果的影响机制，研究基于控制变量法设计系列数值模拟工况。所有工况遵循相同的工程背景：在河口建设双导堤，并对双导堤间水域进行统一标准的疏浚，确保口门通航条件一致。导堤方案设计长度参数组合与工况编号见表 3。

表 3 模拟工况

Tab. 3 Simulation cases

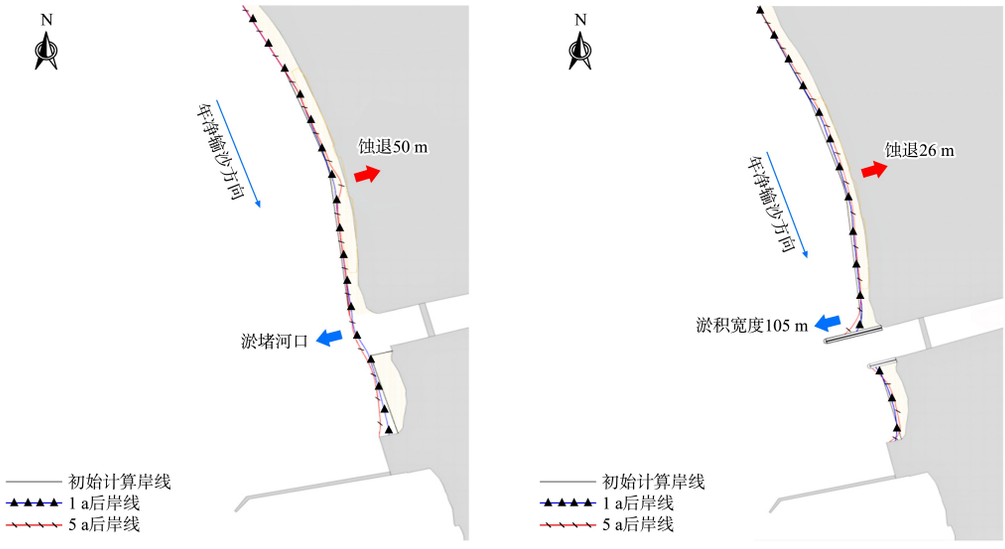
工况	导堤间距/m	南导堤长度/m	北导堤长度/m
1	不建堤	0	0
2	220	150	170
3	220	150	220
4	220	150	270
5	220	150	320

2.2 堤长变化的影响分析

2.2.1 岸线变化计算结果

采用前述模型对各工况实施后 1 和 5 a 的岸线演变进行模拟，结果见图 2，反映工程效能的关键指标见表 4。

水运工程



a) 工况1(仅河口疏浚)　　b) 工况5(北堤320 m，南堤150 m)

图 2　工况 1 和工况 5 岸线演变模拟结果

Fig. 2　Shoreline evolution simulation results for Case 1 and Case 5

表 4　各工况实施 5 a 后关键指标对比

Tab. 4　Comparison of key indicators 5 years after implementation for all cases

工况	北导堤长度/m	北堤根最大淤积宽度/m	是否发生绕堤	北侧岸滩最大侵蚀宽度/m	南侧主要冲淤特征
1	0	无	无	50	泥沙向河口输移并淤积
2	170	71	是	50	淤积宽约 38 m
3	220	90	否	35	淤积宽约 40 m
4	270	103	否	30	淤积宽约 40 m
5	320	105	否	26	淤积宽约 40 m

模拟结果表明，与单纯疏浚方案相比，建设双导堤可有效改变沿岸泥沙的输移路径，使主要淤积体集中于导堤根部，从而显著提升河口区域的拦沙效果。工程实施后的冲淤响应表现出显著的空间不对称性，即主要淤积区域与岸滩侵蚀均集中于北侧，而南侧岸线则由于相邻工程的掩护保持相对稳定。关键参数分析表明，北导堤长度是调控工程效果的决定性因素：堤长增加可系统性地增大堤根淤积宽度并减弱上游岸滩的侵蚀强度，但其边际效益呈现非线性递减特征；当堤长超过约 270 m 后，淤积宽度的增长速率明显趋缓。此外，堤长直接决定了工程的防绕堤年限，在短堤(170 m)工况下，5 a 内即发生绕堤现象，导致防护功能失效；而当堤长不小于 220 m 时，在相同年限内可维持有效的拦沙能力。

2.2.2　拟合分析

综合数值模拟结果与定量分析可知，在北侧来沙主导的动力环境下，北导堤长度的变化对拦沙效果的影响存在明确的非线性规律与空间不对称性。

为提炼适用于类似工程的普适规律，该研究对数据(北堤长度为 L，北堤 5 a 淤积宽度为 W)进行无量纲化处理。以固定南堤长度(150 m)为特征尺度，定义无量纲北堤长度 $L^*=L/150$ 与无量纲淤积宽度 $W^*=W/150$。对(L^*,W^*)进行拟合，发现两者服从对数关系，见图 3。

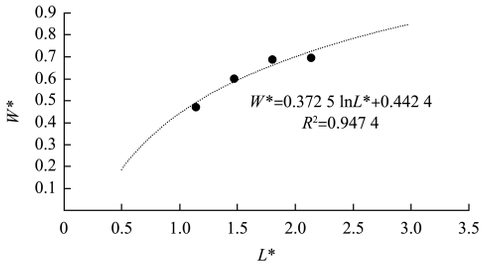


图 3　L^* 与 W^* 拟合结果

Fig. 3　Fitting results of L^* and W^*

水运工程

拟合得到的标度律公式：

$$W^* = 0.372\ 5\ln L^* + 0.442\ 4 \quad (R^2 = 0.947\ 4) \tag{2}$$

式中：L^* 为无量纲北堤长度；W^* 为无量纲淤积宽度；R^2 为拟合优度。

式(2)表明，W^* 与 L^* 之间存在高度显著的对数关系。其中，L^* 的物理实质是导堤的“非对称设计系数”(即北堤与固定南堤的长度比)，该公式定量刻画了工程的非对称拦沙效率。

对该标度律求导可得边际效益：

$$\mathrm{d}W^*/\mathrm{d}L^* = 0.372\ 5/L^* \tag{3}$$

表明拦沙效率随 L^* 增大而递减。计算表明，当 $L^* > 1.8$(即北堤长度超过南堤1.8倍，约270 m)时，边际效益已降至较低水平(<0.207)，效益增长进入平台期。

因此，从普适的标度关系出发，建议在实际工程中将非对称设计系数 L^* 控制在 1.5～1.8 之间，可在保障拦沙效果的同时，实现工程经济性的最优平衡。

2.3　长期演变动力学分析

研究通过对不同堤长工况的横向对比，建立了拦沙效果与导堤几何参数的静态标度关系。然而，导堤工程的实际效能是一个动态累积的过程，其拦沙体的发育速率与长期稳定性是评估工程耐久性与维护周期的关键。为深入揭示这一动态机理，该研究选取优化设计区间内的工况 3(北堤 220 m、南堤 150 m)，对其岸线与堤根淤积形态进行 1、5、10 及 15 a 的长期数值模拟，模拟结果见图 4，数据见表 5。

上述时序数据清晰地表明，堤根淤积体的发育是一个初期迅速、后期渐趋稳定的动态过程。为将这一经验认知转化为可量化、可预测的数学规律，进而实现对工程长期性能的评估，引入负指数函数对数据(堤根淤积宽度 W、计算时长 T)进行拟合分析，结果见图 5。

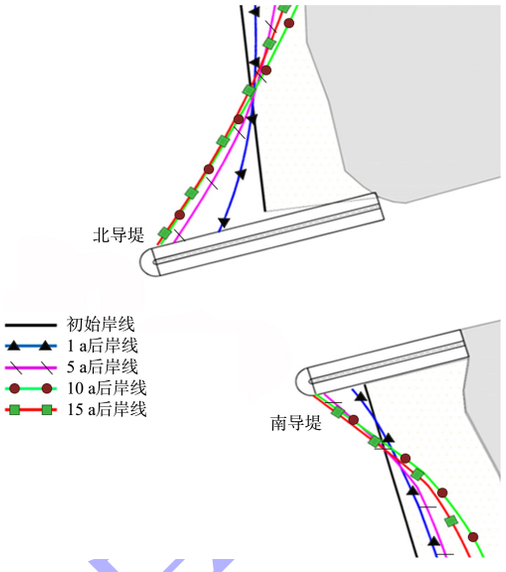


图 4　多年岸线演变模拟预测结果

Fig. 4　Simulated and predicted results of long-term shoreline evolution

表 5　多年岸线演变统计

Tab. 5　Statistics of long-term shoreline evolution

计算时长/a	淤积宽度/m	距离堤头长度/m	备注
1	36	88	北堤设计长度 220 m，其中 96 m 位于岸滩上
5	90	34	
10	102	22	
15	107	17	

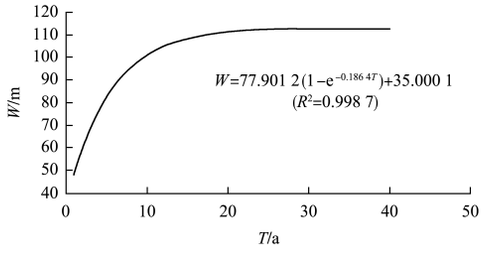


图 5　W 与 T 拟合结果

Fig. 5　Fitting results of W and T

拟合公式为：

$$W = 77.901\ 2(1-\mathrm{e}^{-0.186\ 4T}) + 35.000\ 1 \quad (R^2 = 0.998\ 7) \tag{4}$$

式中：W 为堤根淤积宽度；T 为计算时长；R^2 为拟合优度。

高达 0.998 7 的 R^2 表明，负指数模型能够极其精确地描述堤根淤积宽度随时间演变的动态过程。该模型揭示了堤根淤积“初期快速增长、后期渐近稳定”的普适动力学规律。基于此连续模型，可推导出关键的工程时间尺度指标。计算拦

水运工程

沙体发育达到理论极限规模 95%（即 35+0.95×77.9≈109 m）所需的时间 T≈16.1 a，即为该工况的动力稳定时间，为评估工程效果进入稳态、制定长期维护计划提供了直接的定量依据。

3　结论

1）揭示了导堤拦沙效应的空间不对称性与非线性规律。在自北向南的单向输沙背景下，拦沙与侵蚀主要集中于北侧，北导堤长度成为控制拦沙效果的决定性因子；淤积宽度随堤长增加呈对数增长，边际效益递减，明确了进行非对称设计的必要性。

2）建立了基于无量纲分析的拦沙标度律，提出定量化设计准则。以南堤长度为特征尺度，定义了非对称设计系数 L，拟合得到拦沙宽度预测公式；据此建议在实际工程中将 L 控制在 1.5~1.8 之间，可在确保拦沙效果的同时实现经济性的最优平衡。

3）明确了堤根拦沙体“初期快速发育、后期渐近稳定”的动力学演化规律，并建立可量化的预测模型。通过负指数函数拟合了淤积宽度随时间的变化过程，计算出案例拦沙体达到准稳定态的动力稳定时间约为 16.1 a，为工程长期维护与寿命评估提供了直接依据。

4）该方法体系具有较好的普适性与可移植性，可为同类单向输沙河口导堤的非对称设计提供从静态优化到长效评估的定量分析工具。然而，研究未深入考虑极端风暴事件、海平面上升及流域来沙趋势变化等长期环境变异的影响，也未讨论导堤建设后的局部冲刷与结构稳定性问题。后续工作将结合多因素耦合模型和原型观测数据，进一步提升预测方法的适用性与可靠性。

参考文献：

[1] van Rijn L C. Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas [M]. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.

[2] Roelvink D, Reniers A. A guide to modeling coastal morphology [M]. Singapore: World Scientific, 2011.

[3] Hsu J C, Evans C. Parabolic bay shapes and applications [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1989, 87(4): 557-570.

[4] Lausman R, Klein A H F, Stive M J F. Uncertainty in the application of the parabolic bay shape equation: part 1 [J]. Coastal Engineering, 2010, 57(2): 132-141.

[5] Passeri D L, Mickey R C, Thompson D M, et al. Modeling the impacts of sand placement strategies on barrier island evolution in a semi-enclosed bay system [J]. Coastal Engineering, 2025, 197: 104697.

[6] Scala P, Manno G, Cozar L C, et al. COAST-PROSIM: a model for predicting shoreline evolution and assessing the impacts of coastal defence structures [J]. Water, 2025, 17(2): 269.

[7] 周建军, 张曼, 孙嘉悦. 黄河下游长远安全研究: 河口格局优化 [J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 142-150.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Sun Jiayue. Research on long-term safety of the lower Yellow River: estuary outlet optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 142-150.

[8] 宋伟龙, 孙永根, 张志卫, 等. 犀丽湾海滩演化分析及修复方案比选研究 [J]. 海洋环境科学, 2025, 44(2): 276-283.
Song Weilong, Sun Yonggen, Zhang Zhiwei, et al. Evolutionary analysis and comparison of restoration scheme for Xili bay beach [J]. Marine Environmental Science, 2025, 44(2): 276-283.

[9] Mi Jie, Zhang Min, Townend I, et al. Hybrid green-grey intertidal-flat plus wetland restoration as solution for heavily human-intervened coastline management [J]. Ocean & Coastal Management, 2025, 262: 107595.

[10] Matsoukis C, Payo M P, Brown J, et al. Enhancement of coastal flood mitigation by implementing hybrid flood defences integrating hard engineering and nature-based solutions [J]. Science of the Total Environment, 2025, 1009: 181063.

[11] Rimmer C L, Masselink G, Wiggins M, et al. Morphodynamics of a composite barrier system, Westward Ho!, North Devon, UK [J]. Marine Geology, 2026, 492: 107684.

[12] JTS/T-231—2021　水运工程模拟试验技术规范 [S]. JTS/T-231-2021　Technical code of modelling test for port and waterway engineering [S].

（本文编辑　赵娟）

水运工程