朱雨晨,林建伟. 养殖尾水排放对诏安湾营养盐分布影响的数值模拟研究[J]. 渔业研究, xxxx, xx(x): 1 – 11. Zhu Y C, Lin J W. Numerical simulation study on the effect of aquaculture tailwater discharge on nutrient salt distribution in Zhao'an Bay, Fujian Province[J]. Journal of Fisheries Research, xxxx, xx(x): 1 – 11.

养殖尾水排放对诏安湾营养盐分布影响的 数值模拟研究



朱雨晨,林建伟*

(福建省水产研究所,福建省海洋生物增养殖与高值化利用重点实验室,福建厦门361013)

摘要:【背景】合理的海湾利用,将有力助推中国海洋经济的繁荣发展。【目的】了解养殖尾 水排放对诏安湾内营养盐分布的影响。【方法】本研究选取 2022 年 9 月诏安湾水文观测资 料,结合 2022 年 4 月对诏安湾周边养殖排放口的调查数据,对湾内排水口主要营养盐排放 后的迁移进行模拟。【结果】1)氨氮(NH⁺₄-N)的涨落潮变化:涨潮时,NH⁺₄-N在湾内聚 集,浓度稳定在 0.03~0.30 mg/L之间;落潮时,NH⁺₄-N浓度在湾内东、西两侧显著上升,一 般为 0.10~0.30 mg/L。2)总氮(TN)的涨落潮变化:涨潮时,TN浓度在湾中北部及八尺门 以西区域高达 0.30~1.00 mg/L;随着潮位升高,其浓度普遍下降,但在西北侧海域仍保持较 高水平。落潮时,TN浓度上升,主要集中在湾西北侧的浅水区。3)总磷(TP)的涨落潮 变化:涨潮时,TP浓度在湾中北部及八尺门以西区域达到 0.15~0.30 mg/L。落潮时,TP浓 度上升集中在湾西北侧的浅水区,浓度总体较高,尤其在海湾东、西两侧的近岸海域,与 TN情况一致。【结论】NH⁺₄-N、TN 和 TP 的迁移主要受诏安湾潮流控制,潮流涨落决定其 湾内分布与浓度变化。3 种营养盐高浓度主要分布在诏安湾东、西两侧水深小的近岸海域。 关键词:养殖水体;诏安湾;模型模拟;涨落潮

中图分类号: S932.2; P76 文献标识码: A 文章编号: 2096-9848(xxxx)00-0001-11

海洋对地球生态系统具有极其重要的价值,它 是地球上最大的生态系统,覆盖了 71% 的地球表 面,占地球生物多样性的 80%。海洋不仅是自然界 的瑰宝,更是人类的粮仓,为全球提供了诸如鱼类 和贝类等丰富的食物资源,构成了众多国家经济发 展的关键支柱^[1]。中国坐拥广阔的海域资源,其开 发潜力不可小觑,合理的海域利用,将有力助推中 国海洋经济的繁荣发展。作为全球首屈一指的水产 养殖大国,中国连续多年位居全球海水养殖面积与 产量的榜首^[2]。中国在 2022 年贡献了约 36% 的全 球渔业和水产养殖业的产量^[3]。近岸海域养殖业的 发展,不仅促进了沿海地区经济的繁荣,显著提升 了当地居民的收入水平,同时也带来了环境挑战。 高密度、集约化的海水养殖模式导致大量未经处理 的养殖尾水被直接排放,而尾水中残留的饵料、渔 药等物质使水质复杂化,营养盐浓度升高,对近岸 海域的氮磷水环境达标构成了严峻压力^[4-5]。近岸 海水池塘养殖中,生物代谢及饲料使用会使养殖尾 水含大量氮、磷等营养盐,加速提升海湾水体营养 盐水平^[6-7]。张玉凤等^[8]对2012年夏、秋季大连湾 海域进行观测,揭示该海域呈磷限制、富营养化且 初级生产力高。葛明等^[9-10]研究了1980年—2000 年间胶州湾氮、磷营养盐循环收支动力学模型。史 华明等^[11]发现2000年—2012年深圳湾在陆源输

收稿日期: 2024-07-31 修回日期: 2024-12-24

基金项目: 福建省属公益类科研院所基本科研专项(2022R1013006)

第一作者:朱雨晨,男,研究实习员,硕士,研究方向为海洋环境。E-mail: 540713571@qq.com

通信作者:林建伟,男,助理研究员,研究方向为海湾河口水动力环境。E-mail: linjw_fjfri@126.com

^{©《}渔业研究》编辑部。本文为使用 CC BY-NC-ND 4.0 许可协议的开放获取作品。

[©] Editorial Office of Journal of Fisheries Research. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

人减少的情况下,富营养化已得到控制。吴敏兰^[12] 调查显示,2011年北部湾北部海域由氮限制转为 磷限制,处于中度营养状态。这些成果不仅揭示近 岸海域生态复杂性,也凸显合理规划管理的紧迫性。

为解决养殖尾水排放对近岸海域影响的相关问 题,研究者引入模型模拟的手段进行研究。早期的 模型受限于当时的技术,往往在模拟中简化了压力 项的计算,采用静压替代,这些模型在静压假设的 条件下, 被广泛用于边缘海和大洋的三维模拟, 即 三维浅水模型^[13]。这一阶段的模型应用包括 DHI MIKE (Model Integrated Computing Environment) 模型、ECOM(Estuarine Coastal Ocean Model)模 型、POM (Princeton Ocean Model) 模型、CH3D (Curvilinear-grid Hydrodynamics 3D Model) 模 型、Delft3D模型等,它们基于静压假设,为海洋 研究提供了模型工具[14]。随着对复杂地形和海洋 环境的深入研究,相关模型的构筑需要更高的精准 度来支撑模拟的要求,此时非静压假设的模型方程 应运而生^[15]。Jankowski 等^[16] 基于 TELEMAC 模 型的框架,并融合了 EDF 模型的相关内容,成功 构建了三维非静压数学模型。后续 Li 等^[17] 基于完 整的 N-S 方程,结合 Sigma 坐标系统,进一步发 展了三维非静压数学模型,该模型在时间和空间上 均实现了二阶精度。随着模型算法的不断优化,这 些模型已被广泛应用于海洋研究的各个领域[18-21]。

本文采用的 ECOM3D 改进的水动力模型^[22]基 于三维河口、陆架、海洋模型,引入干湿网格法变 动边界处理技术,建立三维动边界潮流数值模型, 相关的使用案例有海州湾^[23]、伶仃洋^[24]等的模 拟。该模型有助于深入了解海洋系统中不同地貌单 元的水动力特性,为进一步研究海洋生态系统及海 岸管理提供相关的基础数据。本研究通过模拟手 段,结合诏安湾实地监测的养殖尾水排放数据与湾 内实测数据,对尾水中营养盐含量进行了深入的定 性分析,模拟研究沿岸养殖尾水排放对海湾营养盐 变化的影响,旨在为诏安湾的生态治理与可持续发 展提供数据支持和策略思路。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概括

诏安湾位于福建省诏安县、东山县东南沿海 (N23.57°~N23.75°N、E117.26°~E117.38°),湾口朝 南,宽约8km,长约17km,总面积为152.66km², 岸线长为61.49km,周围多剥蚀低丘陵和台地,岬 角伸入湾内,岬湾相间,西面为宫口半岛,东面是 东山岛,口窄腹大,自然地理优越,渔业资源丰 富,气候温和湿润,是多种天然水生生物繁衍栖息 的合适海湾^[25]。因此,本文选择诏安湾所辖海域 (YPDS08~YPDS22、YPYX09~YPYX12、YPZA14~ YPZA34,图1)作为研究对象,采用的海流模型为 基于 Smagorinsky 算法的 ECOM3D 湍流模型^[22,26], 以此模拟沿岸养殖尾水排放对海湾营养盐变化的 影响。

1.2 数据来源

本文选取 2022 年 9 月在诏安湾的水文观测资料。同时选取同月附近的 3 个潮流观测数据(ZA1~ ZA3)和1个潮位观测数据(W)对后续构建的模型进行验证。

选定养殖尾水中的主要营养盐氨氮(NH⁴₄-N)、 总氮(TN)、总磷(TP)作为研究对象,运用污 染物扩散模型模拟污染物排放后,3种营养盐在典 型时刻的浓度增量分布情况,并分析其变化规律。

2 研究方法

2.1 模型的理论方程

本文采用 ECOM3D 改进的水动力模型^[22],理 论方程如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H u_j}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{du_i}{dt} + f\beta_{ij}u_j + g\frac{\partial\zeta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \tau_i$$
(2)

其中:

$$u_{j} = \{u, v\}, \quad \varepsilon_{j} = [\varepsilon_{x}, \varepsilon_{y}];$$
$$x_{j} = [x, y]; \quad H = h + \zeta;$$
$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2$$

式(1)~(2)中: t为时间; h为水深; ζ 为 水位高度; f为科氏力系数; u、v分别是x、y方向 的流速分量; τ_i 是海底应力, 冯卡门系数取 0.4; 海 底粗糙系数取 0.01; ϵx , ϵy 是海水水平方向上的涡 动粘性系数; 它们均由 Smagorinsky 公式计算得到:

$$\frac{1}{2}CA\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]^{1/2}$$
(3)

式(3)中: *A* 为各离散单元的面积; *C* 为常数取 0.1~0.2,在本模型中取 0.1。

溶解性污染物迁移扩散方程:

$$\frac{dC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon_{c,j} \frac{C}{x_j} \right) + M_C + S_C \tag{4}$$

式(4)中: C为污染物浓度; M_c为由污染物 降解所引起的耗散项; S_c为污染物源强。

2.2 模型验证

采用福建省水产研究所于 2022 年 9 月在研究 区域附近的 3 个潮流观测点(ZA1~ZA3)和1个 潮位观测点(W)对本模型进行验证,潮流和潮位验证观测点见图1。

2.3 模型网格和边界

本模型网格空间步长为 300 m×300 m, 网格覆 盖了整个宫口湾、诏安湾、东山湾和旧镇湾海域, 网格范围为 N23.50°~N24.06°、E117.13°~E117.89° (图 2)。



图 1 研究区域站点分布

Fig. 1 Station distribution of research areas



图 2 模型计算区域及水深地形

Fig. 2 Modeled computational areas and bathymetric topography

本模型计算区域为宫口湾、诏安湾、东山湾和 旧镇湾海域。共设3条开边界:宫口湾西侧8.9 km 长为西开边界、折向东77.2 km 为南开边界、再折 向北57.8 km 为东开边界。为模拟东山湾及旧镇湾 其他具有大面积滩涂的区域,本模型采用了能稳定 而高效地模拟浅滩干出及被淹的模拟技术。在建模 过程中,模型采用地理信息系统进行前期处理及后 期成果绘图,大大提高了建模效率及模型精度。

3 结果与讨论

3.1 模型验证结果

3.1.1 潮流验证

图 3 为 ZA1~ZA3 潮流观测点在大潮时的验证 结果和 W 潮位观测点的潮位验证曲线。由图 3 (a) 到图 3 (c)可以看出,研究区域附近潮流验证点 计算流速、流向的过程和实测的变化趋势较为一 致,部分潮流模拟的情况因实际测量的误差而导致 一定程度上的偏离,但高潮期和低潮期吻合程度较 高。从图 3 (d)可知,潮位观测点的计算潮位与 实测值仍吻合较好,两者的变化过程曲线亦基本一 致。以上模型的验证计算结果表明,模型采用的物 理参数和计算参数基本合理,计算方法可靠,能够 模拟研究区域海域潮波运动特性。

3.2 营养盐排放模拟结果

本文选定养殖排放主要污染物NH⁴₄-N、TN和 TP 作为模拟对象,采用 2022 年 4 月福建省水产研 究所对诏安湾周边养殖陆源排放口摸排数据(图1), 对诏安湾排水口主要营养盐排放进行模拟,运用污 染物扩散模型[公式(2)~公式(4)]模拟污染 物排放后的情况。



图 3 潮流验证曲线 Fig. 3 Tidal current verification curve

3.2.1 NH⁺₄-N 扩散模拟结果

图 4、图 5 分别是各排水口正常排放情况下涨 落潮时的NH⁴₄-N 浓度增量分布图。由图 4 可见,各 排水口正常稳定启动后,由于排水口水量均较小, 排水中的NH⁴₄-N 主要受潮流的影响而迁移扩散; 来自诏安湾西南海域的涨潮流往湾顶涨,而来自东 山湾的涨潮流经东山八尺门往诏安湾方向顶托,因 而NH⁴₄-N 随着涨潮流富集在湾内,其浓度约为 0.03~ 0.30 mg/L,高浓度NH4-N 主要集中在排水口附近和水深较小的区域;由于杏陈镇北侧的排水口排水量较小,再加上八尺门海堤开口后海域纳潮量变大,涨潮时NH4-N浓度较低,一般约为0.07 mg/L; 诏安湾西北侧、梅岭镇北部由于排水量较大、水深较小,再加上水动力较弱,该区域NH4-N浓度较高,一般为0.10~0.30 mg/L;与此类似,在诏安湾 东侧的 YPDS19 附近,NH4-N浓度较高,一般为 0.10 mg/L;在主潮流通道等海域受低浓度涨潮流的稀释作用,NH⁴₄-N浓度整体较低。至高潮时,在排水口持续排放的情况下,随着诏安湾纳潮量的增加,湾内NH⁴₄-N浓度整体上变低,诏安湾中部和杏陈镇北侧八尺门水道等主要纳潮通道上,NH⁴₄-N浓度显著下降,一般低于0.05 mg/L,而高浓度NH⁴₄-N 主要富集于诏安湾西侧、梅岭镇北部以及诏安湾东侧、前楼镇西南部水动力较弱的海域,一般为0.10~ 0.25 mg/L;诏安湾口主要受低浓度外海潮流控制, NH⁴₄-N浓度较低。由图 5 可见,随着大部分落潮流往诏安湾口、部分落潮流经八尺门水道往东山湾外泄,湾内潮量变小,NH⁴₄-N浓度整体水平上升; 主潮流通道水深较大、离排水口较远,NH⁴₄-N浓度 较低,一般低于 0.05 mg/L,而在诏安湾的西侧、 东侧水深较小、排水量较大,NH⁴₄-N浓度较大, 一般为 0.10~0.30 mg/L,而且高浓度范围较大,具 有随落潮流往湾口迁移扩散的趋势。至低潮时,湾 内NH⁴₄-N浓度整体上较高,除部分浅滩区域"干 出",高浓度NH⁴₄-N主要分布在诏安湾东、西两侧 的近岸海域,浓度一般可为 0.10~0.30 mg/L。整体 上看,NH⁴₄-N 迁移扩散主要受潮流控制,其浓度 变化规律反映了模型区域的地形特点和潮流场的变 化规律;湾内高浓度NH⁴₄-N 主要分布在诏安湾的 东、西两侧水深较小的近岸海域。



Fig. 4 Distribution of incremental NH_4^+ -N concentration at high tide

3.2.2 TN 扩散数值模拟结果

图 6、图 7 分别是各排水口正常排放情况下涨 落潮时的 TN 浓度增量分布图,其扩散分布规律与 NH⁺₄-N 较一致。由图 6 可见,各排水口正常稳定 启动后,来自诏安湾西南海域的涨潮流往湾顶涨, 而来自东山湾的涨潮流经东山八尺门往诏安湾方向 顶托,八尺门海域以西、诏安湾中北部的 TN 浓度 较高,一般为 0.30~1.00 mg/L,高浓度 TN 主要集 中在排水口附近、诏安湾西北侧水深较小的区域, 而在主潮流通道等海域受低浓度涨潮流的稀释作 用,TN浓度整体较低。至高潮时,在排水口持续 排放的情况下,随着诏安湾纳潮量的增加,湾内 TN浓度整体上变低;在八尺门以西、诏安湾西北 侧海域的TN浓度一般小于0.80 mg/L,而在诏安 湾中部以南的主要纳潮通道上,以及湾口,主要受 低浓度外海潮流控制,TN浓度较低,一般低于 0.40 mg/L。由图7可见,随着大部分落潮流往诏 安湾口、部分落潮流经八尺门水道往东山湾外泄, 湾内潮量变小,TN浓度整体水平上升;八尺门以 西、诏安湾西北侧海域水深较小、排水量较大, TN浓度较高,一般为 0.50~1.00 mg/L,而且高浓 度范围较大;而在诏安湾中部以南的主要纳潮通道 上,以及湾口水深较大、离排水口较远的海域, TN浓度较低,一般低于 0.40 mg/L; TN 具有随落 潮流往湾口和东山湾迁移扩散的趋势。至低潮时, 湾内 TN浓度整体上较高,除部分浅滩区域"干 出",高浓度 TN 主要分布在诏安湾东、西两侧的 近岸海域,一般为 0.50~1.00 mg/L。整体上看,TN 迁移扩散主要受潮流控制,其浓度变化规律反映了 模型区域的地形特点和潮流场的变化规律;湾内高 浓度 TN 主要分布在诏安湾的东、西两侧水深较小 的近岸海域。



Fig. 5 Distribution of incremental NH⁺₄-N concentration at low tide

3.2.3 TP 扩散数值模拟结果

图 8、图 9 分别是各排水口正常排放情况下涨 落潮时的 TP 浓度增量分布图,其扩散分布规律与 TN 较一致。由图 8 可见,各排水口正常稳定启动 后,来自诏安湾西南海域的涨潮流往湾顶涨,而来 自东山湾的涨潮流经东山八尺门往诏安湾方向顶 托,八尺门海域以西、诏安湾中北部的 TP 浓度较 高,一般为 0.15~0.30 mg/L,高浓度 TP 主要集中 在排水口附近、诏安湾西北侧水深较小的区域,而 在主潮流通道等海域受低浓度涨潮流的稀释作用, TP 浓度整体较低。至高潮时,在排水口持续排放 的情况下,随着诏安湾纳潮量的增加,湾内 TP 浓 度整体上变低;在八尺门以西、诏安湾西北侧海域 的 TP 浓度一般低于 0.24 mg/L,而在诏安湾中部以 南的主要纳潮通道上,以及湾口,主要受低浓度外 海潮流控制,TP 浓度较低,一般低于 0.19 mg/L。

由图9可见,随着大部分落潮流往诏安湾口、部分 落潮流经八尺门水道往东山湾外泄, 湾内潮量变 小, TP 浓度整体水平上升; 八尺门以西、诏安湾 西北侧海域水深较小、排水量较大, TP 浓度较 高,一般为 0.15~0.30 mg/L,而且高浓度范围较 大;而在诏安湾中部以南的主要纳潮通道上,以及 湾口水深较大、离排水口较远的海域, TP 浓度较 低,一般低于 0.15 mg/L; TP 具有随落潮流往湾口 和东山湾迁移扩散的趋势。至低潮时,湾内 TP 浓 度整体上较高,除部分浅滩区域"干出",高浓度 TP 主要分布在诏安湾东、西两侧的近岸海域、浓 度一般为 0.19~0.30 mg/L。整体上看, TP 迁移扩 散主要受潮流控制,其浓度变化规律反映了模型区 域的地形特点和潮流场的变化规律; 湾内高浓度 TP 主要分布在诏安湾的东、西两侧水深较小的近 岸海域。









4 结论

本文以诏安湾 2022 年典型排水口的调查和采

样数据为基础,结合水文信息,对海湾水体养殖排放的规律进行了探究和模拟,结果表明:

1) NH₄⁺-N 的涨落潮变化:涨潮时,NH₄⁺-N

在湾内呈现聚集现象,其浓度范围稳定在 0.03~ 0.30 mg/L 之间;至高潮时,NH⁴₄-N 的整体浓度有 所下降,但在湾西侧和梅岭镇北部等区域的浓度仍

有 0.10~0.25 mg/L。落潮时, NH⁴-N 浓度在湾内东 西两侧浅水区显著上升; 至低潮时, 其浓度在近岸 区域有所升高。



Fig. 8 Distribution of incremental TP concentration at high tide



Fig. 9 Distribution of incremental TP concentration at low tide

2) TN 的涨落潮变化: 涨潮时, TN 浓度在湾 中北部及八尺门以西区域高达 0.30~1.00 mg/L; 至 高潮时,其浓度普遍下降,但在西北侧仍保持较高 水平。在落潮阶段, TN 浓度上升,集中在湾西北 侧的浅水区; 至低潮时, TN 浓度偏高,尤其在 东、西两侧的近岸海域。

3) TP 的涨落潮变化:涨潮时,TP 浓度在湾 中北部及八尺门以西区域达到 0.15~0.30 mg/L,在 主潮流附近,浓度整体较低;至高潮时,其浓度下 降,但在西北侧仍维持较高水平。落潮时,TP 浓 度呈现上升趋势,集中在湾西北侧的浅水区。至 低潮时,TP 浓度偏高,分布于东、西两侧的近岸 海域。

4)3种营养盐的异同分析:NH₄⁺-N、TN和 TP的迁移扩散主要受潮流控制,潮流涨落直接决 定了这3种营养盐的湾内分布和浓度变化。3种营 养盐的高浓度均主要分布在诏安湾的东、西两侧水 深较小的近岸海域。这是因为该区域的地形特点导 致其水动力条件较弱,容易造成污染物的聚集,而 且浅水区与底部沉积物的相互作用频繁,有利于物 质的释放和积累。

参考文献 (References):

[1] 丁琪.全球海洋渔业资源可持续利用及脆弱性评价 [D].上海:上海海洋大学,2017.

> Ding Q. Evaluation on sustainable utilization and vulnerability of global marine fishery resources[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.

 [2]《中国水产》编辑部.全国出口水产品优势养殖区域 发展规划(2008—2015年)区域布局与发展重点
 [J].中国水产,2009(3):2-3.

Editorial Office of China Fisheries. Regional layout and development priorities of the national development plan for superior aquaculture areas of export-oriented aquatic products (2008 - 2015)[J]. China Fisheries, 2009(3): 2 - 3.

- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2024: blue transformation in action [R]. Rome: FAO, 2024.
- [4] 陈奇亮. 福建省近岸海域水体氮磷时空分布特征 [J]. 渔业研究, 2019, 41 (2): 130-139.
 Chen Q L. The spatial-temporal distribution of the nitro-

gen and phosphorus in the nearshore area of Fujian Province[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(2): 130 - 139.

 [5] 吴惠璇. 东山湾重点海水养殖水域浮游植物群落结构 及营养状况分析 [J]. 渔业研究, 2021, 43(6): 578-586.

Wu H X. Phytoplankton community structure and assessment of trophic state in important mariculture area of Dongshan Bay[J]. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(6): 578 – 586.

- [6]赵玉庭,苏博,马元庆,等. 2018年山东近岸养殖区 营养盐结构及限制特征 [J].海洋环境科学,2022, 41 (5):714-722,730.
 Zhao Y T, Su B, Ma Y Q, *et al.* Characteristics of nutrient structures and limitation of coastal aquaculture area in Shandong Province, 2018[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(5):714-722,730.
- [7] 董晓晓,李佳蕙,孙珊,等. 2020 年春季和秋季莱州 湾近岸海域营养盐空间分布特征研究 [J]. 海洋开发 与管理, 2023, 40 (6): 85-92.
 Dong X X, Li J H, Sun S, *et al.* The spatial distribution characteristics of nutrients in the coastal waters of Laizhou Bay in spring and autumn 2020[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(6): 85-92.
- [8] 张玉凤,田金,杨爽,等.大连湾海域营养盐分布特 征及其与环境因子的关系 [J].海洋环境科学,2014, 33 (3): 389-394.

Zhang Y F, Tian J, Yang S, *et al.* Distribution characteristics of nutrients and relationships with the environmental parameters in seawater of Dalian Bay[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(3): 389 – 394.

- [9] 葛明. 胶州湾氮、磷营养盐循环收支动力学模型及其应用[D]. 青岛:中国海洋大学, 2003.
 Ge M. Development of a dynamic model for dissolved inorganic nitrogen and phosphate cycles and budgets in Jiaozhou Bay and applications[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [10] 葛明,王修林,阎菊,等.胶州湾营养盐环境容量计算[J].海洋科学,2003,27(3):36-42.
 Ge M, Wang X L, Yan J, *et al.* The calculation of environmental capacities of nutrients in the Jiaozhou Bay[J].
 Marine Sciences, 2003, 27(3):36-42.
- [11] 史华明,李绪录,石晓勇,等. 2000—2012 年深圳湾及邻近沿岸水域溶解无机磷的来源和时空分布[J].
 环境科学学报,2015,35(11):3579-3586.
 Shi H M, Li X L, Shi X Y, et al. Temporal and spatial

distributions and sources of dissolved inorganic phosphorus in the Shenzhen Bay and adjacent coastal waters from 2000 to 2012[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(11): 3579 – 3586.

- [12] 吴敏兰. 北部湾北部海域营养盐的分布特征及其对生态系统的影响研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
 Wu M L. The distribution feature of nutrients and the study of their influence on ecosystem in the northern Beibu Gulf[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [13] 郭树波. 基于 ROMS 的海洋流场与温度场的数值模拟 仿真研究 [D]. 沈阳:东北大学,2017.
 Guo S B. Research on numerical analog simulation of oceanic flow field and temperature field based on ROMS [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [14] Moore A M, Powell B S. ROMS IAS data assimilation and prediction system: quantifying uncertainty[R]. Honolulu: University of Hawaii at Manoa, 2011.
- [15] 储敏, 徐永福. 区域海洋模式中的开边界问题 [J]. 海洋科学, 2009, 33 (6): 112-117.
 Chu M, Xu Y F. Open boundary conditions in regional ocean models[J]. Marine Sciences, 2009, 33(6): 112-117.
- [16] Jankowski J A, Zielke W. The mesoscale sediment transport due to technical activities in the deep sea[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(17-18): 3487 – 3521.
- [17] Li Z J, Chao Y, McWilliams J C, et al. A three-dimensional variational data assimilation scheme for the Regional Ocean Modeling System: implementation and basic experiments[R]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C5): C05002.
- [18] Li H Y, Guo P, Liu G P, et al. Numerical study of the upwelling and downwelling effects of artificial reefs along tidal cycles in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121486.
- [19] 赖巧珍,马雷鸣,黄伟,等.台湾岛附近海洋对 0908号台风"莫拉克"的响应特征 [J].海洋学报, 2013,35(3):65-77.

Lai Q Z, Ma L M, Huang W, *et al.* The ocean response to Typhoon Morakot (2009) in the western North Pacific boundary region[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 65 – 77.

- [20] Bacopoulos P, Hagen S C. Physics-based sizing functions for ocean-to-estuary shallow-water models[J].Ocean Modelling, 2022, 176: 102061.
- [21] 李嘉,郑向阳,张华,等.基于 Delft 3D 模型的感潮 河口示踪模拟 [J].海洋科学,2020,44 (10):23-32.
 Li J, Zheng X Y, Zhang H, *et al.* Simulation of tracer ex-

periment in the tidal estuary based on the Delft 3D model[J]. Marine Sciences, 2020, 44(10): 23 – 32.

- [22] 林建伟,张福星,崔培,等.双向嵌套水动力数值计 算模型在同安湾的应用 [J]. 厦门大学学报(自然科 学版), 2007,46(S1):18-21,32.
 Lin J W, Zhang F X, Cui P, *et al.* Application of hydrodynamic model with nested-grid skill in Tong'an Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2007,46(S1):18-21,32.
- [23] 谢飞,逄勇,宋志尧.海州湾海域三维潮流数值模拟
 [J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):
 718-721.

Xie F, Pang Y, Song Z Y. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in offshore area of Haizhou Bay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(6): 718 – 721.

- [24] 胡德礼,杨清书,吴超羽,等.珠江网河水沙分配变 化及其对伶仃洋水沙场的影响[J].水科学进展, 2010,21(1):69-76.
 Hu D L, Yang Q S, Wu C Y, *et al.* Changing water and sediment dynamics in the Pearl River network and consequences on water and sediment regimes in the Lingdingyang Estuary[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1):69-76.
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 第 8 分册 福建省 南部海湾 [M]. 北京:海洋出版社, 1993: 382-421.
 Editorial Board of Gazetteer of Bays in China. Gazetteer of bays in China. Volume 8. Bays in the southern part of Fujian Province [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 382-421.
- [26] Ansumali S, Karlin I V, Succi S. Kinetic theory of turbulence modeling: smallness parameter, scaling and microscopic derivation of Smagorinsky model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004, 338 (3-4): 379 394.

Numerical simulation study on the effect of aquaculture tailwater discharge on nutrient salt distribution in Zhao'an Bay, Fujian Province

ZHU Yuchen, LIN Jianwei*

(Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China)

Abstract: [Background] Reasonable utilization of the bay will strongly contribute to the prosperous development of China's marine economy. [Objective] The study aims to understand the impact of the discharge of culture tail water on the distribution of nutrient salts in Zhao'an Bay. [Methods] The hydrological observation data of Zhao'an Bay in September 2022 was selected, combined with the survey data of the culture discharge outlets around the bay in April 2022, to simulate the migration of major nutrient salts after discharge from the discharge outlets in the bay, [**Results**] The results showed that: 1) The variation of NH_{4}^{+} -N during high and low tides: during high tide, NH_4^+ -N accumulates in the bay, with concentrations stabilizing between 0.03 and 0.30 mg/L. During low tide, the NH_4^+ -N concentration on the east and west sides of the bay increases significantly, generally ranging from 0.10 to 0.30 mg/L; 2) Changes in TN at high and low tides: at high tide, the concentration of TN was as high as 0.30~1.00 mg/L in the north-central part of the bay and the area west of the Bachi Gate; as the tide level increased, the concentration of TN generally decreased, but the northwestern side of the bay still remained at a high level. At low tide, TN concentration increased, mainly concentrated in the shallow water area on the northwest side of the bay; 3) Changes in TP at high and low tides: at high tide, TP reached 0.15~0.30 mg/L in the north-central part of the Bay and the area west of Bachi Gate. At low tide, the concentration increased, concentrated in the shallow water area on the northwest side of the bay, and the concentration was higher in general, especially in the nearshore waters on the east and west sides of the bay, which was in line with the situation of TN. [Conclusion] The migration and diffusion of NH_4^+ -N, TN and TP are controlled by tidal currents, and the tidal currents determine the distribution and concentration of the three nutrient salts in the bay. The high concentration of the three nutrient salts are mainly found in the near-shore waters with small water depths on the east and west sides of the bay.

Key words: aquaculture water; Zhao'an Bay; model simulation; high and low tide