

金梦海湾及其邻近海域水环境因子时空分布特征

匡翠萍¹, 王丹¹, 赵钊¹, 刘会欣², 朱磊²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北省地矿局第八地质大队, 河北秦皇岛 066001)

摘要: 近年来渤海西北部的金梦海湾绿潮等灾害频发, 对周边海域养殖、旅游等造成严重影响。基于 MIKE 21 软件建立金梦海湾水动力和水质数学模型, 模拟和分析氮、磷等主要污染物的时空分布特性, 并结合主成分分析对金梦海湾水质状况进行评价。结果表明, 金梦海湾海域潮流为沿岸往复流, 涨潮西南向, 落潮东北向, 流速较小, 水动力较弱。金梦海湾及其邻近海域水质时空分布规律明显: 在时间尺度上, 丰水期水体污染比平水期和枯水期严重; 在空间尺度上, 水体污染程度整体呈现由河口向外海递减的趋势, 其中汤河口近岸海域污染较严重, 主要污染源为河流输入污染。

关键词: 水环境; 时空分布; 水质评价; 数值模拟; 金梦海湾
中图分类号: X55 **文献标志码:** A

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Water Environmental Factors in Jinneng Bay and Its Adjacent Waters

KUANG Cuiping¹, WANG Dan¹, ZHAO Fan¹, LIU Huixin², ZHU Lei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Eighth Geological Brigade of Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066001, Hebei, China)

Abstract: Jinneng Bay (JNB) is one of the famous bathing beaches in the Bohai Bay. Green tides have occurred in JNB since 2015, which had a serious effect on aquaculture and tourism. Based on the MIKE 21 hydrodynamic and water quality model, the temporal and spatial distribution characteristics of the main pollutants in JNB were simulated and analyzed. A principal component analysis was conducted for assessing the water quality in JNB and its adjacent waters. The results show that the tidal current in JNB is mainly reciprocating

flow along the shore, which is very weak. The current direction was southwest in flood tide and northeast in ebb tide. The variation of temporal and spatial distribution of water quality in JNB is significant. In temporal terms, the water pollution is more serious in the wet season than that the normal season and the dry season. In spatial terms, the pollution is more serious in the estuary than that in the offshore area and the water quality in the Tang estuary is obviously inferior to that in other estuaries. Finally, some suggestions were proposed which would provide reference for further prevention and control of pollution in JNB.

Key words: water environment; temporal and spatial distribution; water quality assessment; numerical simulation; Jinneng Bay (JNB)

秦皇岛是我国渤海海滨著名的旅游度假胜地, 以美丽的海滩、怡人的夏季气候闻名于国内外^[1]。金梦海湾是秦皇岛市重要的滨海浴场, 为了开发旅游资源, 自 2011 年起先后修建了莲花岛和海螺岛 2 座人工岛。随着秦皇岛城市化进程的加快, 陆域污染、沿海排污、外海养殖等对近岸海域生态环境产生较大负面影响, 同时受近岸人工岛的影响, 周边海域水动力环境发生显著变化^[2-4], 致使绿潮等生态灾害不断爆发, 对当地海洋生态环境和社会经济等造成严重影响。

研究近岸海域水质时空分布特征可以为有效削减污染负荷、改善水环境等提供重要的理论参考和数据支持^[5]。不少学者对海湾水质时空分布特征展开了诸多研究。陈晓玲等^[6]根据实测资料, 研究了香港海域叶绿素 a 浓度及其相关水质因子的时空分布规律, 结果表明香港海域东部的半封闭海湾, 赤潮

收稿日期: 2021-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407900); 国家自然科学基金(41976159)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程和河口海岸动力环境。

E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通信作者: 刘会欣(1983—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要研究方向为海洋环境。E-mail: liuhuixin1025@sina.com



论文
拓展
介绍

发生频率较高,西部海域水体交换能力强,赤潮发生频率较低。周畅浩等^[7]研究了大亚湾海域颗粒态氮磷的组成分布及其关键控制因素,结果表明浮游植物生长和径流输入是颗粒态氮磷分布的主要影响因素;梁志宏等^[8]基于水质实测数据,系统分析了深圳湾水质时空分布特征及其污染物主要来源;Zhou等^[9]利用主成分分析和GIS等方法对香港东部海域水环境时空变化进行研究,发现径流污染等对水环境影响较大。Yao等^[10]探讨了胶州湾浮游植物色素及营养盐的时空分布,结果表明春季和夏季胶州湾北部和东部营养盐及浮游色素浓度较高,与人类活动有密切关系。

数学模型能够对污染物的时空分布及输运规律进行数字化、可视化处理,在模拟预测水动力、水环境等方面具有较大的优势^[11-12]。自1925年Streeter和Phelps建立了BOD-DO耦合模型以来,水质模型发展已有近百年历史,陆莎莎等^[13]将水质模型的发展历程分为了3个阶段,第1阶段为简单的氧平衡模型,第2阶段重点研究各水质组分之间的相互作用,第3阶段全面考虑了水沙边界的影响。目前国内水环境模型研究主要关注水动力-水质-水生态耦合模型的应用^[14]。鉴于此,本文基于MIKE 21软件建立金梦海湾及其邻近海域水动力与水质耦合模型,模拟分析金梦海湾主要污染物时空分布特性,在此基础上采用主成分综合得分对金梦海湾及其邻近海域的水质污染状况进行评价,以为该海域环境管理及生态灾害防治提供科学支撑。

1 研究区域概述

研究区域涵盖金梦海湾及其周边海域(见图1)。金梦海湾是秦皇岛市重要的滨海浴场,也是连接北戴河区和海港区的枢纽过度地带。研究区域入海河流自北向南依次为新开河、汤河及新河,3条河流径流量年际变幅较大,并且年内分配很不均匀。新开河流经秦皇岛市区东部,是市区排水的主要河道,于山东侧注入渤海。河道全长11 km,其中主河道长4.05 km,流域面积43.9 km²,多年平均径流量为740×10⁴ m³。汤河上游有两大支流,东支发源于抚宁县柳观峪村西北,西支发源于抚宁县温泉堡西南的方家河村,河道全长28.5 km,流域面积184 km²,多年平均径流量为3.68×10⁷ m³。新河发源于抚宁县栖云寺山东麓,横贯于北戴河森林湿地,河道全长

15 km,河道常年自然淤积,常发生断流现象^[15-16]。

近年来,金梦海湾的人工构筑物建设密度较大,主要的人工建筑物有莲花岛、海螺岛及3座潜堤。其中莲花岛于2011年审批建设,岛屿呈椭圆形布置,长轴约1 650 m,短轴约1 100 m,离岸约1 km;莲花岛北侧近岸海域3座潜堤于2012年建设完工,离岸距离约为380 m,长约360 m;海螺岛2013年底开始建设,离岸约600 m。

秦皇岛海域经过近几年的环境综合治理,水环境得到一定改善,但仍然存在一些突出问题^[17],生态灾害仍未得到有效控制,绿潮、赤潮、水母等海洋生态灾害频发,研究金梦海湾水环境时空分布特征对于海洋环境治理具有重要意义。本文选取的水质指标有化学需氧量COD、溶解氧DO、氨氮NH₃-N、硝酸盐氮NO₃⁻-N、亚硝酸盐氮NO₂⁻-N和磷酸盐PO₄³⁻。

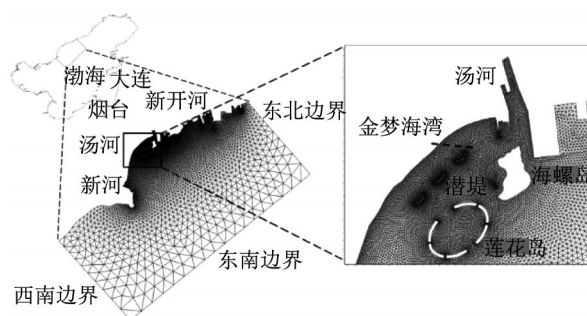


图1 研究区域及模型网格

Fig. 1 Area studied and mesh of model

2 研究方法

2.1 数学模型建立

采用丹麦水力学研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)研发的MIKE 21 Flow Model软件中的水动力模块(HD)和水质模块(ECO Lab)建立金梦海湾海域潮流和水质数学模型^[18]。模型在空间上通过有限体积法进行离散,显示欧拉法求解,具备计算速度快、精度高、易收敛等特点^[19-20]。

2.1.1 基本控制方程

潮流模型的控制方程是在笛卡尔坐标系下,通过对三维连续方程和动量方程沿深度进行积分,得到如下二维浅水方程:

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

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \quad (2)$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + F_u + hu_s S$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \quad (3)$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + F_v + hv_s S$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标; h 为总水深; d 为静止水深; η 为水面高程; u, v 分别为 x, y 方向的水深平均流速; S 为源汇项; u_s, v_s 分别为源/汇在 x, y 方向上的流入/流出速度; f 为科氏力参数; g 为重力加速度; P_a 为大气压力; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的参考密度; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为 x, y 方向水面风剪应力分量; τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向河床切应力分量; F_u, F_v 分别为 x, y 方向水平涡黏应力分量。

ECO Lab模块基本方程如下:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} = F_c + hC_s S + P_c \quad (4)$$

式中: c 为状态变量质量浓度; F_c 为水平扩散项; C_s 为源质量浓度; P_c 为状态变量的生化反应过程。

2.1.2 计算网格及模型参数

模型平面坐标系选用北京 54 坐标系, 采用非结构三角网格进行计算(见图1)。模型共有 13 431 个节点和 25 585 个单元, 权衡计算精度及计算时间, 对河口海岸区进行网格加密, 网格空间步长最小为 10 m, 对外海区域采用稀疏网格, 网格空间步长最大为 2 500 m。

潮流模型中涡黏系数采用 Smagorinsky 方程来计算, 其中常数取 0.28。模型采用动边界处理技术, 干水深、淹没水深和湿水深分别取 0.005 m、0.05 m 和 0.1 m。时间步长由模型自动调节, 为 0.01 ~ 30 s。曼宁数根据底部泥沙粒径和水深分布取值 $74 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水质模型率定参数较多, 由于篇幅所限, 这里仅罗列部分参数取值, COD 一阶降解速率为 0.02 d^{-1} , 硝化反应速率 0.01 d^{-1} 。

2.1.3 边界条件

数学模型包含 3 条外海开边界、3 个人海河流开边界以及陆域岸线闭边界。水动力模型的 3 条外海开边界由 Flather 条件控制, 其潮位和流速过程由渤海潮流模型(边界为大连至烟台)提供, 入海河流上

游开边界由实测月平均流量进行控制。水质模型的外海开边界为本底污染物质量浓度, 河流开边界均为实测污染物质量浓度值, 文中 COD 质量浓度为 COD_{Mn} 。初始水位和流速均为零, 初始污染物质量浓度设定为 2018 年 3 月实测污染物质量浓度均值。陆域闭边界采用不可滑移条件, 即流速为零。

2.2 模型验证

2.2.1 水动力模型验证

对金梦海湾潮流模型分别进行潮位和潮流验证, 验证点位置如图 2 所示。潮位验证(QHD 点)采用 2017 年 9 月 5—7 日实测潮位过程, 潮流验证(S1-S3 点)采用 2013 年 5 月 11 日 8:00 至 5 月 12 日 8:00 实测潮流过程, 潮流验证(S4 点)采用 2017 年 9 月 6 日 0:00 至 9 月 7 日 0:00 实测潮流过程。验证结果如图 3 所示, 从验证结果可以看出, 计算的潮位、流速和流向与实测值吻合较好, 部分计算值与实测值略有偏差, 这主要是由于秦皇岛近岸海域地形复杂, 且位于无潮点附近, 潮波变化复杂, 但总体上模型能较好地模拟出金梦海湾近岸海域水动力变化特征。

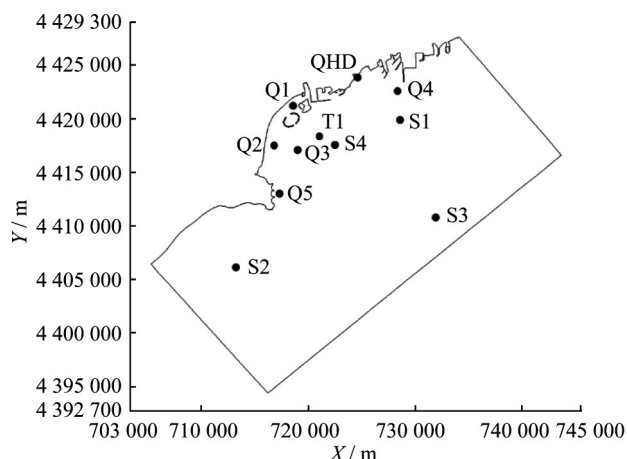


图2 模型验证点位及 T1 分析点位置

Fig. 2 Location of verified stations and T1

2.2.2 水质模型验证

水质模型验证资料采用 2018 年 3 月 13 日在金梦海湾(Q1-Q5 点)5 个站点的实测 DO 质量浓度和 2018 年 8 月 21 日在金梦海湾(Q1-Q3 点)3 个站点的实测水质因子质量浓度(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 PO_4^{3-})。验证点位置及水质验证结果分别见图 2 和图 4, 其中站点 Q2 和 Q3 磷酸盐 PO_4^{3-} 质量浓度为二类海水水质标准, 实测值均小于 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。验证结果表明, 计算值与实测值相对误差较小, 造成误差的主要原因可能是站点监测时间不同步, 未考虑其他海上临时性污染源等。总体上, 模型能较好地模

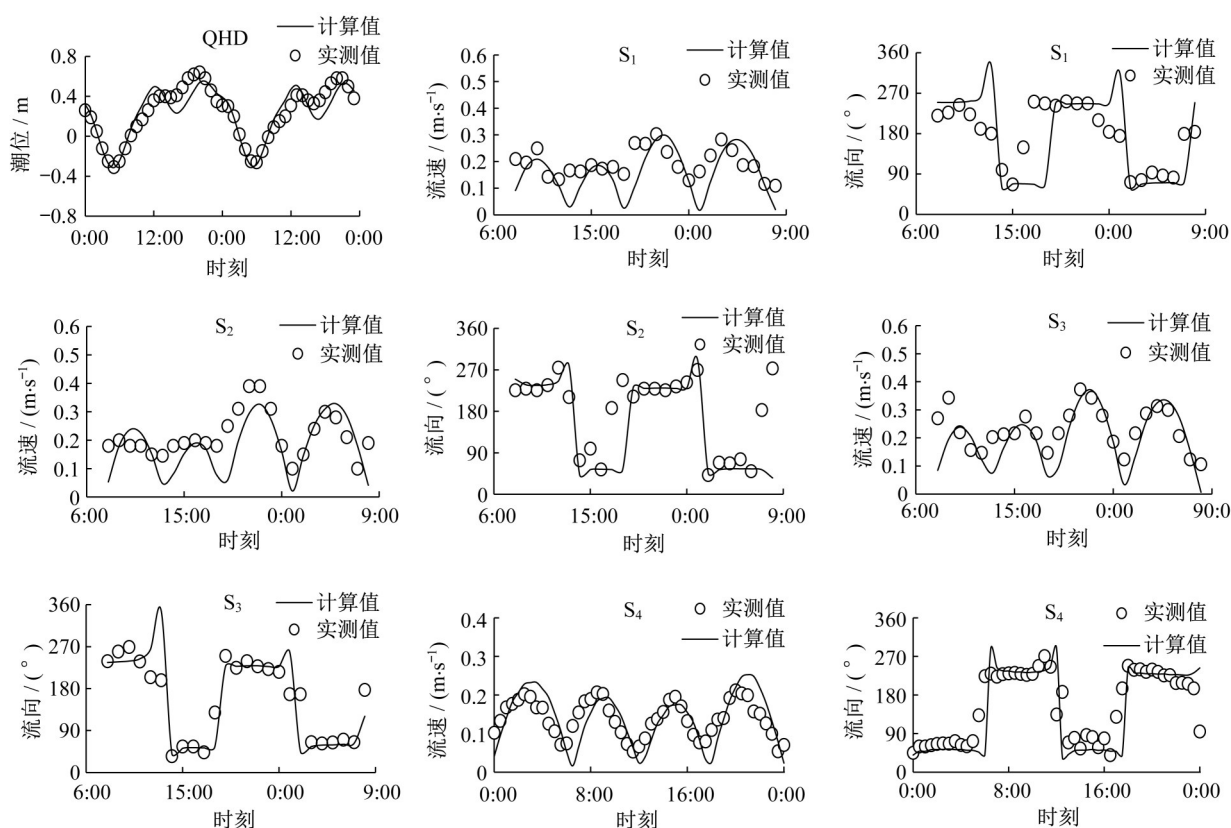


图 3 潮位和流速、流向验证

Fig. 3 Verification of tidal level, current velocity, and current direction

拟金梦海湾及其邻近海域的水质变化, 可以用于金梦海湾及其邻近海域水动力水质模拟。

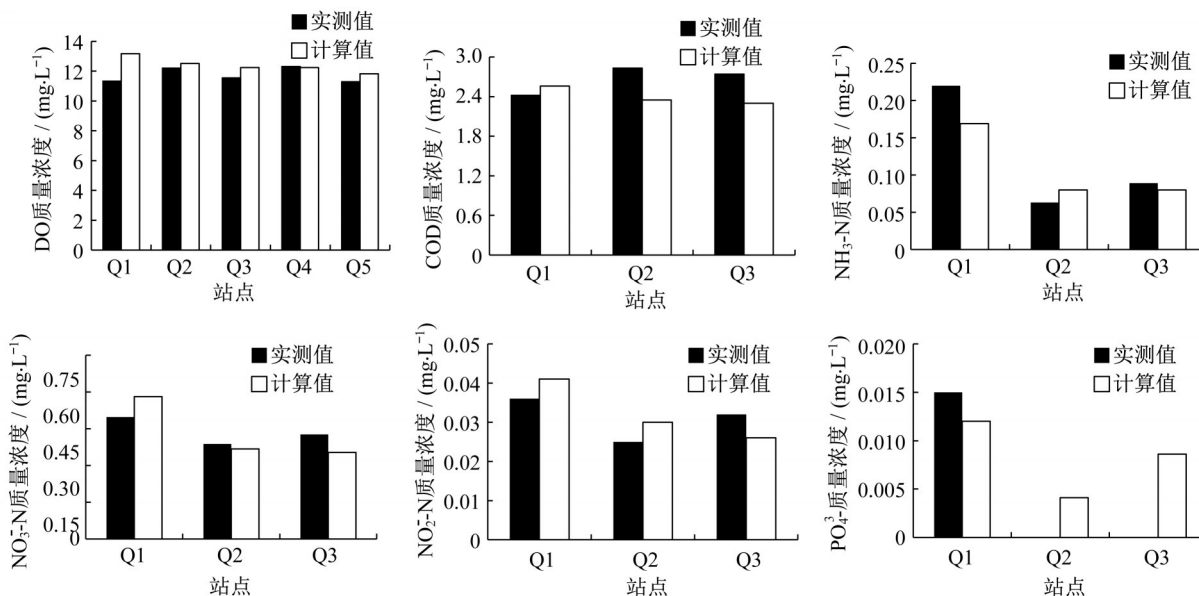


图 4 近岸海域污染物质量浓度验证

Fig. 4 Verification of pollutant concentration in coastal waters

2.3 主成分分析

主成分分析方法是多个具有相关性的变量转化成少数几个不相关的综合指标的分析与统计方

法, 其中主成分保留了原始变量的大多数信息, 这样能够简化复杂的研究, 提高分析效率。主成分分析的一般步骤为: 首先将原始数据标准化, 建立变量的

相关系数矩阵,再计算相关系数矩阵的特征值和特征向量以及各主成分的贡献率和累积贡献率,在此基础上确定主成分个数,最后求出主成分综合得分。本文以主成分综合得分研究金梦海湾及其邻近海域水质指标的时空变化格局,并分析其影响因素^[21-25]。

3 结果与讨论

3.1 潮流特征

金梦海湾及其邻近海域典型时刻(涨急、涨憩、

落急和落憩)潮流场如图5所示。涨急、落急时刻,近岸海域潮流流速略小于外海流速,近岸流速约为 $0.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,外海流速约为 $0.40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中汤河口人工岛群周边海域流速较小,约为 $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于岬角效应,金山嘴附近流速大且流向偏转较大。涨憩和落憩时刻,潮流流速较小,从外海向河口海域递减。总体而言,研究海域潮流流速较小,水动力较弱,潮流呈现明显的沿岸往复流运动,涨潮流方向为从NE(东北)向SW(西南),落潮流方向为从SW向NE,涨潮流略强于落潮流。

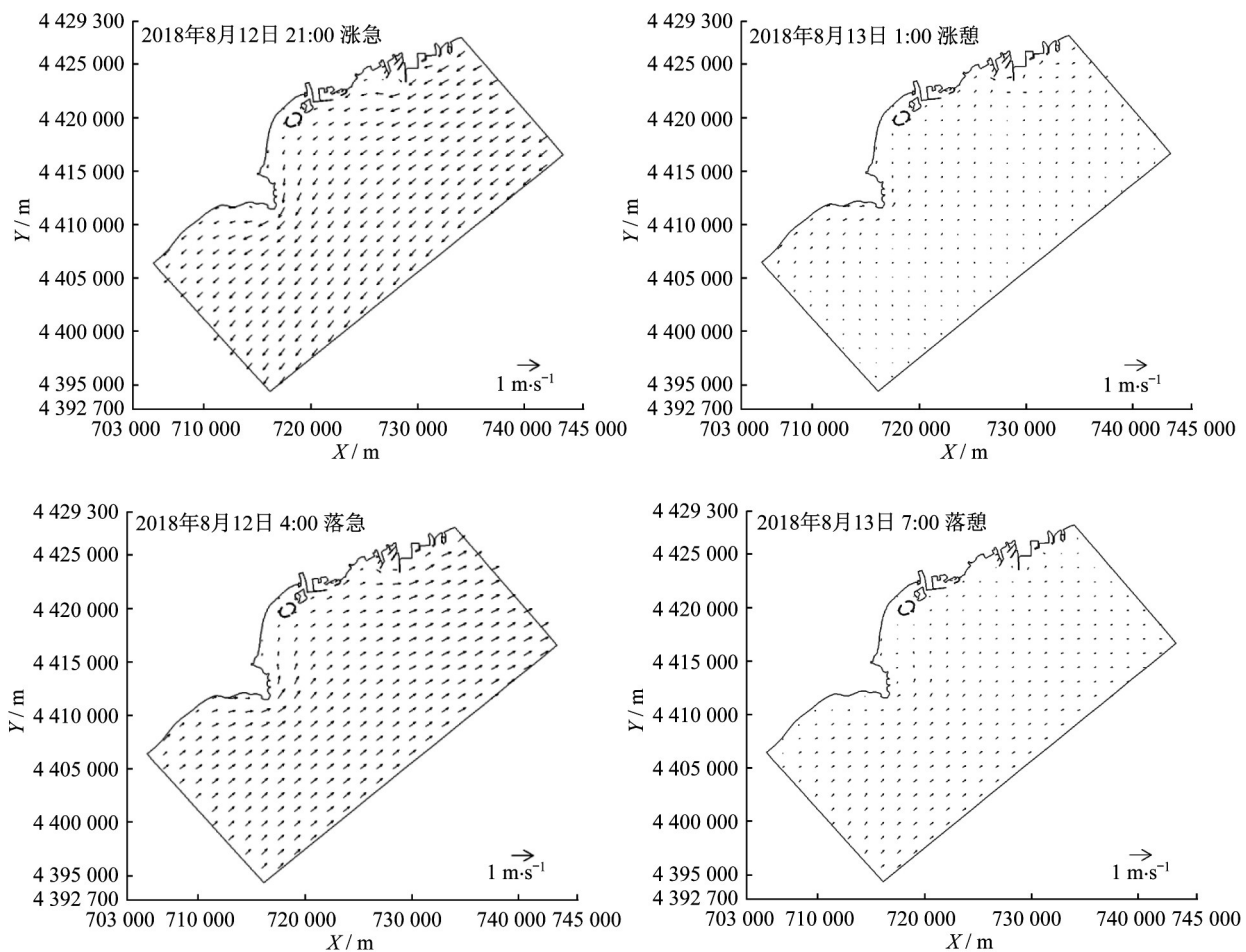


图5 金梦海湾及其邻近海域典型时刻潮流场

Fig. 5 Typical current fields in JMB and its adjacent waters

3.2 污染物时空分布特征

基于验证良好的MIKE 21水动力水质耦合模型,对2018年3月至8月金梦海湾及其邻近海域污染物变化情况进行模拟分析。

3.2.1 污染物季节性变化特征

根据模型的计算结果,在近岸海域选取分析点T1(位置见图2),不同月份污染物浓度变化如图6。

COD是水体污染的主要参数之一,反映了水体

受还原性物质污染的程度^[26]。由图6a可见,4月份COD质量浓度较高,这可能也与浮游植物的生长有关,相关研究表明,渤海的浮游植物量在春秋两季相对较高,浮游植物的死亡及排泄作用加强,导致COD质量浓度升高^[27-28]。COD质量浓度季节变化高峰出现在7月,这与丰水期河流携带泥沙同时伴随大量有机物进入近岸海域有关。DO反映了生物生长和环境质量状况,是海水中各种物理、化学、生

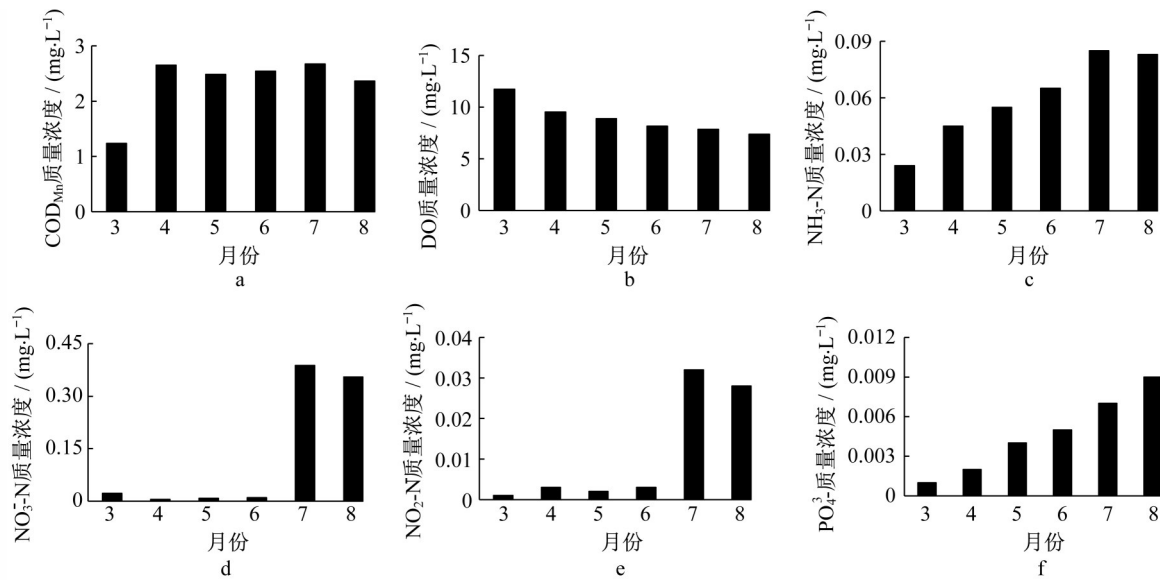


图 6 近岸海域不同污染物质量浓度月际变化

Fig. 6 Monthly variation of different pollutant concentrations in coastal water

物过程的重要参数^[29-30]。DO 质量浓度呈下降趋势, 这主要和温度及有机物耗氧分解等有关。3 月份水温低, 氧气溶解度较大, 同时有机物耗氧速率较低, 因此 3 月份 DO 质量浓度最高。海水中的溶解性无机氮 (DIN) 是浮游植物的主要营养盐之一, 由 NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 三部分组成, 影响氮营养盐的因素较多, 其季节变化机制较复杂^[31]。从图 6 c-6 e 可以看出, 金梦海湾各种形态氮浓度存在明显的季节变化, 3~6 月 NH₃-N 为 DIN 的主要形态, 7~8 月 NO₃⁻-N 含量较高, 由于 NO₂⁻-N 极不稳定, 水体中含量较低。磷酸盐也是海域环境主要污染物之一, 金梦海湾 PO₄³⁻ 含量呈上升趋势, 其影响因素也较为复杂, 陆源排放、底泥释放等都有可能

3.2.2 污染物空间分布特征

图 7~12 为 2018 年 8 月 12 和 13 日涨落急时刻污染物浓度分布图, 从空间分布上可以看出, 近岸海域污染物浓度场随潮流呈周期性变化, 河流污染物排入近岸海域后, 高浓度区主要集中在河口近岸海域, 随涨潮流向 SW 方向运移, 随落潮流向 NE 方向运移。COD 质量浓度分布由近岸向外海递减, 并且近岸海域质量浓度梯度较外海大。DO 质量浓度由近岸向外海呈现出先减后增的趋势, 其影响因素较为复杂, 其中河口低氧区的形成主要与人类活动有关。氮磷营养盐的空间分布呈现出汤河口人工岛群周边海域营养盐浓度明显高于其他河口区域, 这可能与汤河口海域接受的陆源污染负荷更大有关, 另一方面工程改变了周边海域水动力环境, 水体交换能力降低, 导致对污染物的混合及稀释能力降低。

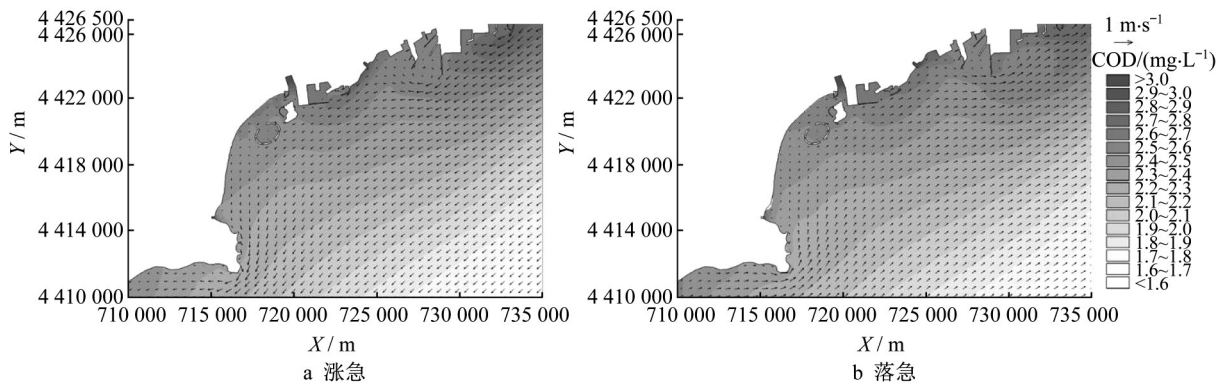


图 7 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻 COD 质量浓度分布

Fig. 7 Spatial distribution of COD concentration at maximum flood and ebb

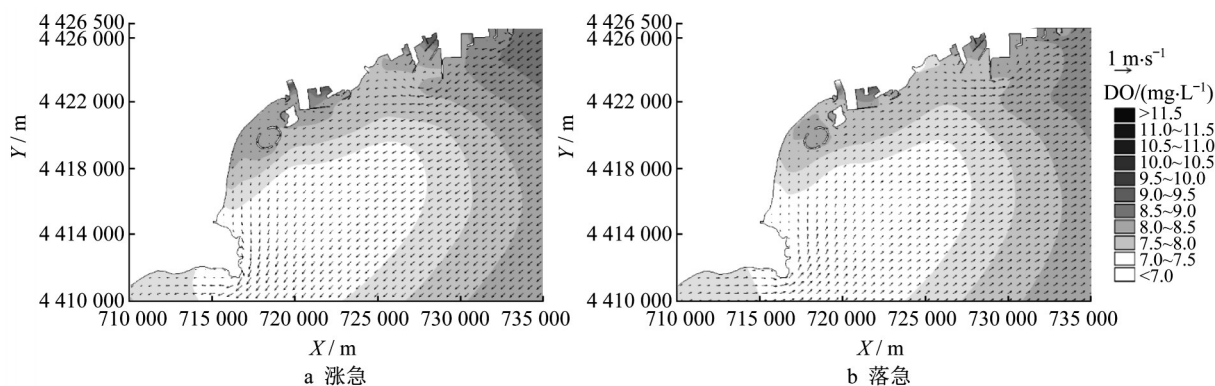
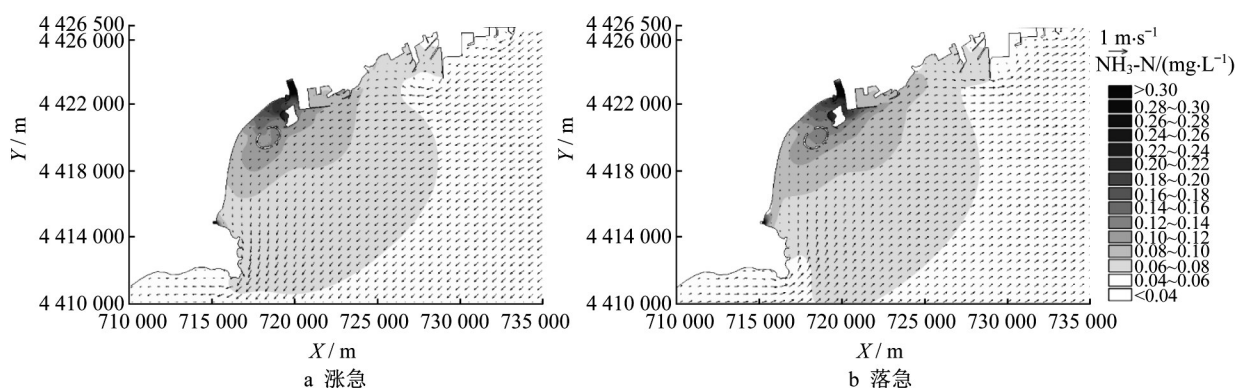
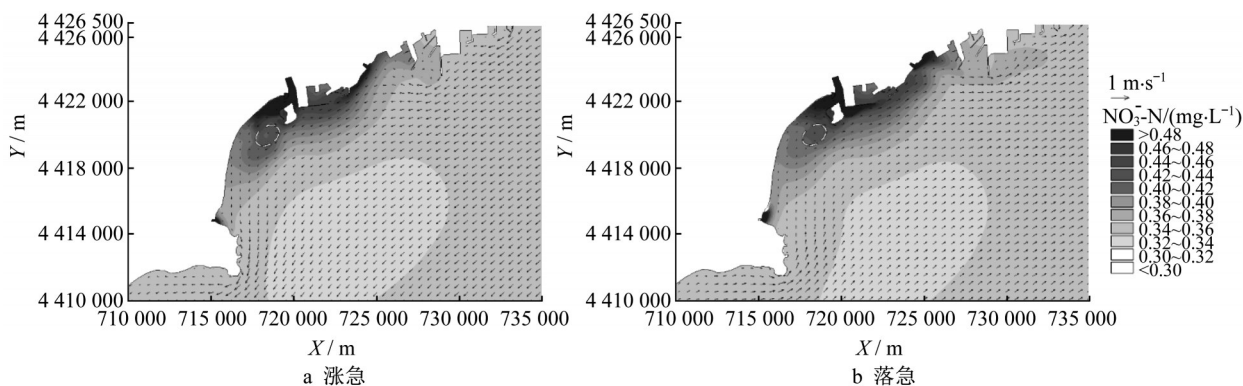


图8 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻DO质量浓度分布

Fig. 8 Spatial distribution of DO concentration at maximum flood and ebb

图9 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度分布Fig. 9 Spatial distribution of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration at maximum flood and ebb图10 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度分布Fig. 10 Spatial distribution of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration at maximum flood and ebb

3.2.3 主成分综合得分分析

基于数学模型计算结果,选取35个站点(见图13)3月、5月和8月各水质指标的月均值进行主成分综合得分分析,其中3月代表枯水期、5月代表平水期、8月代表丰水期。采用SPSS软件进行分析,结果显示,KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验值为0.703(大于0.50),Bartlett球形检验值为0(小于0.05),表明变量间不相互独立,符合主成分分析要求。经过

计算,根据特征根大于1的原则提取了2个主成分,累计方差贡献率为89.443%,说明这2个主成分能够反应全部数据的大部分信息。

为反映金梦海湾及其邻近海域的水质状况,通过计算不同季节主成分综合得分并构建时空分布图(见图14)来评估污染水平,主成分综合得分越大,水质污染状况越严重。经过计算,3月、5月和8月主成分综合得分中位数分别为-1.4、-0.2和1.5,金梦

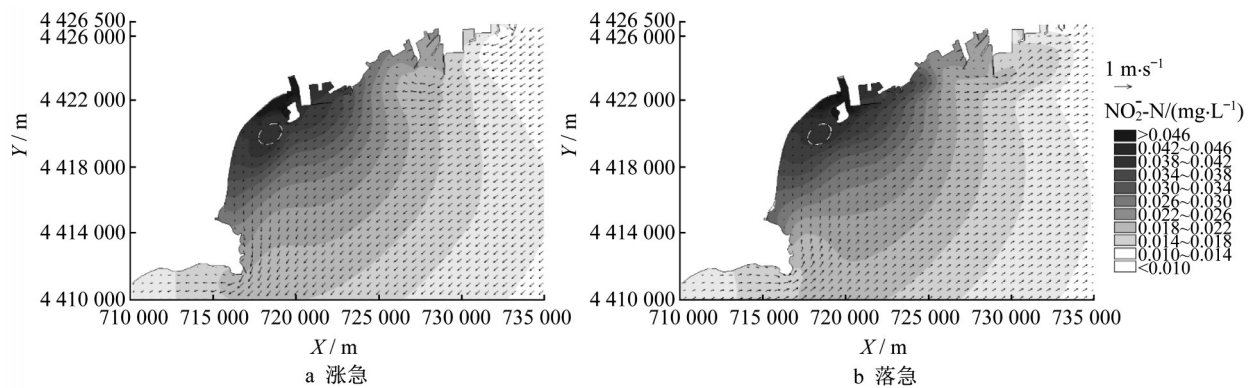


图 11 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度分布

Fig. 11 Spatial distribution of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration at the maximum flood and ebb

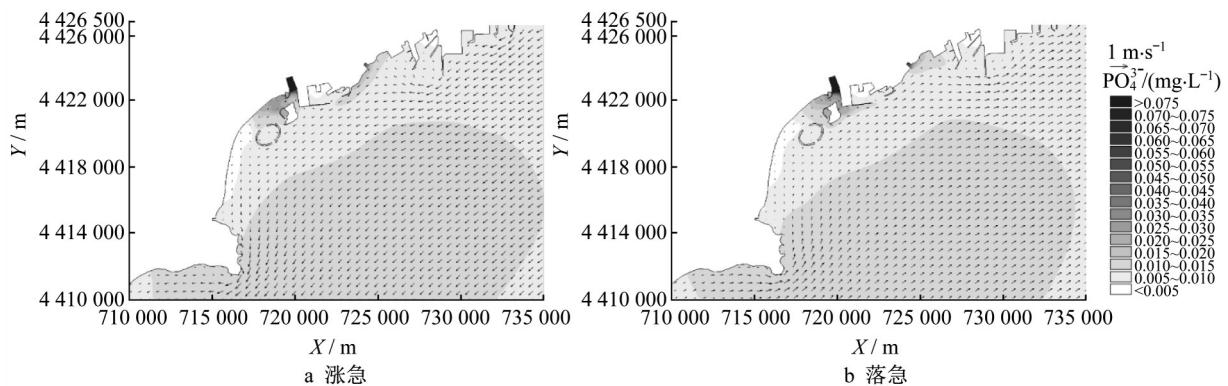


图 12 金梦海湾及其邻近海域涨落急时刻 PO_4^{3-} 质量浓度分布

Fig. 12 Spatial distribution of PO_4^{3-} concentration at maximum flood and ebb

海湾及其邻近海域 8 月水质污染最严重, 3 月污染较轻, 这与陆源排污和降水有直接关系, 秦皇岛每年 7、8 月进入主汛期, 大量农田化肥、生活垃圾等随雨水汇入河流, 入海河流污染物浓度升高, 造成近岸海域水体污染严重。另一方面, 也与海域内浮游植物的种类、密度和分布等有一定的关系, 丰水期比枯水期水温高, 近岸河口区光照充足, 浮游植物生长代谢旺盛, 消耗大量氧气, 同时浮游植物残骸及代谢产物等被分解为营养盐加剧海域水质污染。

不同时期主成分综合得分空间分布图可以直观展示金梦海湾及其邻近海域水质状况 (见图 14), 受海水温度、陆源排放及海洋潮汐等影响, 近岸海域水质综合得分有明显的空间变化特征。从区域上看, 平水期新河近岸海域水质污染状况较严重, 枯水期和丰水期汤河口海域水质污染状况最严重。从总体上看, 河口水域水质污染较严重, 主成分综合得分呈现出由近岸向远海逐渐减小的趋势, 进一步表明金梦海湾及其邻近海域污染物主要来自陆源径流的输

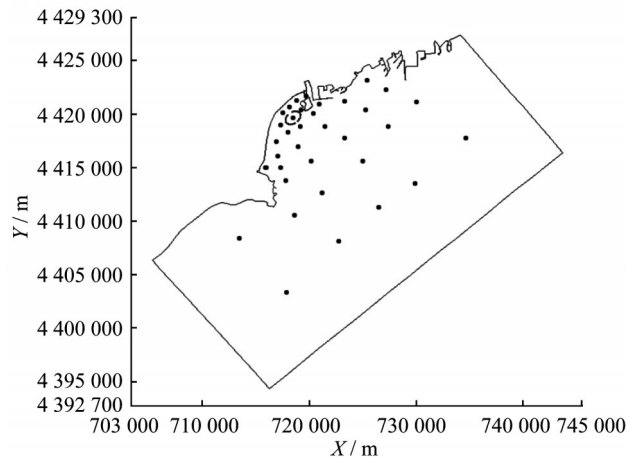


图 13 分析点位置图

Fig. 13 Location of analysis points

入, 因此改善近岸海域水环境必须从源头控制, 减少河流向海洋的污染输入, 治海先治河、治河先治水、治水先治污。另一方面, 汤河口人工岛群的建设对周围海域的生态环境产生一定的影响, 原有的水动力条件发生改变, 因此, 海岸工程在规划设计时要充分考虑多个工程开发的综合影响以及对水

动力环境影响的叠加效应。

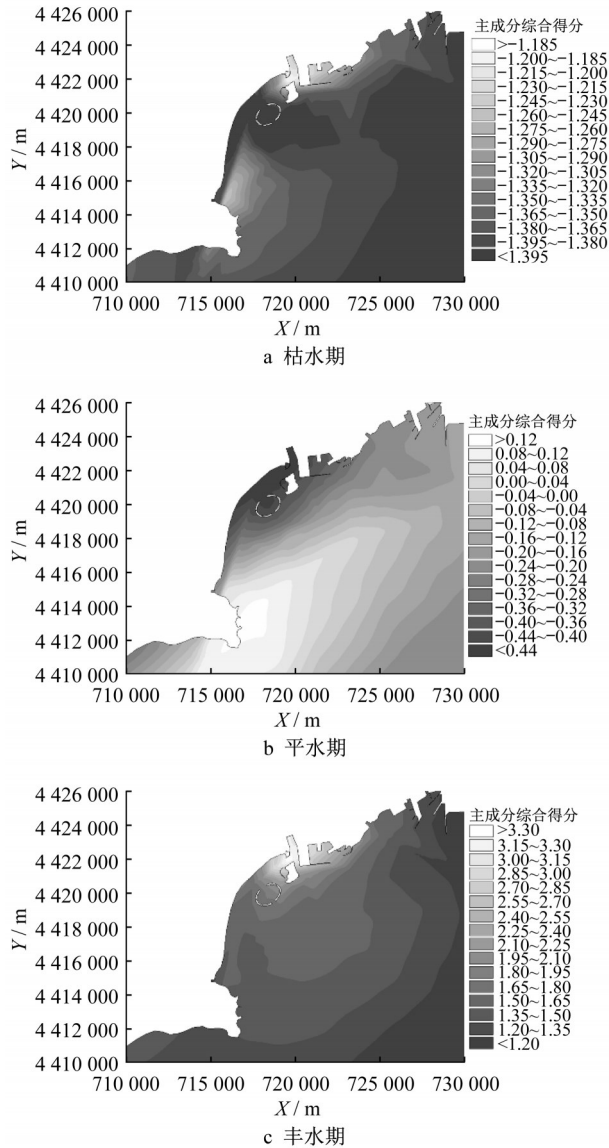


图14 不同季节主成分综合得分空间分布

Fig. 14 Spatial distributions of comprehensive scores of principal components in different seasons

4 结论

(1)金梦海湾近岸海域潮流流速较小,水动力较弱,潮流总体特征为沿岸往复流,涨潮西南向,落潮东北向。污染物浓度随潮流呈周期性变化,涨潮向西南向输运,落潮向东北向输运。

(2)应用主成分综合得分评价了金梦海湾及其邻近海域的水质污染状况,在时间尺度上,丰水期水质劣于平水期和枯水期;在空间尺度上,水质污染程度整体表现为从外海向河口逐渐加重的趋势,空间

分布特征反映了金梦海湾水质污染的主要驱动因素来自陆源污染,近岸海域工程、潮流动力等控制了污染物在海域的迁移扩散。

(3)汤河口近岸海域潮流动力较弱且工程较密集,建议进一步加强汤河等河流的水质监测和污染防治工作,加大河流污染治理力度,防止金梦海湾及其邻近海域水质进一步恶化,减少生态灾害。

作者贡献说明:

匡翠萍:项目负责人,论文撰写及修改。

王丹:数据分析,论文撰写及修改。

赵钊:数值模拟。

刘会欣:现场实测。

朱磊:现场实测。

参考文献:

- [1] 曹西华,俞志明,宋秀贤,等. 秦皇岛入海河流的污染水平、排放特征及对褐潮暴发区生源要素的影响[J]. 海洋与湖泊, 2017,48(5):970.
CAO Xihua, YU Zhiming, SONG Xiuxian, *et al.* Pollution and discharge from tributaries to the sea along Qinhuangdao coast: Impact on the bioactive elements related to brown tide outbreak [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(5):970.
- [2] 陆敏. 人工岛对海湾水环境影响的数值研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
LU Min. Numerical study of the impact of water environment by artificial island in the gulf [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [3] 匡翠萍,俞露露,顾杰,等. 人工岛对金梦海湾水体交换的影响[J]. 中国环境科学,2019,39(2):757.
KUANG Cuiping, YU Lulu, GU Jie, *et al.* Influences of artificial island on water exchange of Jinmeng Bay [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(2):757.
- [4] ZHAO Q, LONG S Q, YANG Y F, *et al.* A study of impact of the reclamation and artificial island projects on tidal currents and sediment concentration in radial sand ridge field of the South Yellow Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 17(1):71.
- [5] 奚珊珊,周春财,刘桂建,等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. 环境科学,2016,37(2):542.
XI Shanshan, ZHOU Chuncai, LIU Guijian, *et al.* Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2016,37(2):542.
- [6] 陈晓玲,李毓湘,李志林. 香港海域叶绿素-a浓度的时空分布规律[J]. 地理学报,2002(4):422.
CHEN Xiaoling, LI Yuxiang, LI Zhilin. Spatio-temporal distribution of chlorophyll-a concentration in Hong Kong's

- coastal waters [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002(4):422.
- [7] 周畅浩,张景平,黄小平,等. 大亚湾颗粒态氮磷的时空分布、关键影响因素及潜在生态意义[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(5):696.
ZHOU Changhao, ZHANG Jingping, HUANG Xiaoping, *et al.* Distribution, key controlling factors and potential ecological role of particulate nitrogen and phosphorus in Daya bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(5):696.
- [8] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4):93.
LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis [J]. *Water Resource Protection*, 2020, 36(4):93.
- [9] ZHOU F, HUANG G H, GUO H C, *et al.* Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, 41(15):3429.
- [10] YAO P, YU Z G, DENG C M, *et al.* Spatial - temporal distribution of phytoplankton pigments in relation to nutrient status in Jiaozhou Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 89(3):234.
- [11] 曹慧群,赵鑫. 流域水环境数值模拟技术应用及研究展望[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(6):20.
CAO Huiqun, ZHAO Xin. Overview and applications of simulation models for basin water environment [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(6):20.
- [12] 刘桦,吴卫,何友声,等. 长江口水环境数值模拟研究——水动力数值模拟[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2000(1):17.
LIU Ye, WU Wei, HE Yousheng, *et al.* Studies on numerical modeling of water environment in the Yangtze estuary-numerical simulation of hydrodynamic flows [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2000(1):17.
- [13] 陆莎莎,时连强. 水质模型研究发展综述[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1):78.
LU Shasha, SHI Lianqiang. A review of research development about water quality model [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(S1):78.
- [14] 李一平,施媛媛,姜龙,等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. *水资源保护*, 2019, 35(4):1.
LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, *et al.* Advances in surface water environment numerical models [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(4):1.
- [15] 马世杰. 秦皇岛陆源污染入海监测体系的建立与应用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
MA Shijie. Study on establishment and application of monitoring system for terrigenous pollution entering the sea in Qinhuangdao [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [16] 杨爽. 秦皇岛市汤河流域治理中的河长制运用与完善研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018.
YANG Shuang. Study on the application and improvement of river governor system in Tanghe watershed in Qinhuangdao city [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [17] 张佳林,曹西华,宋秀贤. 秦皇岛近海环境综合整治后主要入海河流的水质变化调查分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(4):7.
ZHANG Jialin, CAO Xihua, SONG Xiuxian. Investigation and analysis of changes in water quality of major seaward rivers after comprehensive improvement of the offshore environment in Qinhuangdao [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(4):7.
- [18] DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL Hydrodynamic and transport module science documentation [M]. Denmark: DHI Water&Environment, 2013.
- [19] 顾杰,钱从锐,梁慧迪,等. 曹妃甸海域化学需氧量(COD)的季节性分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(4):578.
GU Jie, QIAN Congrui, LIANG Huidi, *et al.* Seasonal and spatial distribution of chemical oxygen demand (COD) in Caofeidian sea area [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(4):578.
- [20] 匡翠萍,董智超,顾杰,等. 岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6):769.
KUANG Cuiping, DONG Zhichao, GU Jie, *et al.* Influence of beach nourishment project on water exchange in headland-bay coast [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(6):769.
- [21] 褚帆,刘宪斌,刘占广,等. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析[J]. *海洋通报*, 2015, 34(1):107.
CHU Fan, LIU Xianbin, LIU Zhanguang, *et al.* Eutrophication assessment and principal component analysis of the Tianjin coastal waters [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(1):107.
- [22] 赵自阳,李王成,王霞,等. 基于主成分分析和因子分析的宁夏水资源承载力研究[J]. *水文*, 2017, 37(2):64.
ZHAO Ziyang, LI Wangcheng, WANG Xia, *et al.* Study on water resources carrying capacity in Ningxia based on principal component analysis and factor analysis [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(2):64.
- [23] 刘潇,薛莹,纪毓鹏,等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10):3187.
LIU Xiao, XUE Ying, JI Yupeng, *et al.* An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10):3187.
- [24] 张广帅,闫吉顺,张全军,等. 基于主成分分析法近岸海水环境质量与空间异质性研究——以庄河港近岸海域为例[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(2):244.
ZHANG Guangshuai, YAN Jishun, ZHANG Quanjun, *et al.* Study on the seawater quality and its spatial heterogeneity based on principle component analysis: A case study nearshore of Zhuanghe port [J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39

- (2):244.
- [25] PERKINS R G, UNDERWOOD G J C. Gradients of chlorophyll a and water chemistry along an eutrophic reservoir with determination of the limiting nutrient by in situ nutrient addition [J]. *Water Research*, 2000, 34(3):713.
- [26] 杨婉玲, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 珠江中下游表层水体 COD_{Mn} 时空分布特征及水环境评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4):643.
YANG Wanling, LAI Zini, ZENG Yanyi, *et al.* Spatio-temporal characteristics of COD_{Mn} in surface waters of middle and downstream of the Pearl River and water environment evaluations [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4):643.
- [27] 高璞, 梁书秀, 孙昭晨. 渤海 COD 分布特征季节变化的数值模拟[J]. *海洋湖沼通报*, 2009(3):24.
GAO Pu, LIANG Shuxiu, SUN Zhaochen. Numerical simulation on the seasonal change of COD distribution in the Bohai Sea [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009(3):24.
- [28] 陈涵贞, 苏德森, 吕新, 等. 闽江流域地表水质季节性变化特征研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(5):267.
CHEN Hanzhen, SU Desen, LV Xin, *et al.* Seasonal changes of surface water in Minjiang River [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(5):267.
- [29] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(1):51.
YANG Lina, LI Zhengyan, ZHANG Xueqing. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuarine zone of the Daliaohe River [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):51.
- [30] 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等. 大沽河口底层海水溶解氧浓度分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(9):23.
LI Zhaoqin, LI Xin, SUN Liyuan, *et al.* Analysis of the dissolved oxygen concentration in bottom of seawater in the estuary of Dagu River [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(9):23.
- [31] 张晋华, 于立霞, 姚庆祯, 等. 不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J]. *环境科学*, 2014, 35(2):569.
ZHANG Jinhua, YU Lixia, YAO Qingzhen, *et al.* Mixing behavior of nutrients in different seasons at Liaohhe estuary [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):569.
- [32] 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 等. 南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(11):3748.
SHU Fengyue, LIU Yupei, ZHAO Ying, *et al.* Spatio-temporal distribution of TN and TP in water and evaluation of eutrophic state of Lake Nansi [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11):3748.
- [33] 彭璇, 马胜伟, 陈海刚, 等. 夏季柘林湾-南澳岛海洋牧场营养盐的空间分布及其评价[J]. *南方水产科学*, 2014, 10(6):27.
PENG Xuan, MA Shengwei, CHEN Haigang, *et al.* Spatial distribution and assessment of nutrients in marine ranching in Zhelin Bay-Nanao Island in summer [J]. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(6):27.

(上接第 833 页)

- [9] LI V C, WU C, WANG S, *et al.* Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. *Materials Journal*, 2002, 99(5): 463.
- [10] LI V C, WANG S. Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams [J]. *Materials Journal*, 2002, 99(1): 11.
- [11] 王必元. ECC 力学性能及其增强钢筋/FRP 筋——混凝土复合梁受弯性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
WANG Biyuan. Study on ECC mechanical properties and bending performance of concrete composite beams reinforced with steel bars or FRP bars [J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [12] 陈俊钰. 钢筋和 FRP 筋混合配筋增强 ECC-混凝土复合梁受弯性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
CHEN Junyu. Study on the flexural behavior of ECC-concrete composite beams hybrid reinforced steel bar and FRP bar [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [13] GE Wenjie, ASHOUR A F, CAO Dafu, *et al.* Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars [J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 454.
- [14] GE Wenjie, ASHOUR A F, YU Jiamin, *et al.* Flexural Behavior of ECC - Concrete Hybrid Composite Beams Reinforced with FRP and steel bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 23(1): 04018069.
- [15] YUAN Fang, PAN Jinlong, LEUNG C K Y. Flexural behaviors of ECC and concrete/ECC composite beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(5): 591.
- [16] FISCHER G, LI V C. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC) [J]. *Structural Journal*, 2002, 99(1), 104.
- [17] MORENO D M, TRONO W, JEN G, *et al.* Tension stiffening in reinforced high performance fiber reinforced cement-based composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 50: 36.
- [18] WANG Yichao, WEI Linzhao, YU Jiangtao, *et al.* Mechanical properties of high ductile magnesium oxychloride cement-based composites after water soaking [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 97:248.
- [19] American Concrete Institute Committee 440. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures; ACI440.3R-04 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2004.