



三亚市南山港水体污染及治理研究*

王璐璐^{1,2}

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 针对三亚市南山港水体污染及治理进行深入研究分析。随着南山港运行多年, 承受多重污染, 港区水域面临日益严重的水体污染问题。通过实地调查和水质监测, 分析污染物来源, 采用 MIKE21 数学模型对 7 种不同的治理方案的污染物扩散情况进行预测分析, 综合考虑水动力条件、污染物治理效果、经济性等, 多方面进行深度比选, 选取相对最优的海洋水环境治理方案。研究成果可为其他类似地区的港区水体污染治理提供借鉴和参考。

关键词: 南山港; 水体污染; 水体治理; MIKE21 模型; 海洋水环境

中图分类号: U65; X55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0055-08

Water pollution and treatment in Nanshan Port, Sanya City

WANG Lulu^{1,2}

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;
2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This article conducts in-depth research and analysis on water pollution and treatment in Nanshan Port, Sanya City. With the operation of Nanshan Port for many years and multiple pollutions, the water area of the port is facing increasingly serious water pollution problems. By conducting field investigations and water quality monitoring, the sources of pollutants are analyzed. The MIKE21 mathematical model is used to predict and analyze the diffusion of pollutants in seven different treatment schemes. Taking into account factors such as hydrodynamic conditions, pollutant treatment effectiveness, and economic viability, a comprehensive comparison is conducted from multiple aspects to select the relatively optimal marine water environment treatment plan. The research results can provide reference and guidance for water pollution control in port areas of similar regions.

Keywords: Nanshan Port; water pollution; water treatment; MIKE21 model; marine water environment

1 工程概况

崖州湾南山港位于海南省三亚市西部崖州区, 毗邻南山文化旅游区和大小洞天风景区。崖州区是海南省三亚市 4 个市辖区之一, 地处宁远河下游开阔地带, 东与三亚市天涯区毗邻, 北与保亭县接壤, 西与乐东县交界, 南临南海。工程地理位置见图 1。

南山港运行多年, 周边环境复杂, 港区承受多重污染, 如海滨浴场、排水口污水、港口作业生产生活排污、农田尾水、底泥污染释放等, 港区水质已不达标。根据《三亚崖州湾科技城生态环境保护规划(2020—2035)》^[1], 所在近岸海域水质需达到三类海水水质。为更好地维护南山港和南山角海域的海洋水环境, 急需对南山港污染进行整治。

收稿日期: 2024-09-20

*基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司启明星计划资助项目(K2023N031)

作者简介: 王璐璐(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事水利水运工程、海洋生态修复工作。

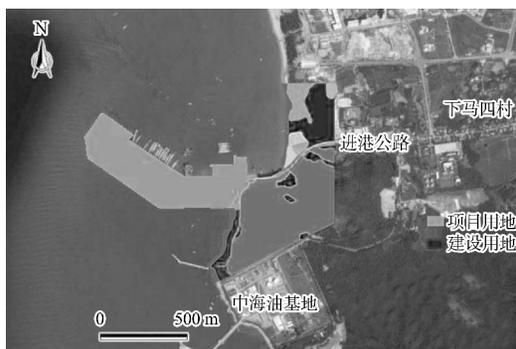


图1 研究区域
Fig.1 Research area

数值模型是环境治理的常用工具，国内众多学者运用数值模型来进行环境治理的分析，如刘国宝等^[2]采用 Xbeach 二维平面数值模型对实施方案下岸滩的侵蚀过程进行研究；李章超等^[3]利用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术对近海岸吹填施工中污染物扩散趋势进行数值模拟等。其中，MIKE 模型^[4-6]能够模拟水动力过程与污染物迁移过程，在我国的多个地区均有应用，因此，本文选用 MIKE 模型，通过建立数学模型，展开潮流、污染物扩散数学模型试验，对目前存在的港域内污染问题进行研究，对工程区域污染物扩散现状进行分析，并提出环境改善建议。

2 调查结果和分析

2.1 南山港环境问题形成原因

通过现有资料和实地踏勘综合分析，初步认为崖州南山港存在问题的形成原因包括：

- 1) 防波堤的建设阻挡潮汐交换，导致港区水域基本处于半封闭状态。
- 2) 港区水动力条件差，流速较小，外海水体涨潮进入港域水量较小，涨落潮过程水体交换不充分。
- 3) 6、7号排水口污染过于严重，源源不断地输送严重超标污染物水体进入港区，而港区内污染物扩散弱。
- 4) 大量货船本身对港内水域形成一定污染。
- 5) 底泥中沉积的污染物扩散，对港池内水域造成污染。

针对以上初步分析污染成因，分别对水质以及底泥进行检测，结果表明均有不同程度污染。

2.2 水质检测结果

海水水质标准共有 35 类指标，针对初步分析污染成因，进行对应性的实际调查，共检测指标 15 项，其中活性磷酸盐、无机氮、溶解氧超标，本文展示以上三类数据的检测成果。

工程区域污染源主要在海滨浴场 1 处、排水口 2 处、港口作业生产生活排污、底泥释放等，南山角海域水污染物源分布见图 2。实测采样点为南山港码头、南山角、7 号路入海口排水口、6 号路入海口排水口、海滨浴场，其中 6、7 号路入海口排水口为入海口排污口，作为污染物扩散中的源项加入污染物扩散数学模型。



图2 南山角海域水污染物源分布
Fig.2 Distribution of water pollutant sources in Nanshanjiao Sea Area

2021 年 8 月—9 月崖州南山角海域实测资料见图 3。根据调查数据得到如下结论：

- 1) 活性磷酸盐检测结果见图 3a)，各采样点活性磷酸盐含量超标，6、7 号排污口超标严重。根据 3 次采样结果，各实测采样点活性磷酸盐含量均超标，6、7 号排污口超标严重。9 月 17 日 6 号排水口活性磷酸盐浓度为 2.29 mg/L，超标 70 多倍，7 号排水口活性磷酸盐浓度为 0.75 mg/L，超标 25 倍。
- 2) 无机氮检测结果见图 3b)，6、7 号排污口氮超标严重，其余采样点不超标。
- 3) 溶解氧检测结果见图 3c)，采样点中，6、

7号排污口在 9 月 17 日不达标，其余采样点均达标。

根据实测数据可知，活性磷酸盐和无机氮超标，所以对区域活性磷酸盐和无机氮进行建模模拟分析。活性磷酸盐和无机氮具有成因关联性，本文仅展示活性磷酸盐的模拟及分析结果。

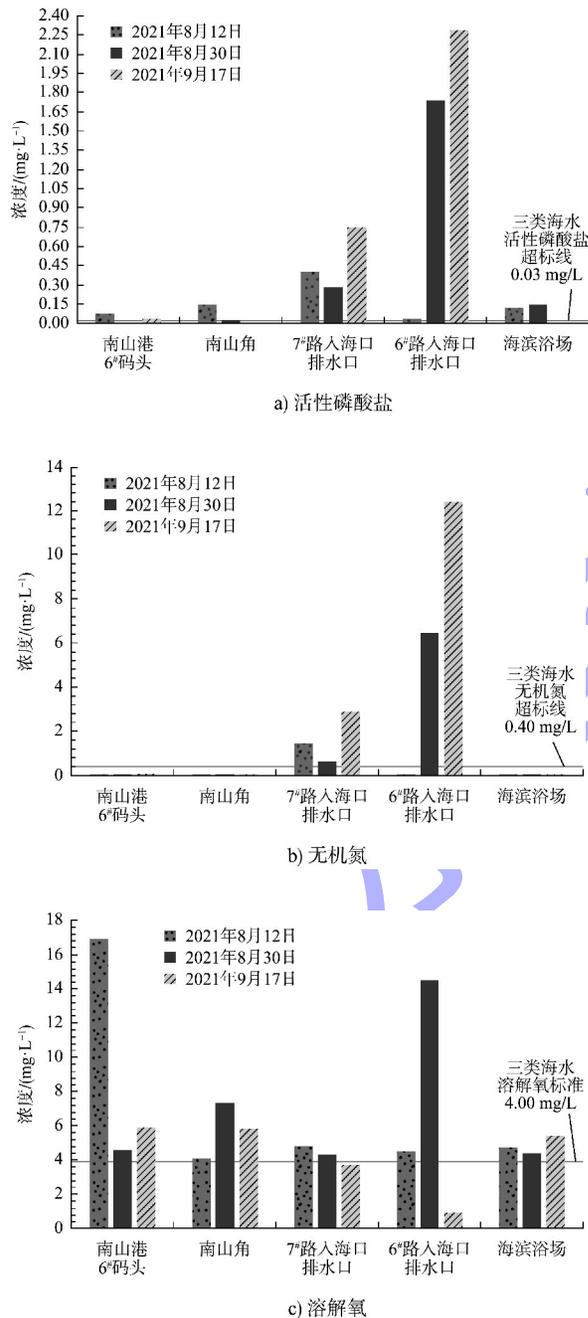


图 3 检测结果
Fig. 3 Detection results

2.3 底泥检测结果

根据 2022 年 1 月 10 日《崖州湾南山角海域生

境治理方案底泥检测报告》^[7]，底泥检测结果见表 1。底泥测点位置见图 4。参照 GB 18668—2002《海洋沉积物质量标准》^[8]，检测结果表明：工程区域淤泥有机质污染严重，达到 14.9 g/kg，超出第三类质量标准，即海洋港口水域及特殊用途的海洋开发作业区；底泥中总磷的平均含量为 556 mg/kg，总氮的平均含量为 813 mg/kg，对工程区域的水体水质存在二次营养盐污染风险。建议进行底泥开挖或原位修复，并严格控制附近海域污染物排放，标本兼治，从根本上消除水环境污染。

表 1 底泥检测结果
Tab. 1 Results of bottom mud testing

底泥测点	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总磷/ (Mg·kg ⁻¹)	全氮/ (mg·kg ⁻¹)
1	8.23	1.61	494	735
2	8.63	1.16	403	654
3	8.51	1.59	403	617
4	8.46	1.58	972	1 340
5	8.62	1.11	485	716
6	8.14	14.90	577	817



图 4 底泥测点位置

Fig. 4 Location of sediment measuring points

3 模型建立及验证

3.1 模型原理

3.1.1 潮流数学模型

潮流计算采用 MIKE21 模型的水动力模块，模型已成功运用于许多工程项目^[9-11]。控制方程采用经 Navier-Stokes 方程沿深积分的二维浅水方程组，并将紊流作用以涡黏系数的形式参数化。基本方程形式见式(1)~(3)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} +$$

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} +$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中： $h = \eta + d$ 为总水深； η 为自由面高程； d 为静水深， x 和 y 分别表示横轴和纵轴坐标， t 为时间， g 为重力加速度， \bar{u} 和 \bar{v} 分别为沿 x 和 y 方向的垂线平均流速； f 为科氏力系数； ρ 为水体密度； ρ_0 为参考密度； S 为点源流量； u_s 与 v_s 为点源流速； T_{ij} 为应力项，包括黏性应力、紊流应力和对流等，与流速梯度相关； T_{xx} 、 T_{xy} 分别为 x 、 y 方向的侧向应力，包括黏性摩擦、湍流摩擦、差异平流； T_{sx} 、 T_{sy} 分别为 x 、 y 方向的表面切应力； T_{bx} 、 T_{by} 分别为 x 、 y 方向的底部切应力。

3.1.2 污染物扩散模型

污染物扩散方程如下：

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(uhc)}{\partial x} + \frac{\partial(vhc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - Fhc + S \quad (4)$$

式中： c 为污染物浓度； u 、 v 为水平速度分量， m/s ； h 为水深， m ； D_x 、 D_y 为 x 、 y 向扩散系数， m^2/s ； F 为线性衰减系数， s^{-1} ； S 为 $Q_s \cdot (c_s - c)$ ； Q_s 为源或汇流量， $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ； c_s 为源处污染物浓度。

3.2 模型建立

南山港位于海南岛西南海岸，属海南省三亚市管辖。港址位于三亚市西面的崖州湾，宁远河出海口处，背靠崖城镇、东依南山岭。工程海域位于三亚市崖州湾附近，受宁远河径流以及潮流和波浪的共同作用。为了充分反映工程局部海域受北部湾潮流的影响，采用大、小两重模型以嵌套方式计算潮流场，选取北部湾区域为大模型，在工程区域附近选取小地形并进行网格局部加密。模型网格采用三角形网格，可以很好地模拟

岸线和工程建筑物。图5a)为大模型的计算网格，图5b)为小模型的计算网格。小模型工程位置的计算最小空间步长为10 m，潮流计算时间步长为10 s。

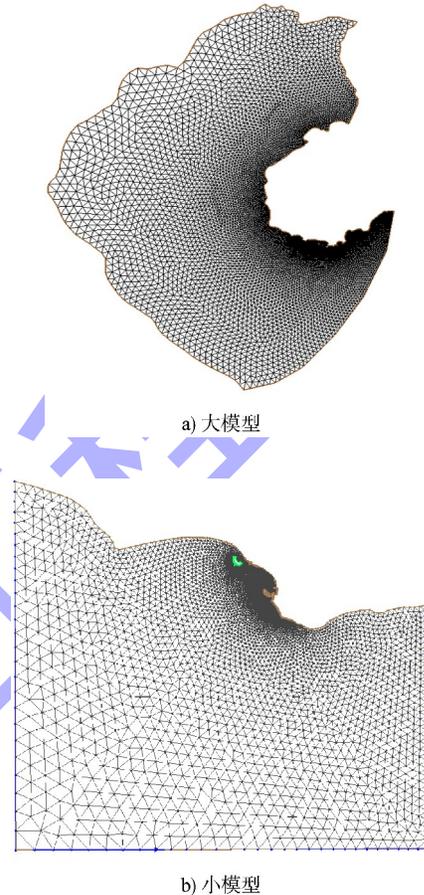


图5 网格划分

Fig.5 Mesh division

3.3 模型验证

为了验证本文建立的潮流模型的准确性，分别选取了2020年12月23日5时—24日15时（大潮期）、2020年12月29日12时—31日15时（小潮期）的水文实测资料与计算结果进行验证。区域的流速、流向数模计算结果与实测结果一致性较好，所建模型能较好地反映工程区附近海域的潮流流动规律。

4 南山港污染物治理方案及比选

4.1 方案设置

根据以上所验证潮流模型对南山港内污染物扩散进行模拟分析。选取南山港内包含大潮、小

潮在内的整个周期为模拟周期, 模拟南山港现状以及近期方案、远期方案的南山港内水动力及污染物扩散情况。具体方案设置如下。

1) 现状: 对未采取任何工程措施情况下南山港内污染物扩散进行模拟。

2) 方案1: 排水口污染物浓度减半。

3) 方案2: 排水口处流量减半。

4) 方案3: 排水口污染物排放达到标准。

5) 方案4: 排水口污染物浓度减半+使用泵从深海抽水来增加水动力条件, 冲走部分污染物。

6) 方案5: 排水口污染物排放达到标准+底泥清淤。

7) 方案6: 考虑平常截污治理中水回用不排、大雨期间排水模式, 取降雨时间为 24 h, 大雨期间 6、7 号入海排水口流量设置为旱流流量的 6.3 倍, 污染物浓度取实测最大值, 24 h 后停止排放。

8) 方案7: 考虑平常截污治理后按地表三类水的水质进行排放, 按照地表水环境质量标准限值中Ⅲ类标准设置 6、7 号入海排水口污染物浓度。

本文仅详细展示方案 5 的参数设置: 南山港水域内部不考虑底泥扩散, 根据 9 月 17 日水质采样检测结果设置无机氮浓度场划分为 3 个区域: 南山角浓度为 0.033 mg/L, 南山港码头浓度为 0.02 mg/L, 海滨浴场浓度为 0.003 mg/L, 6 号入海口排水口流量设置为 0.032 80 m³/s, 持续排放无机氮浓度为 0.4 mg/L, 7 号入海口排水口流量分别设置为 0.014 38 m³/s, 持续排放无机氮浓度为 0.4 mg/L。

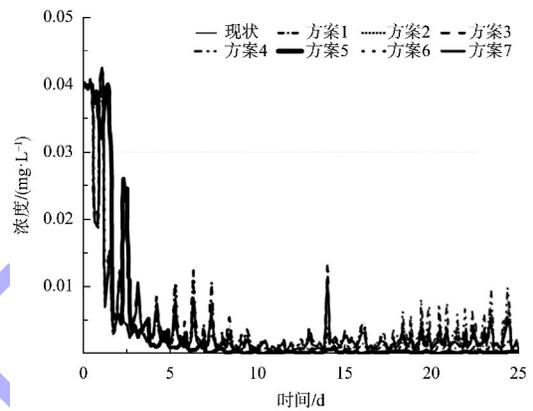
根据 9 月 17 日水质采样检测结果设置活性磷酸盐浓度场, 划分为 3 个区域: 南山角浓度为 0 mg/L, 南山港码头浓度为 0.04 mg/L, 海滨浴场浓度为 0 mg/L, 6 号入海口排水口流量设置为 0.032 80 m³/s, 持续排放活性磷酸盐浓度为 0.03 mg/L, 7 号入海口排水口流量设置为 0.014 38 m³/s, 持续排放活性磷酸盐浓度为 0.03 mg/L。整个计算过程暂不考虑污染物降解。

船舶污染简化为港内靠近边界处的 8 个不断

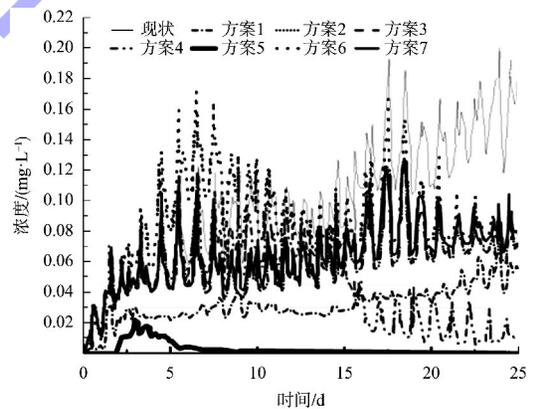
排放污染物的点源, 每个点源的无机氮排放速率为 1 mg/s、活性磷酸盐排放速率为 0.05 mg/s。

4.2 方案比选

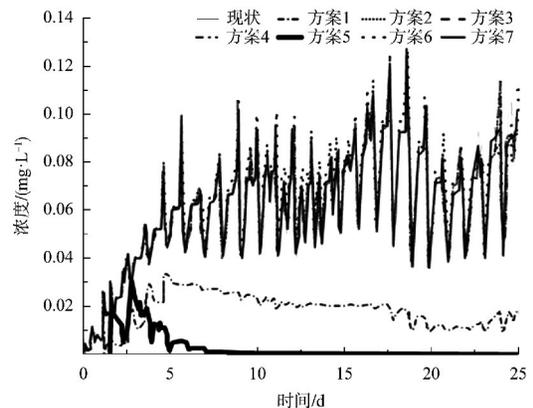
测点 1~4 在各方案下污染物浓度变化见图 6。可知对于活性磷酸盐方案 5 的治理效果最为理想, 该方案南山角、南山港、滨海浴场及 6、7 号排水口处活性磷酸盐浓度均小于 0.03 mg/L, 水质达标。综上, 方案 5 治理效果最好。



a) 测点1



b) 测点2



c) 测点3

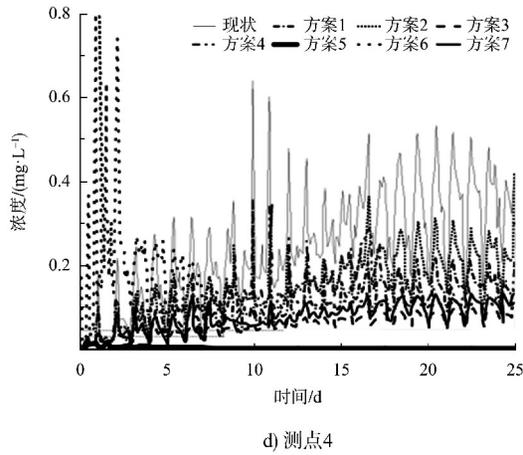
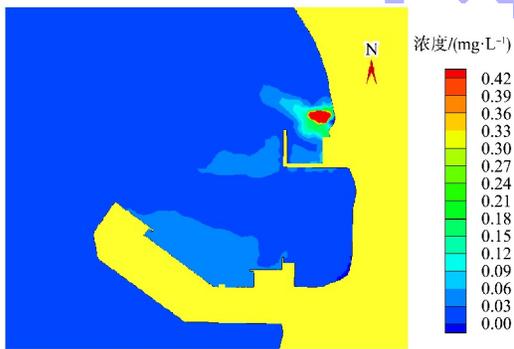


图 6 各方案活性磷酸盐浓度对比

Fig. 6 Comparison of active phosphate concentration of different schemes

4.3 模拟成果分析

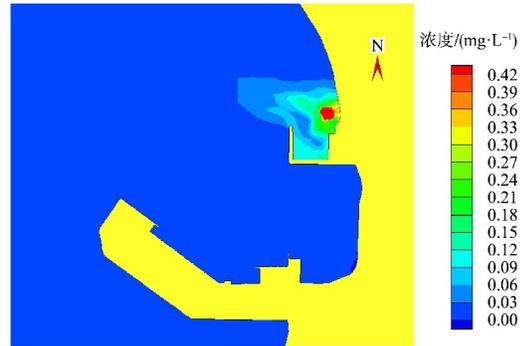
对每个方案均进行 25 d 的周期模拟，具有代表性的方案 2 周期成果见图 7。模拟时间至 25 d 时，污染范围对比现状明显减少，南山港及滨海浴场附近活性磷酸盐浓度小于 0.03 mg/L，水质达标，但由于 6、7 号排水口持续排放超标污染物，排水口附近及南山角附近活性磷酸盐浓度仍大于 0.03 mg/L，水质不达标。



a) 2 d



b) 5 d



c) 10 d



d) 15 d



e) 20 d



f) 25 d

图 7 方案 2 活性磷酸盐浓度分布 (2~25 d)

Fig. 7 Distribution of active phosphate concentration in Scheme 2 (2~25 d)

对现状的模拟结果进行分析可知,南山港海域内污染物超标的主要原因为:港区水动力条件差,外海水体涨潮进入港域水量较小,涨落潮过程水体交换不充分,6、7号排水口处磷严重超标,随着潮流扩散至整个海域,造成污染。海底的淤泥向上释放污染物,大量船舶排污对港内水域形成一定污染。

根据7种治理方案的模拟结果可以看出,使用方案5治理25d后水体可以达到三类水质标准,方案3治理25d后排水口附近污染物浓度明显下降,但水体仍为劣四类水体。方案4南山湾北部污染物浓度明显下降,但排水口附近污染物浓度较大,不达标。方案1、2同样不达标。方案6、7虽然氮指标达标,但是磷指标排水口处超标3~4倍。

分析各方案南山角海域内海水水质治理效果,结果表明,方案1、2不能达标,方案3、4、6、7局部治理效果明显,但水体仍属于劣四类水体。方案5即采用排水口污染物浓度达标结合底泥疏浚,疏浚深度为2m的方案,治理效果达标,治理25d后,整个南山角海域均可达到三类海水水质标准,最为合理。可作为推荐整治方案。

通过进行各方案的模拟可知,只有方案5模拟时间至20d时,污染范围对比现状已有显著减少,底泥疏浚后水深增加,相应水动力条件得到改善,污染物扩散能力得到显著提升,南山角、南山港、滨海浴场及6、7号排水口处活性磷酸盐浓度均小于0.03mg/L,水质达标;模拟时间至20d时,污染范围对比现状已有显著减少,底泥疏浚后水深增加,相应水动力条件得到改善,污染物扩散能力得到显著提升,南山角、南山港、滨海浴场及6、7号排水口处无机氮浓度均小于0.4mg/L,水质达标。

5 结论

1) 崖州南山港海域受潮流和波浪共同作用。崖州湾为全开敞浅水海湾,该海域潮流走向大体为东—西向,涨潮主流向西,落潮主流向东,但

平均潮差小。MIKE21模型可以较好地模拟南山港海域,便于进行下一步方案分析。

2) 结合南山港海域3次的水质观测资料可知,2021年8月12日—9月17日,以第三类海水水质作为标准,南山角海域活性磷酸盐,无机氮3次检测全部超标;其中6、7号排水口活性磷酸盐和无机氮超标几十倍,污染严重;由此可知南山港海域主要为以无机氮和活性磷酸盐为主的氮、磷污染。海域内溶解氧仅在9月17日6、7号排水口(污染源)处不达标,其余处均达标。

3) 根据7种治理方案的模拟结果可以看出,使用方案5治理25d后水体可以达到三类水质标准,方案3治理25d后排水口附近污染物浓度明显下降,但水体仍为劣四类水体。方案4南山湾北部污染物浓度明显下降,但排水口附近污染物浓度较大,不达标,方案1、2同样不达标。方案6、7虽然氮指标达标,但是磷指标排水口处超标3~4倍。所以本工程推荐方案5治理方案,即排水口污染物排放达到标准+底泥清淤。

参考文献:

- [1] 三亚市自然资源和规划局. 三亚崖州湾科技城生态环境保护规划(2020—2035) [R]. 三亚: 三亚市自然资源和规划局, 2020.
Sanya Natural Resources and Planning Bureau. Ecological environment protection plan for Yazhou Bay science and technology city in Sanya (2020-2035) [R]. Sanya: Sanya Natural Resources and Planning Bureau, 2020.
- [2] 刘国宝, 朱浩. 环渤海区域海岸整治修复工程实践[J]. 水运工程, 2022(S1): 25-30.
LIU G B, ZHU H. Practice of coastal regulation and restoration project in Bohai Rim region [J]. Port & waterway engineering, 2022(S1): 25-30.
- [3] 李章超, 杨正军, 王立强. 日照港吹填施工中污染物扩散数值分析[J]. 水运工程, 2018(S1): 141-144.
LI Z C, YANG Z J, WANG L Q. Numerical analysis of pollutant diffusion in Rizhao Port dredger filling engineering [J]. Port & waterway engineering, 2018(S1): 141-144.

[4] 李添雨,李振华,黄炳彬,等.基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究[J].环境科学学报,2021,41(1):293-300.
LI T Y, LI Z H, HUANG B B, et al. Simulation on water quantity and quality of Shahe Reservoir by MIKE21 model[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2021, 41 (1): 293-300.

[5] 徐存东,任子豪,李智睿,等.基于 MIKE21 的南浔区河网水动力水质耦合模拟研究[J].环境科学与技术,2022,45(10):51-59.
XU C D, REN Z H, LI Z R, et al. Study of hydrodynamic and water quality coupling simulation of river network in Nanxun district based on software MIKE21 [J]. Environmental science & technology, 2022, 45 (10): 51-59.

[6] 张婷,王学雷,耿军军,等.基于 MIKE21 和灰色模式识别模型的洪湖水水质模拟与评价[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):2090-2100.
ZHANG T, WANG X L, GENG J J, et al. Application of the MIKE21 and grey-mode identification model to monitor and assess water quality for Honghu Lake [J]. Resources and environment in the Yangtze basin, 2018, 27(9): 2090-2100.

[7] 海南安纳检测技术有限公司.崖州湾南山角海域生境治理方案底泥检测报告[R].海口:海南安纳检测技术有限公司,2021.
Hainan Anna Testing Technology Co., Ltd. Bottom sediment detection report on habitat management plan for Nanshanjiao sea area in Yazhou Bay [R]. Haikou: Hainan Anna Testing Technology Co., Ltd., 2021.

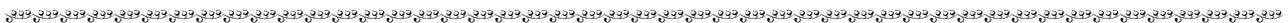
[8] 海洋沉积物质量:GB 18668—2002[S].北京:中国标准出版社,2004.
Marine sediment quality: GB 18668 - 2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[9] 舒长莉,李林,冯韬.基于 MIKE21 的河道饮用水源地突发污染事故模拟:以赣江南昌段为例[J].人民长江,2019,50(3):73-77.
SHU C L, LI L, FENG T. Simulation of emergent water pollution accident in river-type drinking water sources based on MIKE 21: case of Nanchang reach of Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2019, 50(3): 73-77.

[10] 游孟陶.基于数值模拟的盐灶河口污染物治理方案[J].港工技术,2021,58(6):87-91.
YOU M T. Regulating plan of pollutants around Yanzaos estuary based on numerical simulation [J]. Port engineering technology, 2021, 58(6): 87-91.

[11] 王璐璐.引水管规模对三亚中心渔港水质提升作用研究[J].水道港口,2021,42(3):339-344,415.
WANG L L. Research on the effect of different scale diversion pipes on the improvement of water quality of Sanya central fishing port [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(3): 339-344, 415.

(本文编辑 赵娟)



· 消 息 ·

湖北湖堤河水系连通治理工程完工

2025 年 4 月，一航局承建的湖北湖堤河水系连通治理工程完工。该项目位于湖北省洪湖市南堤岸沿线，全长 11.7 km，主要治理内容为 10.11 万 m³ 河道清淤、8.06 万 m³ 修坡整形，新建 20 处理管闸，恢复约 12 万 m² 水生植物。该项目建成后，将有效改善洪湖流域水质，完善生态系统结构和功能，提升洪湖流域综合治理能力及洪湖城市形象。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202505/t20250519_220412.html (2025-04-24)