

文章编号: 1674-5566(2025)05-1106-09

DOI: 10.12024/jsou.20241204746

## 长三角生态绿色一体化发展示范区水产养殖尾水污染特征分析

徐嘉楠<sup>1</sup>, 龚琦<sup>2</sup>, 朱泽伟<sup>2</sup>, 李娟英<sup>2</sup>, 尹杰<sup>2</sup>

(1. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 基于长三角地区水产养殖尾水排放带来的水环境污染问题,对长三角生态绿色一体化发展示范区(吴江区、青浦区、嘉善县)内养殖池塘尾水污染特征进行了全面调查,并分析了“三池两坝”尾水处理系统对主要污染物总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)的去除效果。结果显示,示范区内养殖尾水整体处于中等污染水平,但不同区域养殖尾水中污染物浓度差异显著,总体呈现出嘉善县>吴江>青浦的现象。此外,针对不同品种的养殖尾水,其污染特征也表现出显著差异,爬行类养殖尾水中污染物浓度相对最高,以TN和COD<sub>Mn</sub>为代表性污染物,蟹类养殖尾水中污染物浓度最低,但有部分COD<sub>Mn</sub>超标。“三池两坝”工艺对TN的去除率最高,尤其是沉淀池,COD<sub>Mn</sub>次之,以沉淀池和生态池的去除效果较好,TP的去除率最低。综合以上养殖尾水污染特点以及“三池两坝”工艺污染物去除效率,提出以下尾水处理优化策略:对于爬行类,建议增加“三池两坝”工艺中沉淀池和生态池的容积,以针对性地提高TN和COD<sub>Mn</sub>的去除效率;对于污染物浓度较低但波动较大的鱼虾类养殖尾水,保持现有工艺以确保污染物的达标排放;针对COD<sub>Mn</sub>偶尔超标的蟹类养殖尾水,建议采用更为经济的沉淀池+过滤坝“一池一坝”处理工艺,专注于降低COD<sub>Mn</sub>浓度。以上策略的实施预期可推动长三角示范区水产养殖业向绿色发展转型,并促进水环境质量的持续优化。

**关键词:** 长三角生态绿色一体化发展示范区; 养殖尾水; 污染特征; 三池两坝; 优化策略

中图分类号: S 912 文献标志码: A

长三角一体化战略旨在通过加强区域内的经济合作与协同发展,提升整个区域的综合竞争力,从而带动全国经济的持续增长。作为长三角一体化发展战略的先手棋和突破口,长三角生态绿色一体化发展示范区(以下简称“示范区”)横跨江苏、浙江和上海两省一市,包括上海市青浦区、江苏省苏州市吴江区、浙江省嘉兴市嘉善县,以“生态绿色”和“一体化”作为发展特征,引领长三角高质量一体化发展<sup>[1-3]</sup>。示范区总面积约2 351 km<sup>2</sup>,水域面积约607 km<sup>2</sup>,其中水产养殖池塘面积约82 km<sup>2</sup>。近年来,养殖尾水带来的水环境污染问题日益凸显,TN、TP和COD<sub>Mn</sub>成为渔业水域的主要超标指标<sup>[4]</sup>,尾水污染不仅成为制约养殖业可持续发展的瓶颈<sup>[5-6]</sup>,也是生态绿色一体化推进过程中面临的问题。农业农村部等10部委《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》的文件中也指出,尾水治理是水产养殖业绿色发展的关键,对于保护水域生态环境、提升养殖产品质量、促进渔业可持续发展具有重要意义。

目前,常用的养殖尾水处理如网筛过滤法,虽然操作简单、效果立竿见影,但对可溶性物质去除效果差<sup>[7]</sup>;添加絮凝剂的化学沉淀法可有效改善尾水水质,但容易造成二次污染<sup>[8]</sup>;生物处理技术包括生态沟渠<sup>[9]</sup>、生态浮床<sup>[10]</sup>和生物滤池<sup>[11]</sup>等,具有经济和安全的特点<sup>[12-13]</sup>,但处理时间长且占地面积较大<sup>[12]</sup>。“三池两坝”尾水处理工艺集物理沉淀、填料过滤、曝气氧化、生物净化等作用于一体,对养殖尾水中的氮磷和有机物等去除效率较高,已在示范区形成一定的应用规模<sup>[13-15]</sup>,但在实际使用中仍然存在工艺运行效率低下、污染物处理效果不稳定<sup>[16-17]</sup>以及不同养殖品种尾水处理

收稿日期: 2024-12-30 修回日期: 2025-02-12

基金项目: 长三角核心区池塘养殖污染物源头控制与尾水治理技术攻关及示范项目(21002410500)

作者简介: 徐嘉楠(1983—),男,工程师,研究方向为水生野生动物保育等。E-mail: ilexsoul@hotmail.com

通信作者: 尹杰,E-mail:jieyin@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

的适应性等问题。

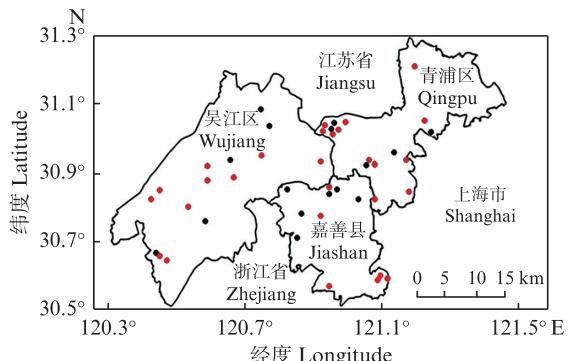
本研究以示范区中青浦、吴江和嘉善等地的养殖池塘为研究对象,在对养殖尾水进行跟踪调查的基础上,分析不同区域和不同品种养殖尾水的污染特征。同时,结合“三池两坝”工艺对养殖尾水的处理效果,针对不同区域、不同养殖品种和养殖模式的养殖尾水,提出针对性的改进措施,以提高长三角示范区水产养殖尾水处理的科学性和精准性,为示范区内水产养殖业的可持续发展和生态环境保护提供科学依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样区域概况及采样点

根据养殖面积、尾水净化设施以及养殖品种等原则,选取46家水产养殖场进行采样,其中30家有“三池两坝”尾水处理工艺(图1)。示范区域内养殖品种分为爬行类(甲鱼)、鱼类(鲈鱼、鳜鱼、四大家鱼、斑点叉尾鮰、黄颡鱼、观赏鱼和翘

嘴鮊)、虾类(罗氏沼虾、克氏原螯虾、南美白对虾和青虾)和蟹类(河蟹)4种类型,淡水养殖池塘面积及水产品产量见表1。



圆点表示养殖池塘采样点,其中,红色点位为含“三池两坝”尾水处理工艺的养殖池塘。

The dots represent sampling points for aquaculture ponds, among which the red dots indicate aquaculture ponds equipped with the "three ponds and two dams" wastewater treatment process.

图1 长三角示范区养殖尾水采样点分布图

Fig. 1 Yangtze River Delta Demonstration Zone aquaculture effluent sampling point distribution map

表1 2022年研究区域淡水养殖池塘面积及水产品产量

Tab. 1 Freshwater aquaculture pond area and aquatic product production of the study area in 2022

| 类别<br>Category                            | 研究区<br>域 Study<br>area | 吴江区 Wujiang District |       |       |       |       | 青浦区 Qingpu District |       |      |      |       | 嘉善县 Jiashan County |       |      |      |       |
|---|------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|------|------|-------|--------------------|-------|------|------|-------|
|   |                        | 总计                   | 鱼类    | 虾类    | 蟹类    | 小计    | 爬行<br>类             | 鱼类    | 虾类   | 蟹类   | 小计    | 爬行<br>类            | 鱼类    | 虾类   | 蟹类   | 小计    |
| 品种 Species                                |                        | 83.33                | 14.00 | 18.67 | 20.00 | 52.67 | 0.53                | 9.20  | 2.00 | 1.60 | 13.33 | 2.00               | 9.80  | 4.60 | 0.93 | 17.33 |
| 面积 Area /km <sup>2</sup>                  |                        | 9.47                 | 4.78  | 0.44  | 0.38  | 5.60  | 0.02                | 1.14  | 0.09 | 0.02 | 1.27  | 0.21               | 2.15  | 0.22 | 0.02 | 2.60  |
| 产量 Capacity/(×10 <sup>4</sup> t)          |                        | 1 136                | 3 414 | 236   | 190   | 1 063 | 377                 | 1 239 | 450  | 125  | 953   | 1 050              | 2 194 | 478  | 215  | 1 500 |
| 养殖密度 Culture density/(t/km <sup>2</sup> ) |                        |                      |       |       |       |       |                     |       |      |      |       |                    |       |      |      |       |

### 1.2 采样与测定方法

样品采集参照HJ 495—2009《水质采样方案设计技术规定》和HJ 493—2009《水质样品的保存和管理技术规定》执行。分别在2021年11月至12月和2022年6月至8月进行2批次统一采样,其中,水产养殖尾水采样点设置在池塘排水口处,“三池两坝”尾水净化设施采样点设置在生态净化池出水口。每个采样点采集3个平行。水样用有机玻璃采水器采集后,加入H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>酸化并

装入聚乙烯塑料瓶中密封,放入装有冰袋的保存箱中暂存,冷藏运到实验室进行测定。测定指标包括TN、TP和COD<sub>Mn</sub>,分别采用碱性过硫酸钾分光光度法(GB/T 11894—89)、钼锑抗分光光度法(GB/T 11893—89)和酸性高锰酸碱法(GB/T 11892—89)测定。

### 1.3 尾水排放标准

示范区各地的排放标准中污染物的具体排放限值如表2所示。

表2 排放标准限值

Tab. 2 Emission standard limit

| 地区 Area              | 依据 Basis                      | TN   | TP   | COD <sub>Mn</sub> | mg/L |
|----------------------|-------------------------------|------|------|-------------------|------|
| 吴江区 Wujiang District | 《池塘养殖尾水排放标准》(DB32/ 4043—2021) | ≤6.0 | ≤0.8 | ≤25               |      |
| 青浦区 Qingpu District  | 《水产养殖尾水排放标准》(DB31/ 1405—2023) | ≤5.0 | ≤0.8 | ≤25               |      |
| 嘉善县 Jiashan County   | 《淡水池塘养殖水排放要求》(SC/T 9101—2007) | ≤5.0 | ≤1.0 | ≤25               |      |

#### 1.4 数据处理

为保证数据的准确性,数据结果以3次测量的平均值为准(相对误差小于5%)。使用Excel对数据进行处理;在IBM SPSS Statistics 21软件中,采用皮尔逊相关系数法进行相关性分析;采用Arcgis 10.8绘制采样点分布图,采用GraphPad Prism 9.5绘制数据图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 示范区内养殖尾水污染特征及区域差异

示范区养殖尾水中TN、TP和COD<sub>Mn</sub>的浓度范围分别为0.31~9.84、0.04~1.88和3.57~85.9 mg/L,平均值分别为2.80、0.49和18.97 mg/L(图2)。相较于国内其他地区,TN含量低于珠三角地

区<sup>[18]</sup>(4.92~15.41 mg/L,均值8.50 mg/L),与山东省<sup>[19]</sup>(0.31~14.85 mg/L,均值3.49 mg/L)相当,略高于太湖流域<sup>[20]</sup>(均值2.2 mg/L)和巢湖流域<sup>[21]</sup>(0.85~4.37 mg/L,均值2.03 mg/L);TP含量高于太湖流域<sup>[20]</sup>(均值0.05 mg/L)和巢湖流域<sup>[21]</sup>(0.08~0.31 mg/L,均值0.20 mg/L),与山东省<sup>[19]</sup>(0.036~1.541 mg/L,均值0.48 mg/L)和珠三角地区<sup>[18]</sup>(0.33~1.28 mg/L,均值0.59 mg/L)池塘养殖尾水TP含量相当;COD<sub>Mn</sub>含量低于巢湖流域<sup>[21]</sup>(24.4~87.8 mg/L,均值50.2 mg/L),与珠三角地区<sup>[18]</sup>(8.49~28.02 mg/L,均值17.09 mg/L)水产养殖尾水含量相当(图2)。由此可见,本研究长三角示范区养殖尾水整体处于中等污染水平。

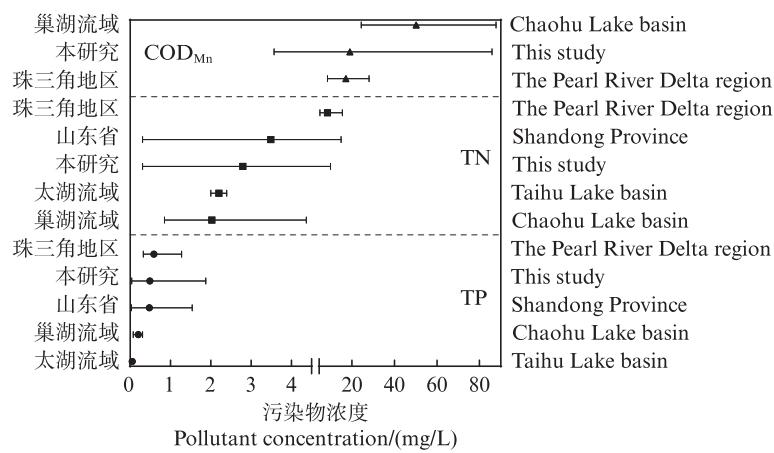
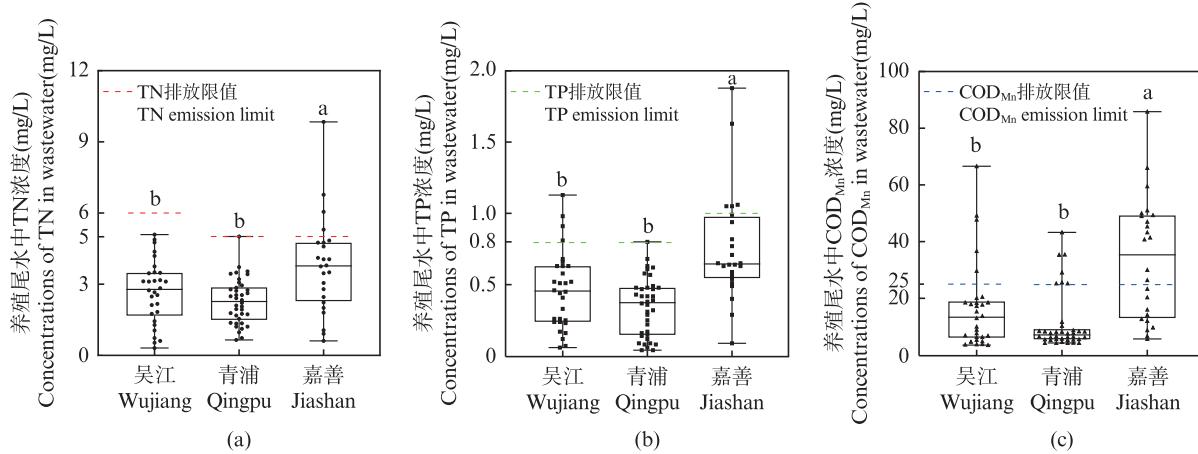


图2 国内其他地区养殖尾水中TN、TP和COD<sub>Mn</sub>的浓度

Fig. 2 Concentrations of TN, TP, and COD<sub>Mn</sub> in aquaculture tailwater from other regions in China

此外,示范区内3个区域养殖尾水的污染特征也呈现出一定的差异性。如图3a所示,即使采用更严格的TN排放标准(5.0 mg/L),吴江区、青浦区和嘉善县3个区域的养殖尾水平均排放浓度也均能满足要求,但嘉善县养殖尾水中的TN浓度显著高于吴江区和青浦区,超标率为16.67%,超标倍数为1.06~1.97。对于TP(图3b),青浦区所有尾水全部满足排放标准;相比之下,采用同一排放标准的吴江区养殖尾水超标率为10%,超标倍数为1.13~1.22;同样,嘉善县养殖尾水中TP的浓度显著高于吴江区和青浦区,即使在更为宽松的排放标准(1.0 mg/L)下,仍有20.8%的样品超标,超标倍数为1.05~1.88。而对于采用相同标准的COD<sub>Mn</sub>(图3c),3个区域均存在一定程度的

超标现象,吴江区、青浦区和嘉善县的超标率分别为16.67%、18.42%和58.3%,同样,嘉善县的COD<sub>Mn</sub>浓度显著较高,均值的超标倍数达到了1.36。因此,示范区养殖尾水中各类污染物的平均浓度均呈现嘉善县>吴江区>青浦区的特征。研究表明,动物粪便和饲料残渣是养殖尾水中污染物的主要来源<sup>[22]</sup>。本研究嘉善县、吴江区和青浦区水产品的养殖密度分别约为1 500、1 063和953 t/km<sup>2</sup>(表1),因此嘉善县相对较高的养殖密度可能导致过多的饲料残留和动物排泄物积累,进一步导致该区域养殖尾水中污染物浓度偏高。总体而言,示范区内养殖尾水中TN的超标程度相对较轻,其次是TP,而COD<sub>Mn</sub>的超标情况则最为严重。



不同小写字母表示组间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ).

图3 不同区域养殖尾水中TN、TP和COD<sub>Mn</sub>浓度

Fig. 3 Concentrations of TN, TP and COD<sub>Mn</sub> in wastewater from different aquaculture regions

## 2.2 养殖品种对示范区内尾水污染特征的影响

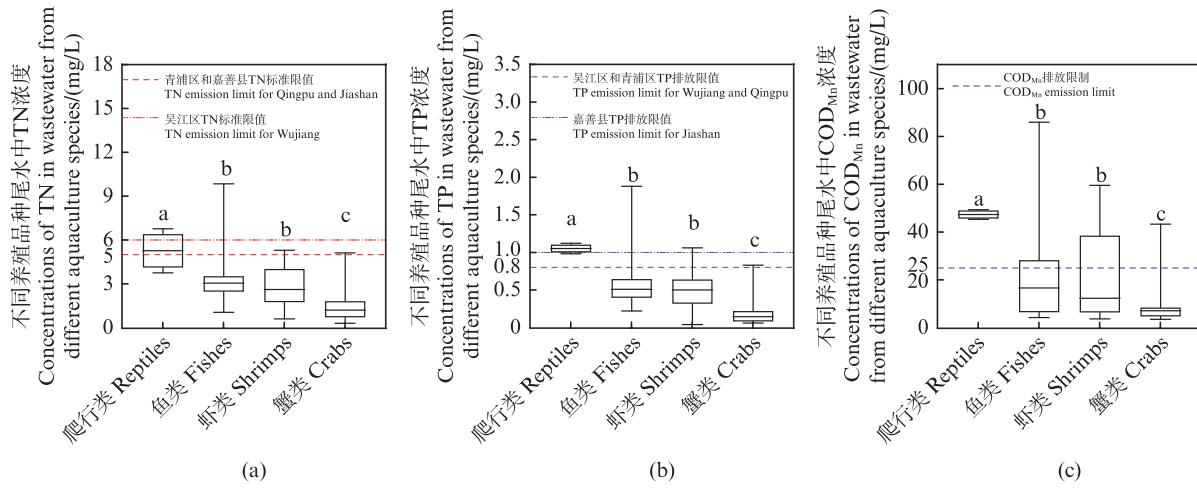
养殖品种的差异亦是影响养殖尾水污染特征的不可忽视的因素,因为不同养殖品种在养殖模式、饲料转化率以及生物特性等方面差异,可能导致养殖尾水污染特征呈现出明显的不同<sup>[23-24]</sup>。由图4可知,爬行类养殖尾水中污染物平均浓度最高( $P<0.01$ ),TN、TP和COD<sub>Mn</sub>平均值分别为(5.26±2.12)、(1.05±0.002)和(47.36±2.83) mg/L。尤其是养殖密度最高的嘉善县,爬行类养殖尾水中TN超标率高达50%,超标倍数为1.35,COD<sub>Mn</sub>超标率更是达到了100%,平均超标倍数为1.89。爬行类的养殖模式多为饲养密度为25~30只/m<sup>2</sup>的高密度养殖,其排泄物直接进入水体,加上其活动能力大,生长快,繁殖、代谢、排泄能力较强,而饲料转化率又相对较低,因此在养殖过程中的排污系数较高<sup>[6,25]</sup>,是养殖尾水污染最高的主要原因。

鱼类和虾类养殖尾水中的污染物平均浓度相当( $P>0.05$ )且低于爬行类(图4),可能与鱼虾类相对于爬行类具有更高的饲料转化率及较弱的代谢、排泄能力有关<sup>[26-27]</sup>。尽管如此,鱼虾类养殖尾水中也存在部分超标现象,其中鱼类养殖尾水中污染物浓度波动较大,TN、TP和COD<sub>Mn</sub>的平均浓度分别为(3.19±1.41)、(0.57±0.32)和(20.78±18.83) mg/L,超标率分别达4.17%、10.41%和29.16%。个别品种如鲈鱼的尾水中污

染物浓度较高,可能与“两早一高”高效养殖模式有关,即早放苗、早上市和高密度养殖<sup>[28]</sup>,这种模式下,如若养殖密度控制不当,极有可能造成鲈鱼养殖尾水中污染物超标。相对于鱼类,虾类养殖尾水中污染物浓度相对稳定,仅部分罗氏沼虾和青虾养殖尾水中COD<sub>Mn</sub>超标,平均超标倍数分别为1.79和1.55,可能与罗氏沼虾和青虾更倾向于在水体底部活动<sup>[29-30]</sup>,其排泄物和未消耗的饲料会直接沉降到池塘底部,底部缺氧条件会限制有机物的分解,增加水体中还原性物质的积累,进而提高COD<sub>Mn</sub>的浓度<sup>[31]</sup>。

蟹类养殖尾水中TN、TP和COD<sub>Mn</sub>的平均浓度最低( $P<0.01$ ),平均值分别为(1.49±1.11)、(0.21±0.21)和(8.82±8.91) mg/L,且仅COD<sub>Mn</sub>存在超标现象,超标率为5.56%,平均超标倍数为1.73。蟹类养殖尾水污染物浓度低,除了与河蟹较低的养殖负荷(125~215 t/km<sup>2</sup>)有关外(表1),为了有效抵御敌害生物的侵袭及规避不利环境条件的影响,河蟹养殖池塘中往往会进行大量的水草种植<sup>[32]</sup>,它们通过根系直接吸收水体中的氮、磷营养物质,但由于COD<sub>Mn</sub>不是水草生长的直接营养来源,因此水草对其的吸收能力相对较弱<sup>[33]</sup>。

因此,鉴于不同养殖品种尾水中污染物排放特征,应明确关键污染物种类,在制定差异化的管理策略的同时,也为后续的尾水治理提供数据支撑。



不同小写字母表示组间存在显著性差异( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ).

图4 不同养殖品种尾水中TN、TP和COD<sub>Mn</sub>浓度

Fig. 4 Concentrations of TN, TP and COD<sub>Mn</sub> in wastewater from different aquaculture species

### 2.3 “三池两坝”对养殖尾水的处理效果及优化策略分析

“三池两坝”作为重要的尾水处理工艺,已在示范区广泛推广和应用,并展现出规模化效应<sup>[13-15]</sup>。本研究对示范区内30座“三池两坝”尾水处理工艺进行调查发现,处理后的养殖尾水均可实现达标排放,且对TN的去除率(9.59%~79.36%,平均48.99%)显著高于COD<sub>Mn</sub>(2.05%~78.4%,平均39.93%)和TP(0~69.05%,平均34.39%)( $P<0.05$ )(图5a)。与前人<sup>[6]</sup>“三池两坝”工艺对TP的去除存在局限性的结论一致。“三池两坝”工艺对TP的去除主要依靠物理沉淀和水生植物的吸收<sup>[34]</sup>,物理沉淀对于颗粒态磷有效<sup>[35]</sup>,但沉淀效率受到沉淀池形状等条件的影响;溶解态磷主要靠植物吸收<sup>[35]</sup>,吸收量受到植物生长速度的制约,这些因素共同作用导致TP去除效果受到一定程度的限制。

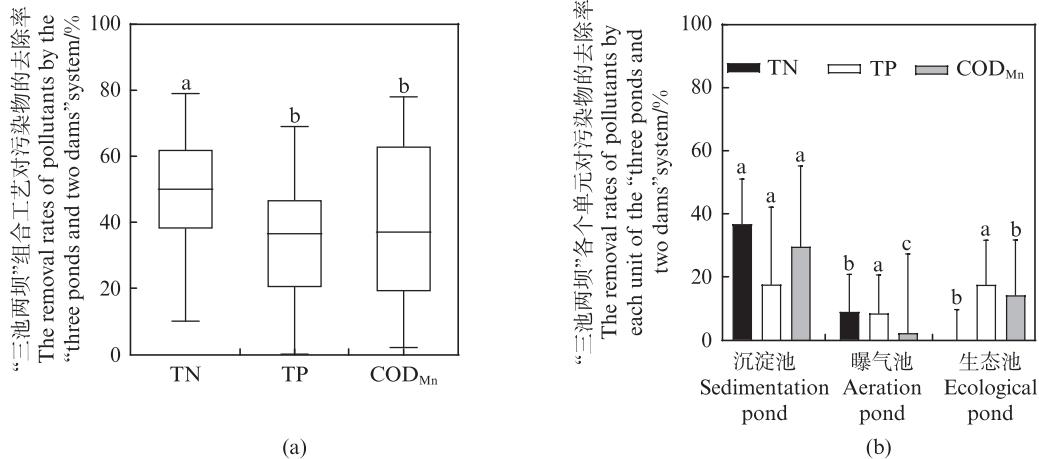
此外,沉淀池、曝气池和生态池在污染物去除方面也表现出显著的差异性。沉淀池呈现出最高的COD<sub>Mn</sub>去除率,达到了29.6%(图5b),由于养殖尾水中COD<sub>Mn</sub>很大一部分来源于悬浮物,而沉淀池对残饵、粪便等悬浮物具有一定的拦截作用<sup>[15]</sup>;其次是生态池(14.2%),生态池植物根系中微生物对COD<sub>Mn</sub>也有一定的降解作用<sup>[36]</sup>;曝气池的去除率最低(2.2%),与曝气池中溶解性碳源不足影响了微生物的增殖<sup>[37]</sup>,进而大大削弱了其对COD<sub>Mn</sub>的去除能力有关。对于TN而言,沉淀

池同样表现出最佳去除效果,去除率高达36.8%,养殖尾水中大部分TN以饲料和粪便残渣中的颗粒有机氮形式存在,这些颗粒有机氮在沉淀池中随着COD<sub>Mn</sub>的去除而一同被去除<sup>[38]</sup>;而曝气池和生态池对TN的去除明显较差,虽然曝气池中硝化条件得到了保障,但生态池中反硝化环境缺乏充足的碳源,导致TN的去除效果并不显著。此外,TP在各单元间的去除率不高且无显著差异,进一步证实了“三池两坝”尾水处理工艺对TP的去除效果有限。

综上所述,结合示范区内不同养殖品种及“三池两坝”不同单元养殖尾水的污染物去除特征,本研究提出以下优化建议:对于示范区内TN和COD<sub>Mn</sub>超标较为严重的爬行类养殖尾水,建议加大“三池两坝”工艺中沉淀池和生态池的容积,延长水力停留时间,提升污染物去除效果;对于污染物浓度波动范围较大的鱼虾类养殖尾水,维持目前的工艺现状,以确保尾水中的污染物均达标排放;而对于仅COD<sub>Mn</sub>偶有超标的蟹类养殖尾水,可采用更为经济的沉淀池+过滤坝“一池一坝”尾水处理工艺,以专注于COD<sub>Mn</sub>的降解和去除。

### 3 结论

长三角生态绿色一体化发展示范区内淡水池塘养殖尾水整体处于中等污染水平,区域之间的差异显著,总体呈现嘉善县>吴江区>青浦区的现象。



不同小写字母表示组间存在显著性差异( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ ).

图5 “三池两坝”尾水处理工艺对养殖尾水中污染物的去除率

Fig. 5 Pollutant removal rate of “three pools and two dams” in two districts and one county

不同养殖品种尾水的污染特征具有品种特性,爬行类养殖尾水中污染物浓度最高,TN和COD<sub>Mn</sub>是主要超标污染物;鱼虾类养殖尾水污染物浓度次之,且污染物浓度波动较大,TN、TP和COD<sub>Mn</sub>均有不同程度超标;蟹类养殖尾水仅COD<sub>Mn</sub>稍有超标,污染物浓度最低。

“三池两坝”尾水处理工艺对TN具有较好的去除效果,尤其是沉淀池;不仅如此,沉淀池对COD<sub>Mn</sub>去除效果也较好,其次是生态池;但尾水处理工艺整体对TP的去除效果有限。

基于养殖尾水污染特点和“三池两坝”污染物去除效率,建议爬行类养殖尾水处理工艺增加沉淀池和生态池的容积;鱼虾类养殖尾水采用现有的“三池两坝”尾水处理工艺;蟹类养殖尾水采用沉淀池+过滤坝“一池一坝”尾水处理工艺。

作者声明本文无利益冲突。

## 参考文献:

- [1] 刘垚燚,曾鹏,张然,等.基于GEE和BRT的1984—2019年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J].应用生态学报,2021,32(3): 1033-1044.  
LIU Y Y, ZENG P, ZHANG R, et al. Vegetation coverage change of the demonstration area of ecologically friendly development in the Yangtze River Delta, China based on GEE and BRT during 1984-2019 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1033-1044.
- [2] 何天星,田宁,周锐,等.基于GEE和RSEI的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J].生态学杂志,2023,42(2): 436-444.
- [3] HE T X, TIAN N, ZHOU R, et al. Dynamic assessment of eco-environmental quality in Yangtze River Delta integration demonstration area based on GEE and RSEI [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 436-444.
- [4] 彭倩,轩润禾,吴林峰,等.长三角生态绿色一体化发展先行启动区生态环境现状分析[J].上海师范大学学报(自然科学版),2022,51(4): 517-525.  
PENG Q, XUAN R H, WU L F, et al. Analysis of ecological environment status in antecedent promoter region of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2022, 51(4): 517-525.
- [5] 中华人民共和国生态环境部.2018中国生态环境状况公报[EB/OL].(2019-05-29).[https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201912/t20191231\\_754139.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201912/t20191231_754139.html).  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2018 Report on the state of the environment in China [EB/OL]. (2019-05-29). [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201912/t20191231\\_754139.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201912/t20191231_754139.html).
- [6] 柯瑞林,任黎华,孟顺龙.水产养殖尾水处理技术研究进展[J].中国农学通报,2023,39(29): 146-151.  
KE R L, REN L H, MENG S L. Research progress of aquaculture tail water treatment technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(29): 146-151.
- [7] 杜胜男,徐佳楠,熊飞,等.不同固定化微生物颗粒降解养殖尾水中污染物的性能评价[J].上海海洋大学学报,2024,33(3): 682-691.  
DU S N, XU J N, XIONG F, et al. Selection of immobilized carrier and evaluation of microbe performance of degradation in aquaculture wastewater treatment [J]. Journal of Shanghai Ocean University,

- 2024, 33(3): 682-691.
- [7] 吴梦林, 安淑伟. 海水养殖尾水资源化处理方法[J]. 水产养殖, 2022, 43(4): 42-45.  
WU M L, AN S Y. Method for recycling seawater aquaculture tail water[J]. Journal of Aquaculture, 2022, 434: 42-45.
- [8] 姜硕, 孙萌, 孙惠, 等. 用于吸附养殖尾水中Cu<sup>2+</sup>的温度敏感型淀粉基水凝胶制备及性能分析[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(3): 462-469.  
JIANG S, SUN M, SUN H, et al. Preparation and application in removal of Cu<sup>2+</sup> from aquaculture tailwater for thermoresponsive starch ether/carboxymethyl starch composite hydrogel [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(3): 462-469.
- [9] LIU Y Y, LI S M, WANG X L, et al. Dynamic interception effect of internal and external nitrogen and phosphorus migration of ecological ditches [J]. Water, 2020, 12(9): 2553.
- [10] ZHANG Q Z, ACHAL V, XU Y T, et al. Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica Forsskal*) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district [J]. Aquacultural Engineering, 2014, 60: 48-55.
- [11] LIU W C, DU X Z, TAN H X, et al. Performance of a recirculating aquaculture system using biofloc biofilters with convertible water-treatment efficiencies [J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 141918.
- [12] 王冉冉, 张帆, 齐凯, 等. 等离子体处理农村污水技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 51-57.  
WANG R R, ZHANG F, QI K, et al. Development status and trends of plasma treatment of rural sewage[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5 (1): 51-57.
- [13] 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 等. 长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3066-3076.  
ZHANG Z B, DUAN Y P, TU Y R, et al. Distribution characteristics, source analysis, and pollution evaluation of organic matter in surface sediments of Qingpu district, Yangtze river delta integration demonstration area [J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 3066-3076.
- [14] 徐责茗, 崔桢, 高俊峰, 等. 太湖流域养殖池塘的氮磷污染负荷估算[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31 (1): 148-155.  
XU Z M, CUI Z, GAO J F, et al. Quantifying nitrogen and phosphorus loading from aquaculture ponds in lake Taihu Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(1): 148-155.
- [15] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106.  
LIU M, YUAN J L, NI M, et al. Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “three ponds and two dams” [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11 (1) : 97-106.
- [16] LIU X G, SHAO Z Y, CHENG G F, et al. Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China [J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13(2): 1060-1076.
- [17] LIU J Z, WU Y H, WU C X, et al. Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: a review [J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 1127-1137.
- [18] 刘乾甫, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 珠三角地区密养淡水鱼塘水质状况分析与评价[J]. 南方水产科学, 2014, 10 (6): 36-43.  
LIU Q F, LAI Z N, YANG W L, et al. Assessment of water quality of intensive ponds in the Pearl River Delta region[J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(6): 36-43.
- [19] 马国红, 李壮, 张明磊, 等. 山东省淡水池塘养殖尾水现状调查与分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2022, 37(4): 355-361.  
MA G H, LI Z, ZHANG M L, et al. Investigation and analysis of the quality of freshwater pond aquaculture wastewater in Shandong[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Sciences), 2022, 37(4): 355-361.
- [20] 彭凌云, 逄超普, 李恒鹏, 等. 太湖流域池塘养殖污染排放估算及其空间分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32 (1): 70-78.  
PENG L Y, TI C P, LI H P, et al. Estimates and characteristics of pollutant discharge from pond cultures in the Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32 (1): 70-78.
- [21] 杨坤, 胡明星, 卢文轩. 巢湖流域水产养殖尾水水质分析与评价[J]. 生物学杂志, 2023, 40(1): 85-90.  
YANG K, HU X M, LU W X. Analysis and evaluation of water quality of aquaculture tail water of Chaohu Lake basin[J]. Journal of Biology, 2023, 40(1): 85-90.
- [22] 杨婉玲, 赖子尼, 刘乾甫, 等. 不同养殖品种池塘化学耗氧量(COD<sub>Mn</sub>)变化趋势及环境影响因素[J]. 广东农业科学, 2014, 41(8): 161-165.  
YANG W L, LAI Z N, LIU Q F, et al. Changing trend of chemical oxygen demand (COD<sub>Mn</sub>) in different breeding pond and its influence factors [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(8): 161-165.
- [23] 陶柄臣. 典型池塘工业化养殖污染现状与水质优化方案[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.  
TAO B C. Pollution status and water quality optimization scheme of industrial aquaculture in typical ponds [D].

- Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [24] 徐嘉波, 刘永土, 施永海, 等. 淡水池塘不同养殖品种养殖尾水排放周期内的水质动态变化[J]. 渔业现代化, 2023, 50(1): 26-33.
- XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Dynamic changes of water quality during wastewater discharge cycle of different aquaculture varieties [J]. Fishery Modernization, 2023, 50(1): 26-33.
- [25] 罗金飞, 蒋路平, 朱建龙, 等. 嘉兴市规模化甲鱼两段式养殖场常规水质的调查[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(8): 1337-1341.
- LUO J F, JIANG L P, ZHU J L, et al. Routine water quality survey of large-scale turtle two-stage farming in Jiaxing city [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(8): 1337-1341.
- [26] FRY J P, MAILLOUX N A, LOVE D C, et al. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(2): 024017.
- [27] 袁章琴, 谭支良, 曾军英, 等. 饲料转换效率与细胞能量代谢[J]. 华北农学报, 2009, 24(S1): 184-190.
- YUAN Z Q, TAN Z L, ZENG J Y, et al. Feed efficiency and cellular energy metabolism [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(S1): 184-190.
- [28] 嘉善新闻网. 我县鲈鱼养殖户投放鲈鱼早苗[EB/OL]. (2020-02-08). <http://jsxww.zjol.com.cn/jsnews/system/2020/02/28/032270537.shtml>.
- Jiashan News. Local perch farmers release early perch fry in our county [EB/OL]. (2020-02-08). <http://jsxww.zjol.com.cn/jsnews/system/2020/02/28/032270537.shtml>.
- [29] 肖玉刚. 罗氏沼虾的生物学及养殖概要[J]. 苏盐科技, 1994(4): 10-13, 37.
- XIAO Y G. Biology and culture summary of the giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) [J]. Jiangsu Province Salt Science & Technology, 1994(4): 10-13, 37.
- [30] 刘波, 蒋速飞, 黄志斌. 青虾的习性与饲料投喂关键技术[J]. 科学养鱼, 2020(10): 84.
- LIU B, JIANG S F, HUANG Z B. The habits and key feeding techniques of shrimp [J]. Scientific Fish Farming, 2020(10): 84.
- [31] 罗琳. 夏季珠江河口底层水体缺氧现象的模拟研究[D]. 广州: 中山大学, 2005.
- LUO L. Simulation study of hypoxia in bottom layers of the Pearl River estuary in summer [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2005.
- [32] 梁梓龙, 解志龙, 葛家春, 等. 不同水草种植模式对中华绒螯蟹扣蟹池塘养殖性能的影响[J]. 淡水渔业, 2024, 54(5): 43-50.
- LIANG Z L, XIE Z L, GE J C, et al. Effects of different macrophytes planting modes on pond culture performance of juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Freshwater Fisheries, 2024, 54(5): 43-50.
- [33] 陈琳, 李晨光, 李锋民, 等. 水生态修复植物水质净化能力综述[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(8): 1079-1084.
- CHEN L, LI C G, LI F M, et al. Review on water purification ability of aquatic ecological restoration plants [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(8): 1079-1084.
- [34] LI Z F, YU E M, ZHANG K, et al. Water treatment effect, microbial community structure, and metabolic characteristics in a field-scale aquaculture wastewater treatment system [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 930.
- [35] 吴怡, 邓天龙, 徐青, 等. 水环境中磷的赋存形态及其分析方法研究进展[J]. 岩矿测试, 2010, 29(5): 557-564.
- WU Y, DENG T L, XU Q, et al. Research progress on speciation analysis of phosphorus in aquatic environment [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(5): 557-564.
- [36] 陆晖, 胡湛波, 蒋哲, 等. 微纳米曝气技术对城市景观水体修复的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1755-1760.
- LU H, HU Z B, JIANG Z, et al. Remediation effect of micro-nanometer aeration on urban landscape waters [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1755-1760.
- [37] 张炜停. 气提内循环序批式生物微胶囊反应器低碳源污水脱氮研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- ZHANG W T. Study on nitrogen removal from low-carbon sewage by airlift internal loop sequencing batch bio-microcapsules reactor [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [38] 张俊, 姚晶晶, 程果峰, 等. 淡水池塘养殖尾水处理技术研究综述[J]. 渔业现代化, 2024, 51(4): 95-104.
- ZHANG J, YAO J J, CHENG G F, et al. A comprehensive review on purification technologies for pond aquaculture wastewater [J]. Fishery Modernization, 2024, 51(4): 95-104.

## Analysis of pollution characteristics of aquaculture wastewater in the Yangtze river delta green integrated development demonstration zone

XU Jianan<sup>1</sup>, GONG Qi<sup>2</sup>, ZHU Zewei<sup>2</sup>, LI Juanying<sup>2</sup>, YIN Jie<sup>2</sup>

(1.*Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, China*; 2.*College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

**Abstract:** Based on the water environmental pollution issues caused by aquaculture wastewater discharge in the Yangtze River Delta region, this study conducted a comprehensive survey on the pollution characteristics of aquaculture pond wastewater in the Yangtze River Delta Ecological Green Integrated Development Demonstration Zone (Wujiang District, Qingpu District, Jiashan County), and evaluated the removal effects of the "three ponds and two dams" wastewater treatment system on the main pollutants, including total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and permanganate index ( $COD_{Mn}$ ). The results showed that the overall pollution level of aquaculture wastewater in the demonstration zone was moderate, but there were significant differences in pollutant concentrations in the aquaculture wastewater of different areas, generally showing a phenomenon of Jiashan County > Wujiang District > Qingpu District. In addition, the pollution characteristics of different species aquaculture wastewater also showed significant differences. The pollutant concentrations in the aquaculture wastewater of reptiles were the highest, with TN and  $COD_{Mn}$  as representative pollutants, while those of crabs were the lowest, with only partial  $COD_{Mn}$  exceeding the standard. The "three ponds and two dams" process had the highest removal rate for TN, with sedimentation ponds being particularly effective. Followed by  $COD_{Mn}$ , with sedimentation ponds and ecological ponds showing better removal effects, while the lowest removal rate for TP. Based on the above pollution characteristics of aquaculture wastewater and the pollutant removal efficiency of the "three ponds and two dams" process, the following improvements to the wastewater treatment measures are proposed: For reptiles, it is recommended to increase the volume of sedimentation ponds and ecological ponds in the "three ponds and two dams" process to specifically improve the removal efficiency of TN and  $COD_{Mn}$ ; for fish and shrimp aquaculture wastewater with lower pollutant concentrations but greater fluctuations, maintain the existing process to ensure the standard discharge of pollutants; for crab aquaculture wastewater that occasionally exceeds the standard for  $COD_{Mn}$ , it is recommended to adopt a more economical sedimentation pond + filtering dam "one pond and one dam" treatment process, focusing on reducing the concentration of  $COD_{Mn}$ . The implementation of the above strategies is expected to promote the transformation of the aquaculture industry in the Yangtze River Delta demonstration zone towards green development and promote the continuous optimization of water environmental quality.

**Key words:** Yangtze river delta green integrated development demonstration zone; aquaculture wastewater; pollution characteristics; three ponds and two dams; optimization strategy