

人工沙滩工程水体水质净化数值模拟研究

李晓霜¹, 崔海涛¹, 杜小骏²

(1. 济宁市水文中心, 山东 济宁 272113; 2. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

摘要:受自然因素和人为因素共同影响,我国沿海地区的部分河口海岸地区地表水体水质条件无法满足人们观海、亲海需求,因此如何建设和改善水质型人工沙滩成为亟待解决的问题。以我国沿海某城市拟建人工沙滩工程水体项目中的水质为研究对象,本文利用 MIKE21 软件建立工程区域二维水动力数学模型,计算和分析了人工沙滩戏水区水体置换分布和置换效率。在此基础上,根据水生植物净化水体的研究成果,在模型计算中引入衰减系数来计算水生植物对水体的净化效果。结果表明:通过 30 d 内 6 次换水,戏水区内整体换水率达到 60% 以上。换水对戏水区水质影响较小,换水 48 h 后,大部分水体水质恢复工程需求。本研究成果可为其他河口地区建设人工沙滩及其水体净化工程作参考。

关键词:人工沙滩;工程水体;水质净化;数值模拟

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2021)02-0140-08

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2021.02.006

引用格式: LI X S, CHI H T, DU X T. Numerical simulation of water quality purification of engineering water body in the artificial beach[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 140-147. 李晓霜, 崔海涛, 杜小骏. 人工沙滩工程水体水质净化数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 140-147.

河口海岸地区往往是人口聚居的区域,其城市化发展相对较快。随着人们物质生活水平的提升,亲近自然、亲近海洋成为了更高的社会需求。但在一些河口海岸地区,由于河流携带大量泥沙入海导致河口附近海岸水体浑浊,加上人口聚集产生的生活污水和部分工农业排放的流水,导致这些地区的海水水质无法满足亲水需求。在国家相关政策的指引下,我国沿海城市纷纷制定具体措施,将保护海岸带和开发海洋经济作为主要战略之一,力争尽快合理开发海岸带,做到还海于民。对于一些河流入海口区域的城市,为了改善河口滨海环境,利用沿海区位条件,采用人工填沙、水质净化等人工手段改善滨海环境,设立人工海岸线生态化修复项目,形成城市人工沙滩,美化城市滨海景观。

在国外,人工沙滩的建设通常主要在具备良好海水水质的海岸附近进行,内容主要包括沙滩修复或者建设人工海岛沙滩等,比如迪拜的棕榈岛。国外几乎没有在含沙量很高的河口海岸地带建设人工沙滩的案例。在我国,部分河口城市通过建设人工沙滩的方式来满足人们观赏碧海和海边戏水的需求已取得良好的社会效益,如上海的金山城市沙滩^[1-3]和奉贤的碧海金沙,均采用圈围方式在含沙水体区域围筑一片水域,通过一定的海水净化措施和人造沙滩的方式为市民创造出适合活动的滨海活动区域。在水质净化方面,金山城市沙滩采用生物投放为主的措施来创造可净化水质的生态环境,构筑了鱼、虾、蟹、贝和藻互补共生的水生态系统,降低了水体氮(N)、磷(P)营养元素的浓度,提高了水生动物对浮游植物的摄食比率,有效地控制了该水域富营养化问题^[4-5];奉贤的碧海金沙则以泥沙沉淀、除菌、治污等措施为主,将处理过的海水引入滨海泳场的方式来净化水质。两种方式均在实现良好的生态效果的同时还取得了良好的社会和经济效益。

水体中氮、磷的生物消耗去除主要依靠植物和贝壳类动物。植物通过根系吸收水体中的含氮、磷物质,将其作为自身生长的养分,而贝壳类动物则通过滤水过程吸附水中的碎屑,从而将附着在碎屑上的

收稿日期:2021-02-04

作者简介:李晓霜(1989—),工程师,主要从事水文和水资源方面研究. E-mail: 691455011@qq.com

(王佳实 编辑)

氮、磷物质,将其留在自身体内。国内学者对静水中植物去除氮、磷的效率进行了一定的研究,如孙譔等^[6]研究了 12 种挺水植物对模拟污水的净化作用。结果表明,多数水生植物 15 d 除氮率超过 85%,除磷率超过 60%;多数水生植物 30 d 的总氮去除率均达到 99%以上,对总磷的去除率达到 90%以上;此外,植物的除氮和除磷效率与初始的水体氮、磷含量有关,水体的营养程度越高,植物生长越快,对除氮除磷的效率也越高。彭婉婷等^[7]研究了多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果,其中涉及的植物种类包括泽泻、黄菖蒲、千屈菜等 20 余种。研究表明,多种植物组合也能取得较高的除磷除氮效率,植物对污染水体的净化速度在先期较快,试验进行 6 d 后,多数组合的总氮去除率均超过 80%,30 d 后所有组合的植物对水体的总氮去除率都在 90%左右。

对于在河流入海口附近泥沙含量较高、海水水质较差的河口海岸地区建设人工沙滩,通常需要论证海水是否具备净化的可能性以及海水净化的周期是否满足使用要求等技术问题。本文以我国东部沿海某河口城市拟建的人工沙滩工程为例,提出一种采用沉淀池清除泥沙,利用生物净化方式在游乐区内提升海水水质的净化模式,并通过现场观测和数值模拟手段对水体的净化效果进行分析研究,以期为河口地区建设人工沙滩水体净化工程提供参考和依据。

1 工程概况

1.1 工程区自然条件

工程区位于东部沿海某河口南侧滨海海岸,区域多年平均气温 17.9 °C,受季风气候影响,风向和风速季节性变化较为明显,夏季盛行偏东风,冬季盛行西北风,全年最多风向为 SE,频率 23%,其次为 NW 风,频率为 22%,年平均风速为 2.2 m/s。工程区水体含沙量较大,大、中潮时期水体含沙量大于 1.00 kg/L 的出现频率高达 75.81%和 58.16%。工程区附近底质泥沙主要以粉砂和黏土组成,并含少量的砂。

工程区域海水水质较差,根据附近海域水质调查,总体水质为四类至劣四类,主要污染物为无机氮和活性磷酸盐,受周边过往船只排污和养殖活动等因素影响,油类、高锰酸盐、pH 和粪大肠菌群个别时段存在局部区域超标的现象。

1.2 工程平面布置和调度方式

图 1 为本文所研究的人工沙滩工程的平面布置示意图,研究区涉水部分主要包括沉淀池、引排水闸、戏水区等构筑物,其中,戏水区面积约 1.3 km²,沉淀池面积约 0.4 km²。工程引调水过程见图 2。

2 数值模拟基本方程和设置

2.1 模型方程

采用丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute,DHI)开发的 MIKE21 软件建立数学模型,其控制方程包括 1 个连续性方程和 2 个动量方程^[8]。

1)连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS; \quad (1)$$

2)动量方程:



图 1 工程布置

Fig.1 A sketch map of the layout of the project

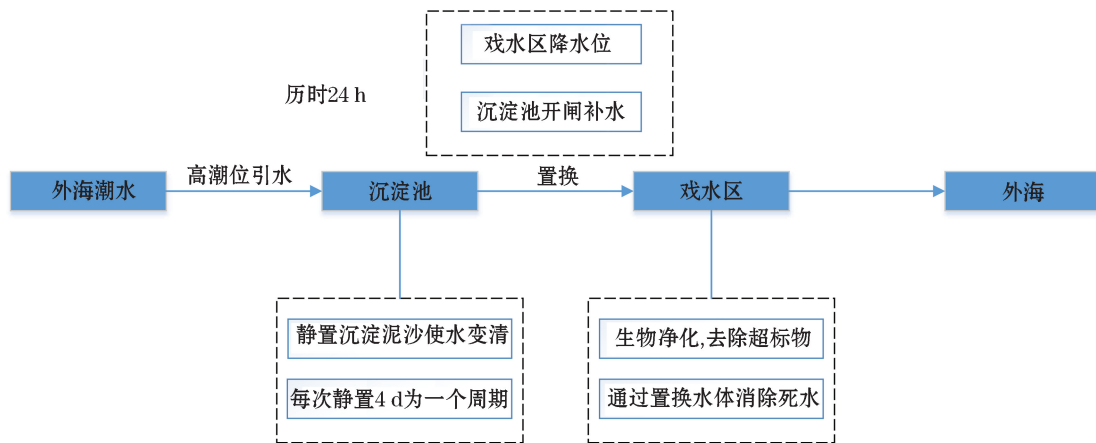


图 2 工程区引调水流程

Fig.2 Flow diagram of water diversion in the engineering area

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} + \\ \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} + \\ \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; x, y 为直角坐标系坐标; η 为水位; d 为静止水深; h 为动态水深, $h = \eta + d$; \bar{u}, \bar{v} 分别为 x 和 y 方向上的垂线平均速度; f 为科氏力参数, $f = 2\Omega \sin \varphi$, 其中 Ω 为地球旋转角速度, φ 为纬度; g 为重力加速度; ρ 为水体密度; ρ_0 为水体参照密度; P_a 为压强; s_{xx}, s_{xy}, s_{yx} 和 s_{yy} 为辐射应力分量; τ_{xx}, τ_{xy} 和 τ_{yy} 为剪切应力分量; S 为点源的流量; u_s, v_s 分别为水质点速度在 x 和 y 方向上的分量; T_{xx}, T_{xy} 和 T_{yy} 分别为侧向压力, $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$, $T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$, $T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$, 其中 A 为水平紊动系数; τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别为水表面风应力的 x 和 y 方向分量; τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为底部切应力的 x 和 y 分量。

由于沿海地区开阔水域水体运动受海面风影响较大, 因此研究中水动力计算考虑风的影响, 风应力(即液面剪切应力), 计算公式如下:

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |\vec{u}_w| \vec{u}_w, \quad (4)$$

式中: ρ_a 为空气密度, c_d 为空气拖曳系数, \vec{u}_w 为水面上方 10 m 高的风速, $\vec{\tau}_s$ 为液面剪切应力。

2.2 模型基本设置

数学模型的参数和边界等相关设置如下。

2.2.1 糙率系数

由于戏水区底部为沙质或淤泥质边界, 因此模型中需设置底部糙率。戏水区底高程为 $-3 \sim 0$ m, 日常运行水位约 2.5 m, 糙率系数取值为 $0.01 \sim 0.03$ 。

2.2.2 涡黏系数

水是黏性流体, 因此计算时需要考虑水体黏性, 通常引入一个黏性系数, 本研究根据 Smagorinsky 公式^[9]确定 Smagorinsky 涡黏系数(E)。

$$E = C_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中: U, V 为 x, y 方向垂线平均流速; Δ 为网格间距; C_s 为计算参数, 一般选 $0.25 < C_s < 1.0$; E 为涡黏系数。

2.2.3 动边界处理

为保证模型计算的连续性, 采用“干湿判别”来确定计算区域由于水位变化产生的动边界。当计算区域水深小于 0.005 m 时, 该计算区域记为“干”, 不参加计算; 当水深大于 0.1 m 时, 该计算区域记为“湿”, 重新参加计算。

2.2.4 调度计算方式

对引入海水和库内海水分别进行不同标记, 并对标记过的 2 种海水进行混合模拟计算, 从而获得戏水区水体混合情况以及不同区域水体的换水率。

换水时, 戏水区水位先降至 2.1 m, 再通过沉淀池进水, 至 2.5 m, 总历时 24 h。根据每次换水量, 设定戏水区引水和排水流量均为 $7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2.5 风

根据工程区域常年的风速和风向统计结果,选择输入风速、风向值,风速取 2.2 m/s,风向为 ESE 向。

2.2.6 水质计算参数

水质计算时通过引入一个衰减系数来表征水体水质指标的变化,因此本研究以水体中的氮含量为研究对象进行计算,水质计算基于以下几个假定:

- 1) 假定衰减系数在一定程度上可以代表水中生物除氮能力,且除氮效果稳定持续;
- 2) 假定戏水区空间范围衰减因子是固定不变的;
- 3) 假定进入戏水区水体为第四类海水,氮含量(P_N)为 0.5 mg/L,初始时刻戏水区为第二类海水,氮含量为 0.3 mg/L;
- 4) 按照 30 d 除氮率 100%的理想状态,计算得到衰减系数为 $3.86 \times 10^{-7} \approx 4 \times 10^{-7}$ 。

2.3 模型计算流程

利用数学模型计算了多次水体置换过程以及水体净化过程中的水质分布,数学模型计算流程如图 3 所示。通过多次水体置换计算获得置换水体在戏水区内的分布,研究戏水区是否存在死水,从而通过水质分布计算研究水体水质是否达到戏水区的水质要求。

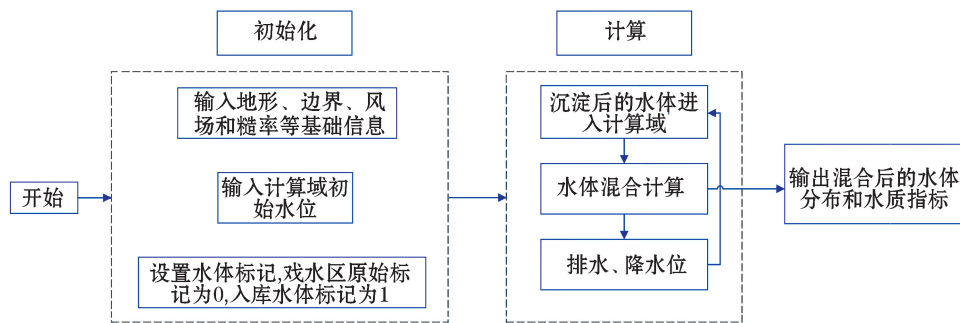


图 3 数学模型计算流程

Fig.3 Flow diagram of the model computation

3 结果与分析

3.1 水体置换计算

由第 1~6 次换水后的水体置换率(Water Exchang Rate, WER)分布(图 4)可见,受东南偏东风影响,戏水区中形成多个环流,导致进入戏水区的水体沿整个区域范围的边界移动,北侧沉淀区闸门附近置换率相对较高。整体来看,戏水区中沿沙滩和堤线区域的水体先被置换,南部中心区域水体置换相对滞后。通过计算,30 d 后戏水区整体的置换率约为 60%,局部置换率最低不低于 50%,可以确保整个区域的水体不存在死水。

3.2 水体净化计算

水体净化计算条件与有风情况下的边界条件相同。第 6 次换水后每隔 6 h 的氮含量分布见图 5,对第 6 次换水前后的水质分布进行比对分析。结果表明,整体换水周期约 30 d,第 6 次换水前戏水区的水质能达到二类海水标准,南侧的大部分区域都能达到一类海水标准,主要原因是南侧区域换水速度相对较慢,有利于

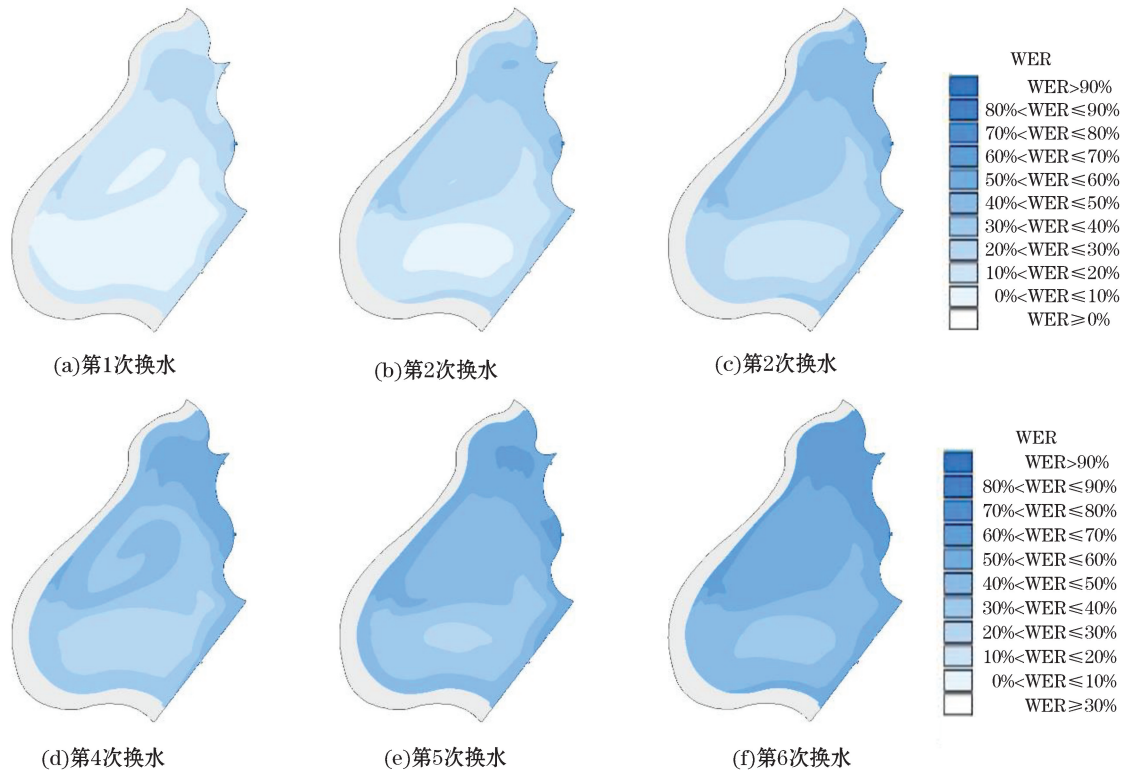


图 4 戏水区不同换水次数后水体置换率分布

Fig.4 Distribution of the water exchange rate after different times of water change in the playing waters of the beach

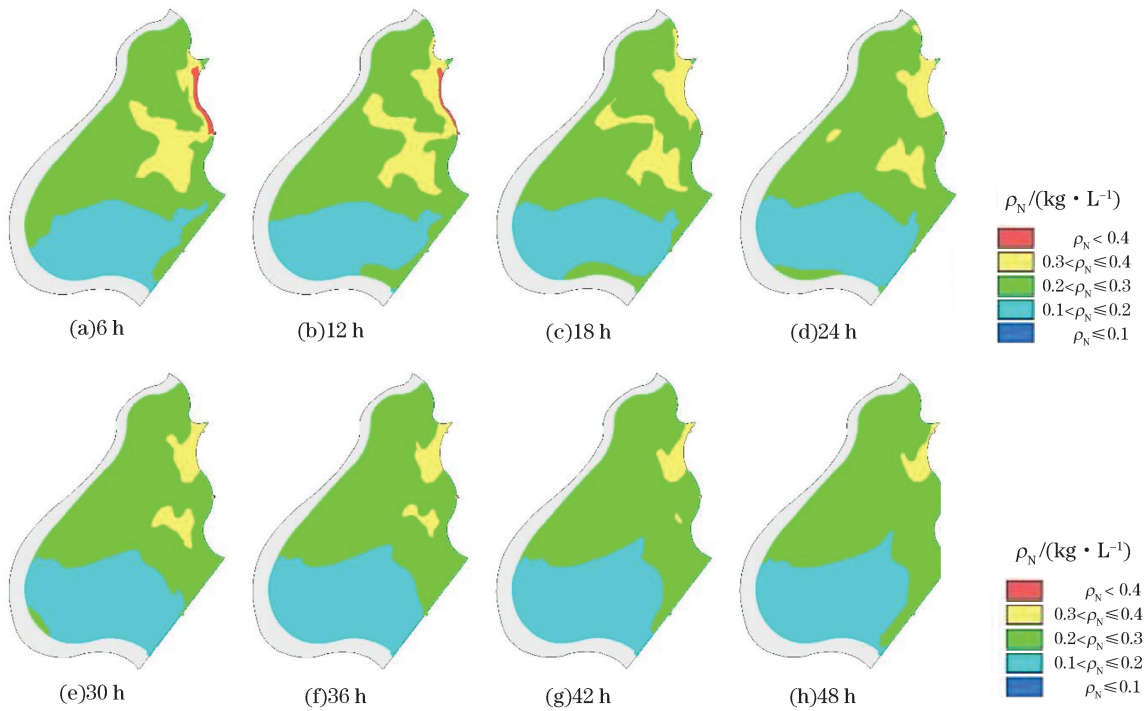


图 5 戏水区第 6 次换水后水体不同时刻氮含量分布

Fig.5 Distribution of nitrogen content in water body at different time after the 6th water change in the playing waters

生物吸收净化这些区域的氮磷物质。换水 6 h 后,由于沉淀池海水水质氮磷指标为四类海水标准,因此,沿沉淀池边界水质为四类海水标准,由于海水混合影响,三类海水扩散至戏水区中央,但是没有扩散至近沙滩区域,原因在于风吹条件下近沙滩区域水流流速相对较大,海水混合相对更充分,利于氮浓度的降低;12 h 后,第三类和第四类标准的海水面积均有所减小;18 h 后所有区域海水标准都优于第四类海水标准;30 h 后近第三类标准的海水只集中在沉淀池附近,并且范围缩小到 0.028 km^2 ;48 h 后,第三类标准的海水面积逐渐缩小,戏水区大部分水域水质优于第二类海水标准,南侧优于第一类海水标准。

4 结 语

本文以我国东部某沿海城市人工沙滩工程为例,探究人工沙滩水体水质净化问题。开展了该工程戏水区内水体水质净化的数值模拟研究,以 30 d 作为整体换水周期,根据戏水区和沉淀池库容比进行换水计算,由于水体的混合,经过理论上换水次数后,戏水区整体置换率达 60% 左右,从平面分布看整个区域不存在死水区。水质净化模拟结果表明,经过一段时间后,戏水区南侧区域水质达到较高海水标准,其他区域多数符合工程需求;换水初期约 15 h,进水口附近局部区域水质变差,受风生流混合以及生物净化作用,48 h 后大部分区域水质恢复工程需求;引调水和换水过程中,水质较差的海水没有影响游客较多的沙滩区域。本研究对含沙量较高的河口海岸地区人工沙滩建设以及其水质净化具有借鉴意义。

参考文献 (References):

- [1] WANG Y Q. The Innovative design of Jinshan City beach project[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2014(7): 93-95. 王永庆. 金山城市沙滩工程创新设计[J]. *水利规划与设计*, 2014(7): 93-95.
- [2] RUAN L F. Seepage prevention design of Shanghai Jinshan City beach reservoir embankment[C]//China Society for Oceanography. Proceedings of the 13th China offshore engineering symposium. Beijing: Ocean Press, 2007. 阮龙飞. 上海市金山城市沙滩水库堤坝防渗设计[C]//中国海洋工程学会. 第十三届中国海洋[岸]工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [3] DU Y C. Discussion on the management of low elevated reclamation and closure technology[J]. *Shanghai Water*, 2015(4): 25-29. 杜运才. 浅议低滩围垦大堤技术管理构建[J]. *上海水务*, 2015(4): 25-29.
- [4] YE W J, CHEN Y Q. Ecological restoration and effective assessment of an artificial lagoon in city beach of Jinshan district in Shanghai[J]. *Fisheries Science*, 2014(12): 794-799. 叶维钧, 陈亚瞿. 上海金山城市沙滩人工潟湖水体生态修复及效果评价[J]. *水产科学*, 2014(12): 794-799.
- [5] YU Z M, SHEN Z L. Eutrophication in Changjiang Estuary and its adjacent waters[M]. Beijing: Science Press, 2011. 俞志明, 沈志良. 长江口水域富营养化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] SUN X, YU D N, ZHAO H, et al. Studies on simulated sewage purification by means of twelve emerging hydrophytes[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2010, 25(2): 62-66. 孙譔, 郁东宁, 赵慧, 等. 12 种挺水植物对模拟污水的净化作用[J]. *北京农学院学报*, 2010, 25(2): 62-66.
- [7] PENG W T, ZOU L, DUAN W B, et al. Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from sewage by various combinations of wetland plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3): 612-617. 彭婉婷, 邹琳, 段维波, 等. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 612-617.
- [8] Danish Hydraulic Institute (DHI). Mike21 & Mike3 Flow Model FM: hydrodynamic and transport module scientific documentation[M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [9] SMAGORINSKY J. General circulation experiment with the primitive equations[J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91(3): 99-164.

Numerical Simulation of Water Quality Purification of Engineering Water Body in the Artificial Beach

LI Xiao-shuang¹, CUI Hai-tao¹, DU Xiao-tao²

(1. *Jining Municipal Hydrology Center*, Jining 272113, China;

2. *Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Company Limited*, Shanghai 200061, China)

Abstract: Because of the affection of natural and artificial factors, the water quality condition of the surface water in some estuary areas is unable to satisfy the people's demands for playing in or being close to the sea. Therefore, how to build and improve a water-quality-type artificial beach has become a problem urgently needed to solve. By taking the water quality of the engineering water body of an artificial beach to be constructed in a coastal city of China as the object of the study and using the MIKE21 software to build a 2D hydrodynamic mathematical model for the engineering area, the distribution and rate of the water exchange in the playing waters of the artificial beach in the study area are analyzed through the calculation of the model. For calculating the effect of water purification, a damping coefficient is introduced in the model calculation in order to present the decrease rate of pollution index. The results show that the overall water exchange rate in the playing waters of the beach can reach to over 60% by 6 times of water change within 30 d. The water changes have small affection on the water quality of the playing waters and after 48 h of the water change the water quality of most parts of the playing waters can recover the engineering requirements. This study could provide a reference for constructing artificial beaches and purifying the water bodies in other estuary areas.

Keywords: artificial beach; engineering water body; water purification; numerical simulation

Received: February 4, 2021