

水产养殖尾水-农田退水联合净化工艺设计

顾佳艳^{1,2}, 胡莹莹¹, 薛文谨¹, 何国富^{1,3,4,✉}, 陈潇楠¹, 田弘¹

1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 2. 上海寻合环境科技有限公司, 上海 200062; 3. 崇明生态研究院, 上海 200062; 4. 上海有机固废生物转化工程技术研究中心, 上海 200241

摘要 水产养殖尾水和农田退水是农业面源污染的主要来源之一。本研究基于 466 666.7 m² 现代农业地块, 设计了一套水产养殖尾水和农田退水联合净化工艺, 主要包括生态净化沟渠模块、农田净化模块以及景观湿地林模块。其中, 生态净化沟渠旨在充分利用小型河道排水系统控制 N、P 等污染物浓度, 包括生态集水预处理沟、悬浮生态床沟、生态输水廊道及调节稳定生态沟。结合水产养殖尾水和农田退水水质特点, 设计出水水质目标为化学需氧量 (COD) ≤ 40 mg·L⁻¹、总氮 (TN) ≤ 3 mg·L⁻¹、总磷 (TP) ≤ 0.5 mg·L⁻¹。经一年跟踪监测, 出水水质达到设计目标, 此外, 除 TN 指标, COD 和 TP 均有 8 个月能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类水质要求。工程实施后, 地块在保留原有生产功能的基础上兼具了水质净化及景观风貌功能。本工艺设计理念及工程实践可为其他农村地区农业面源污染控制, 尤其是养殖尾水-农田退水联合净化提供借鉴。

关键词 养殖尾水; 农田退水; 面源污染; 工艺设计; 水质净化与生态修复

水产养殖尾水及农田退水等农业面源污染由于来源广泛且分散、成分复杂、排除途径多样等特点, 是农村水环境治理的痛点^[1-3]。农田退水沟渠是重要的基础水利设施, 是存在于广大农田与接纳水体间的过渡地带, 不仅承担着汇水、排水的作用, 还具备一定程度的湿地净化水质功能, 逐渐成为研究农业面源污染防控技术的热点^[4-5]。

ALEXANDER 等^[6]、PETERSON 等^[7] 提出小型河道是氮、磷污染物控制的重要场所。目前, 在养殖尾水和农田退水净化方面, 已有研究通过对排水沟渠进行改造, 使其兼具排水和湿地净化作用。田昌等^[8] 发现生态沟渠在小流域农田排水中对总氮 (TN) 的拦截率达 47% 以上, 对总磷 (TP) 的拦截率达 54% 以上。秦沂樟等^[9-10] 研究发现长江流域农田不同类型生态排水沟渠对 TN、TP 的平均去除率分别为 47.72%~58.18%、53.53%~58.22%。刘兴国等^[11] 等实验发现生态沟渠对养殖水体中 TN、TP、COD 的去除率分别达到 18.35%、17.39%、18.18%。

从已有研究来看, 农田退水沟主要单独用于养殖尾水或者农田退水水质净化, 目前鲜有将养殖尾水与农田退水统筹考虑、系统设计的工程案例。而实际上, 水稻生长的需肥旺期与养殖需换水周期存在一定关联^[12], 通过合理规划, 一方面可以充分利用农田及其退水沟的净化功能, 另一方面减少养分流失, 充分利用养殖尾水中的 N、P 等营养物质。

基于此, 本研究设计了一套水产养殖-农田退水农业面源污染联合净化工艺, 充分利用研究地块现状设施及资源, 设计了包括生态净化沟渠、农田净化系统、景观湿地林在内的 3 个主要模块, 旨在净化水体的同时利用污水中的营养物质, 使得地块在原有生产功能的基础上兼具水质净化及景观风貌等功能。本研究成果和工程案例可为农业面源污染的联合净化处理提供借鉴。

1 研究区域概况

如图 1 所示, 本研究选定区域位于上海市崇明区, 占地面积 466 666.7 m², 其中水产养殖 260 000 m²

收稿日期: 2023-11-13; 录用日期: 2024-04-09

第一作者: 顾佳艳 (1992—), 女, 硕士, 助理研究员, jygu@des.ecnu.edu.cn; 通信作者: 何国富 (1975—), 男, 博士, 副教授, gfhe@des.ecnu.edu.cn



图1 项目区域示意图

Fig. 1 Project location map

(水面面积占 60%), 农田面积约 133 333.3 m², 林地面积约 48 000 m²。水产养殖品种主要为草鱼, 套养鲢鱼。每年 11 月至次年的 3 月上旬为忙季, 随后开展轮流清塘, 次年 3 月底前完成晒塘, 4 月鱼苗入塘, 鱼塘水深保持在 1.2~2.2 m。围绕鱼塘分布 6 条排水沟, 河长 240~830 m, 河宽 14~20 m, 现状河深约 1.4 m。

水稻种植一季, 种植周期为 5—11 月, 泡田最高水位约 10 cm(6—7 月), 其余时间种植绿肥。农田区域内有 8 条南北向排水沟, 每条沟宽 6~8 m、深 1.0~1.2 m、长 270~300 m, 总槽蓄容量约 8 640 m³, 护岸和河底面积约 16 000 m², 水面积约为 15 200 m², 占农田面积 8.8%。农田设有 2 个泵站, 灌溉与排水皆经过泵站进行。

研究区域属于现代化农业建设项目区, 水产养殖承包单位于 2014 年完成上海市标准化养殖池塘改造并采用绿色生态的养殖方式; 种植业方面按照高标准农田建设并实现绿色生态循环种植。区域内废水来源主要为农田退水(种植水稻时期的灌溉排水)和水产养殖尾水。

2 参数确定与工艺设计

2.1 水量及清淤量确定

1) 养殖尾水。研究区域有鱼塘 23 座, 每年 4—11 月排水量少, 主要考虑进水。11 月中旬至次年 3 月为忙季, 卖完一座塘的鱼后放水开始清塘, 清塘时期水位保持在 70 cm 左右。因此, 每年 11 月到次年 3 月, 排水量较大。为确保尾水净化和修复效果, 工艺设计须考虑极端状况, 即水质不变的情况下水量最大。

在非集中排水期(每年 4 月至 11 月中旬), 通常售完一塘鱼即清塘, 则假定 1 个月清 2 塘, 15 d 排 1 塘水。设计水深 2.0 m, 清塘水位保留在 0.7 m, 根据式 (1) 计算排水量。

$$V_1 = \frac{Sh}{T} \quad (1)$$

式中: V_1 为非集中排水期养殖尾水水量, m³·d⁻¹; S 为鱼塘面积, m²; h 为水位降低高度, m; T 为排一塘水的的天数, d。根据式 (1) 计算得到非集中排水期养殖尾水水量为 774.3 m³·d⁻¹。

在集中排水期(11 月中旬至次年 3 月), 23 个鱼塘保留 3 个不清塘, 假定 6 d 排完一塘水, 120 d 排完 20 塘。根据式 (2) 计算水量。

$$V_2 = \frac{20hS_{\text{总}}}{23T} \quad (2)$$

式中: V_2 为集中排水期养殖尾水水量, m³·d⁻¹; $S_{\text{总}}$ 为鱼塘总面积, m²; h 为水位降低高度, m; T 为排水总天数, d。根据式 (2) 计算得到集中排水期养殖尾水水量为 2 254.1 m³·d⁻¹。

2) 农田退水。水稻种植周期为 5—11 月上旬, 退水水质最差、水量最大的时期通常出现在 7 月, 此时泡

水水位(最高浸泡水位)高度约 10 cm, 根据式 (3) 计算最大农田退水水量。

$$V_{\text{农}} = \frac{S_{\text{农}} h_{\text{农}}}{T} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{农}}$ 为排水期水稻种植退水水量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; $S_{\text{农}}$ 为水稻种植的总面积, m^2 ; $h_{\text{农}}$ 为水位降低高度, m ; T 为排水总天数, d 。根据式 (3) 计算得到排水期水稻种植退水水量为 $1\,904.9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

经计算, 集中排水期排水量为 $2\,254.1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; 非集中排水期, 鱼塘排水量与农田退水量总计 $2\,679.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。考虑到极端天气、农业生产发展等因素, 取安全系数 1.2, 则总设计水量取 $3\,215 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3) 清淤量。鱼塘通常 3~5 a 清淤 1 次, 每次清淤 20 cm。假定 3 a 清 1 次淤泥, 每年 3 个塘不清塘, 根据式 (4) 计算年淤泥总量。

$$M = \frac{Sa}{n} \quad (4)$$

式中: M 为年淤泥总量, $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$; S 为需要清淤的鱼塘总面积, m^2 ; a 为清淤厚度, m ; n 为时间, a 。根据式 (4) 计算得到清淤量为 $9\,017 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.2 水质测定

样点水体 pH 采用便携式多参数水质仪 (SX725 型, 上海) 现场测定, 化学需氧量 (以 COD 计) 采用快速消解分光光度法 (DR3900, HACH, USA) 测定, 总氮 (TN) 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T 11894-1989) 测定, 总磷 (TP) 采用钼酸铵分光光度法 (GB/T 11893-1989) 测定。

根据《场地环境监测技术导则》及《地表水和污水监测技术规范》要求, 并结合示范区河道实际情况, 使用塑料采样器在采样点表层下 0.5 m 处采集水样, 采集 3 个重复样品, 分别盛于 1 L 聚乙烯瓶内。采样前, 用采样水多次润洗采样器与采样瓶, 记录标签。现场采集的所有样品经检查清点无误后, 对每个样品做好标记, 置于装有充足冰袋的保温箱中, 直至到达实验室。

2.3 水质目标

2019 年 12 月, 对研究区域内养殖尾水水质进行监测, 监测点位分别为 $121^{\circ}311'E, 31^{\circ}67'N$ 和 $121^{\circ}308'E, 31^{\circ}68'N$ 。结果表明, 2 个检测点的养殖尾水 pH 为 8.29 和 3.89; COD 值为 $48.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $45.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TN 浓度为 $3.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TP 浓度为 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据《淡水养殖废水排放标准》(SC/T 9101-2007), 养殖尾水主要表现为 COD 和 TN 超标。

根据设计内容, 在水稻种植季节 (5—11 月), 农田退水也将排入整个处理系统, 因此, 还需考虑农田退水中污染物的叠加效应。如表 1 所示, 长三角地区农田退水中 COD 值较低, 主要考虑施肥过程带来的 N、P 污染, 尤其是 TN。

表 1 长三角部分地区农田退水水质现状

Table 1 Water quality of return water of farmland in some areas of China $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

省(市)	地区	COD	氨氮	TN	TP	文献来源
江苏省	苏州	—	0.38~1.08	2.96~5.66	0.18~0.39	[13]
	高邮	—	—	10.99~11.2	0.15~0.3	[14]
	南通	22	6.28	—	3.08	[15]
	无锡	—	0.85~3.73	4.93~8.94	1.08~2.07	[16]
	江苏北部	13~37.4	0.18~2.18	0.84~5.98	0.046~1.59	[17]
	竺山湖	—	—	2.0~12.0	0.29~0.80	[18]
浙江省	杭嘉湖平原	—	—	6.1~17.0	0.19~4.3	[19]
	湖州	—	1.70~8.45	0.65~10.96	0.03~1.13	[20]
上海市	青浦	—	7.64~14.27	9.76~19.8	—	[13]
	金山	—	4.5	7.8	0.7	[21]

在 TN 去除方面，农田生态沟渠中氮的去除率通常在 20%~90%^[22]，其中植物吸收部分占 4%~11%，而微生物作用占 89%~96%^[23]。这可能是由于生态排水沟渠主要依靠硝化和反硝化作用进行，容易受到如植被种类、沟渠类型、环境因子、进水浓度等不同条件影响，导致 TN 削减效率变化范围很大^[24]。因此，在设计 TN 出水目标时不宜制定过高标准，但同时也要体现环境保护的目的。

表 2 为现行的三类环境管理水质标准，为便于分析讨论，有机物污染物方面统一以 COD 表示。其中《淡水养殖废水排放标准》(SC/T 9101-2007) 中指标为 COD_{Mn}，执行一级标准时，要求 COD_{Mn} ≤ 15 mg·L⁻¹。根据测定经验，同一种水测得的 COD 值大约为 COD_{Mn} 的 2~3 倍，结合《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)V 类水管理标准，表中《淡水养殖废水排放标准》(SC/T 9101-2007) 中指标 COD 上限设置为 40 mg·L⁻¹。

表 2 不同环境管理水质标准比较

Table 2 Different water quality standards of environmental management

执行标准	管理等级	COD/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
《淡水养殖废水排放标准》(SC/T 9101-2007)	一级	≤40	≤3.0	≤0.5
《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)	水田作物	≤150	不作要求	不作要求
《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)	Ⅲ类	≤20	≤1.0	≤0.2

结合养殖尾水现状及长三角地区农田退水水质梳理，设计最终出水水质目标执行《淡水养殖废水排放标准》(SC/T 9101-2007) 一级标准，即 COD ≤ 40 mg·L⁻¹(根据 COD_{Mn} 换算)、TN ≤ 3 mg·L⁻¹、TP ≤ 0.5 mg·L⁻¹。

2.4 工艺流程

1) 工艺运行内容。根据水稻种植及水产养殖排水与需水周期特点，设计两种运行模式。其中，每年 11 月至次年 3 月为水产养殖忙季，且农田中无作物生产，此时养殖尾水由新设管道进行收集，通过原稻田配水系统分配进入农田，由农田氧化塘系统进行净化。含有 N、P 等营养物质的养殖尾水进入农田后通过农田生态退水沟排入生态集水预处理沟；在水稻种植季节，农田退水也将一并进入生态集水预处理沟。4—10 月为水产养殖淡季，此时养殖尾水排放较少，设计尾水不经过农田氧化塘，直接排入生态集水预处理沟。5 月种植水稻，有 3~4 次干湿交替，此时浸泡水稻时由闸门控制引入生态集水预处理沟中水量，退水再一并进入处理系统净化。

经收集后的尾水(尾水+退水)将依次经过生态集水预处理沟、悬浮生态床沟、生态输水廊道、调节稳定生态沟，随后经水泵提升至景观湿地林，此时出水可直接排放，也可根据实际需求回补至生态集水预处理沟。本工艺流程及工艺各模块水流走向示意如图 2 和图 3 所示。

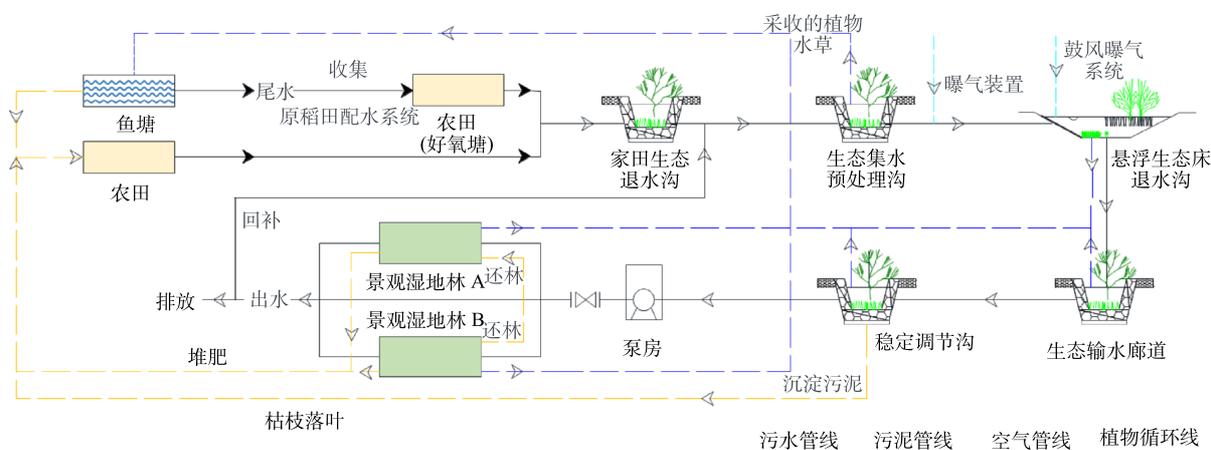
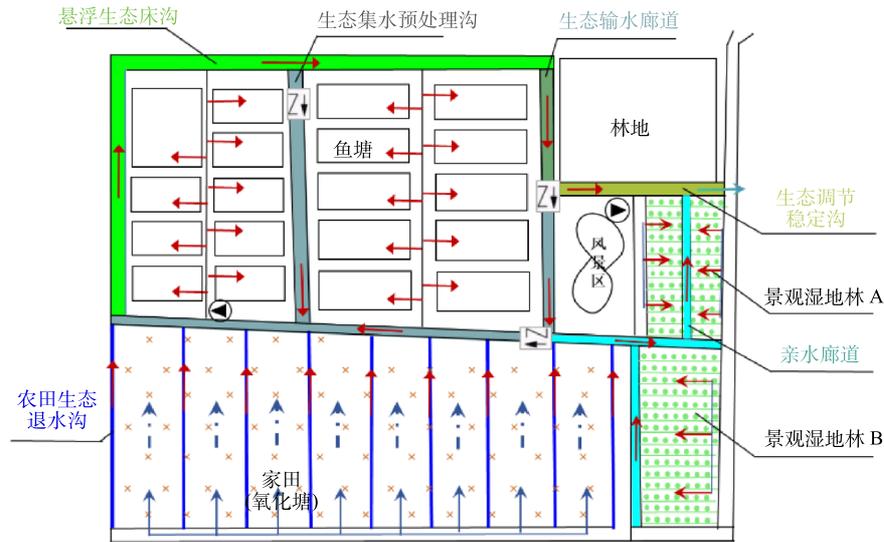


图 2 工艺流程图

Fig. 2 Diagram of process flow



注:红色箭头为尾水走向;深蓝色箭头为每年11月至次年3月利用农田氧化塘系统处理尾水时布水示意。

图 3 设计工艺各模块水流走向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the water flow direction of each module in the demonstration project

2) 工艺设计特点。对农田和鱼塘周边的排水沟道进行不同程度的改造, 主要为清淤和边坡加固; 在河底及护岸铺设生态透水砖; 种植黄菖蒲、旱伞草、黄花鸢尾等挺水植物; 种植金鱼藻、苦草等沉水植物, 设计沉水植物覆盖率为河底面积 20%~30%; 投加河蚌、田螺等底栖生物。每条生态沟渠河面设置不同数量的生态浮床, 通过植物和填料的共同作用去除污染物。同时生态浮床还能够有效地减缓风浪的冲击、减少水流短路, 保障水体的净化和生态恢复效果。悬浮生态床生态沟是整个系统去除污染物的关键工艺单元。鱼塘定期清淤的污泥、调节稳定生态沟中沉降的淤泥可用于还林或还田。景观湿地林中落叶、生态浮床上定期收割的植物经过收集后, 用于堆肥处置后还田。

2.5 农田净化模块

农田净化模块由现状农田及农业退水沟渠组成, 对农田中的 8 条退水沟进行改造, 清淤后总槽蓄容量 8 640 m³。养殖尾水中含有丰富的有机质与 N、P 等营养元素, 这为将农田地块改造为农田氧化塘提供了良好的建设条件。加深周围田埂至 15~25 cm, 水位设计维持在 10 cm 左右, 最短停留时间设计为 2.5 d, 表面负荷为 0.042 m³·(m²·d)⁻¹。

将鱼塘排放的养殖尾水通过农田的提升泵站与配水渠引入农田, 利用水稻根、茎、叶等吸收、吸附以及拦截等功能, 对养殖尾水中 N、P 等营养盐和颗粒物进行沉降以及吸收转化或利用。当农田处于排水期或无法接收尾水时, 将养殖尾水直接排入生态集水预处理沟。

2.6 净化沟渠模块

净化沟渠模块主要由 4 个部分组成, 各模块设计参数如表 3 所示。1) 生态集水预处理沟主要用于承接经过农田及农田退水沟渠的养殖尾水或水稻种植期的混合尾水, 尾水在预处理沟阶段进行充分混合, 并进行初步的净化。2) 悬浮生态床退水沟是净化尾水的主要板块, 经改造后其拥有最大的槽蓄容量, 且设置了生态浮

表 3 净化沟渠模块设计参数

Table 3 Design parameters of purification ditch module

设计板块	HRT/d	槽蓄容量/m ³	混合填料/m ³	挺水植物/m ²	沉水植物/m ²	水生动物/kg	微孔曝气装置/台	生态浮床/m ²
集水预处理沟	2.5	8 640	312	1 300	3 000	1 000	无	300
悬浮生态床沟	5	26 884	450	560	2 000	1 000	6	2 160
生态输水廊道	1.5	5 000	16.5	200	1 500	200	无	108
稳定调节沟	1	3 840	无	300	250	100	无	54

床、微孔曝气等装置，能快速、有效净化尾水。3) 生态输水廊道用于连接悬浮生态床和调节稳定沟，主要解决混合尾水由于曝气带来的底泥悬浮及生物膜脱落而导致水体浊度升高的问题。4) 调节稳定沟坡度设计为1%，用于进一步提高水体透明度。此处设置2个泥斗，设计每半年清理1次沉降淤泥，实际清理频次根据淤泥产生情况作相应调整。经过调节稳定沟的水体如果达标，可直接排放，如果不达标则通过泵提升，进入景观湿地林进一步净化。

2.7 景观湿地林

景观湿地林由两块面积相当的林地组成，总面积约为48 000 m²，设计为交替运行，采用潜流湿地与表流湿地相结合的方式构建湿地林。将现有林地建设为潜流湿地林，在林地中设置表流湿地。在林地周围设置围隔，高度设置30 cm。现有林地内种植大量的水杉，因此湿地木本植物以水杉为主，林带面积共6 750 m²。

在林地进水端设置生态配水渠，在湿地林中，每隔30 m灵活设置导流系统防止短流；在出水端设置生态沟，经过多级跌水进入生态清水廊道。设计水力停留时间2 d，改造后表流湿地水位保持在20 cm，种植挺水植物2 000 m²，敷设砾石、鹅卵石、煤渣和沸石等混合填料50 m³。再根据景观学需求和林木品种分布，设置观光生态栈道350 m²，铺设透水砖750 m²。在水杉落叶期，每月安排管护人员2次打捞水杉叶，在林地设计指定区域翻耕、堆肥、还田。

2.8 清水生态廊道及其他配套组件

在2块交替运行的湿地林出水沟及进水套闸所在沟段至北边湿地林跌水沟段，设计为清水生态廊道，调蓄容量约为5 500 m³，种植挺水植物100 m²，沉水植物200 m²，设计水力停留时间1 d。主要用以收集、储存达到处理目标的尾水，作为系统的内循环用水，用以提高系统的处理能力并抵抗冲击负荷，主要用于农田退水集中排放期的进水调节。在水质稳定期，则达标排放。

水产养殖区域设置竖井式泵站3座，设计流量为270 m³·h⁻¹，提升生态集水预处理沟内水体，以穿越主干渠进入养殖尾水收集管道。景观湿地林区域设置竖井泵站1座，设计流量为450 m³·h⁻¹，用以提水至景观湿地林。在农田净化单元出水口、生态集水预处理沟与悬浮生态床沟交接处和调节稳定生态沟处分别设置3座小型手动水闸，用以控制水体流动方向并调节运行水位。

2.9 采样点设置

根据混合尾水排放特点及处理流程设计，设置采样点如图4所示。采集鱼塘(进水)、生态集水预处理沟、农田氧化塘、悬浮生态床沟、生态输水廊道、稳定调结构、出水7个节点的水质指标进行监测，探究混合尾水在整个工艺系统中的净化情况。需要指出的是：进水采样点随着鱼塘排水位置的不同进行调整；景观湿地林采样点A、B根据湿地林运行情况交替采样。

3 工艺运行效果

对本项目出水进行了为期1 a的跟踪监测，对照设计的出水水质目标，出水COD值及TN、TP浓度均能达到设计目标。此外，依据《上海市水环境功能区划》，崇明区被划分为Ⅲ类水质控制区，将水质与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)的Ⅲ类水(COD≤20 mg·L⁻¹，TN≤1.0 mg·L⁻¹，TP≤0.2 mg·L⁻¹)标准进行比较，COD和TP的指标均有8个月能够满足Ⅲ类水质要求，但TN仍有一定的差距。尾水(尾水+退水)COD值及TN、TP浓度在本项目各工艺模块中变化情况如图5(a)~(c)所示。

监测期间进水水质波动较大，COD值在32.1~58.4 mg·L⁻¹，进水TN浓度在2.28~6.41 mg·L⁻¹，进水TP浓度在0.08~0.84 mg·L⁻¹。TN浓度最大值出现在2023年11月，该月份COD值也出现最大值，为58.4 mg·L⁻¹。跟踪调查发现，主要是采样期间鱼塘清塘排水导致污染进水浓度值升高。TP最大值出现在2023年6月，这与农田水稻种植有关，5月水稻插秧后，有3~4次集中施肥过程和干湿交替过程，也是农田退水排放的高峰期，若与鱼塘尾水排放形成叠加效应，将超过生态方法的负荷上限，导致处理效果下降。因此，本工艺设计了调节稳定沟和景观湿地林，能够起到水质缓冲和稀释的作用。

从进、出水中污染物的去除率来看，本工程对COD的去除率为37.38%~80.28%，平均去除率61.68%；对TN的去除率为32.53%~74.57%，平均去除率54.07%；对TP的去除率为3.55%~82.66%，平均去除率43.59%。总体来看，整个联合净化工艺对污染物有较好的去除效果，并且系统能保持相对稳定运行。

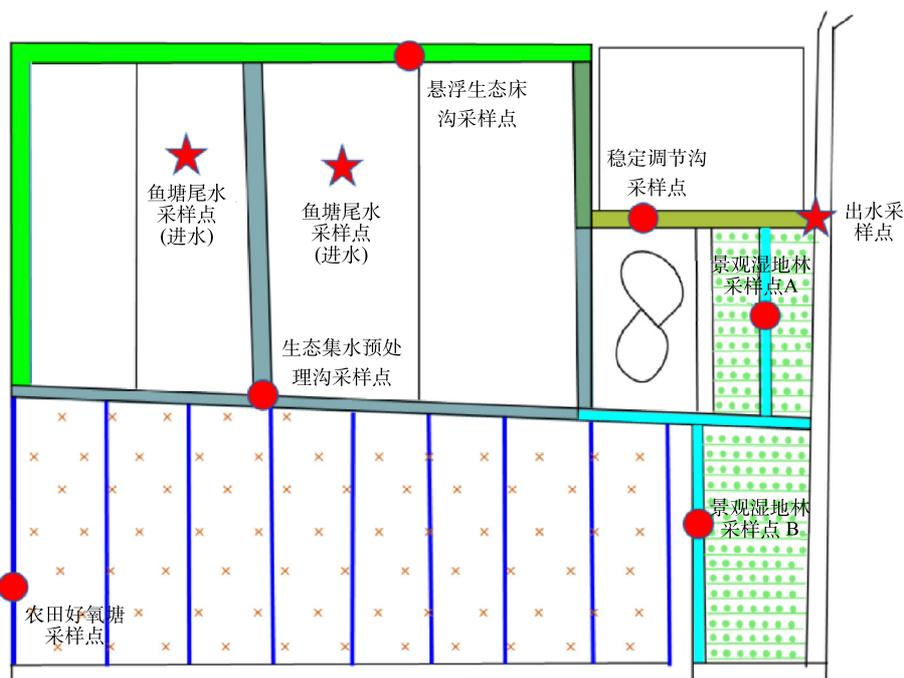
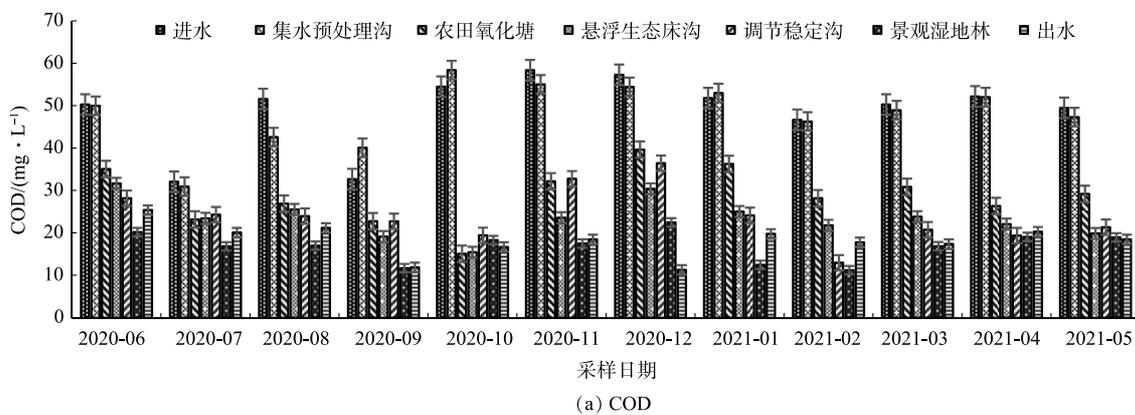
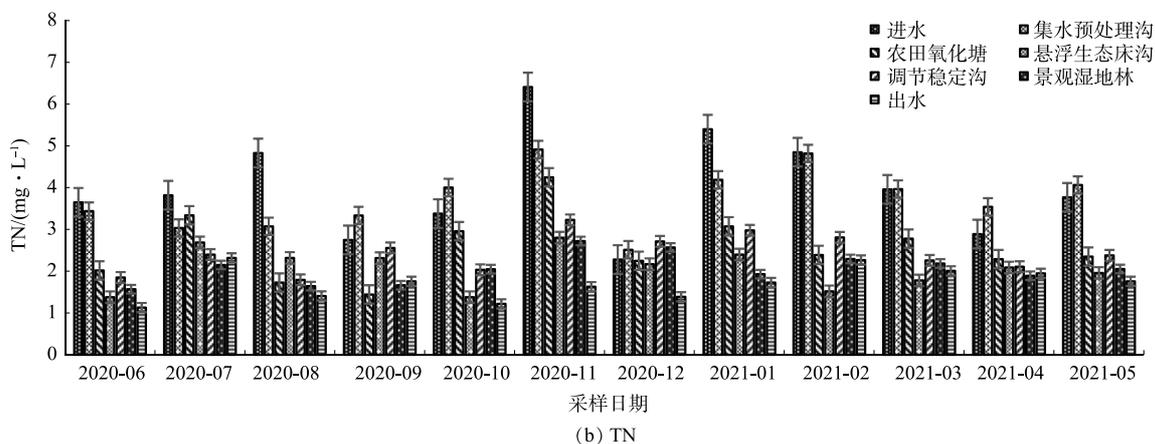


图4 采样点示意图

Fig. 4 Diagram of sample point



(a) COD



(b) TN

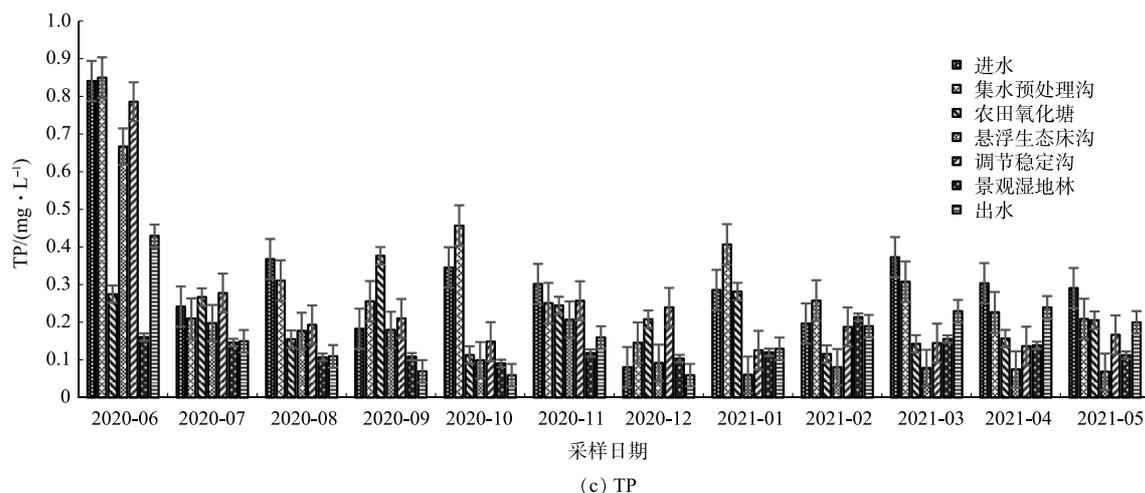


图5 联合净化工艺各模块中 COD 值及 TN、TP 浓度

Fig. 5 Concentration of COD, TN, and TP in each module of the purification process

从整个工艺流程来看,各污染物在不同净化模块中呈现波动变化。当混合尾水经由集水预处理沟到农田氧化塘时,COD值和TN浓度均出现不同程度下降。高阳等^[25]研究发现,农沟对氮、磷的去除效果显著高于毛沟、斗沟、支沟和干沟等排水沟道,可能是由于农沟有适宜的水深和较高的营养盐水平。但在本研究中,尾水经过农田氧化塘时在出现TP浓度升高的情况,主要出现在2020年7、9和12月,可能与水稻种植施肥后干湿交替排水有关。此外,微生物对营养物质的分解和转化是去除农田退水中氮、磷的主要途径^[26],而12月进水TP浓度最低($0.081 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),可能影响微生物对TP的去除效率。

悬浮生态床沟结合了生物膜与生态浮岛技术,是本工程去除污染物的核心工艺。此外,悬浮生态床沟位于鱼塘侧面,经改造后有整个净化系统中最大的槽蓄容量($26\ 884 \text{ m}^3$),尾水进入该模块后各污染物浓度迅速降低,末端出水COD、TN、TP浓度分别为 $15.4\sim 31.7$ 、 $1.38\sim 2.81$ 、 $0.061\sim 0.667 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

混合尾水由悬浮生态床沟进入生态输水廊道和稳定调节沟后各污染物出现波动,COD值在7月、9~12月出现上升,TN浓度除了7~8月均呈上升趋势,而TP浓度则在每个月均出现上升,这可能是因为TN和TP主要由生物过程去除,受环境影响较大。此外,悬浮生态床沟中设有曝气及生态浮床,该条件下聚磷菌会超量吸收磷,进入生态输水廊道和调节稳定沟后,只依靠植物的供氧,底泥可能出现缺氧状态,导致聚磷菌释磷,造成TP浓度升高。进入景观湿地林后,混合尾水各污染物浓度再次下降,随后根据工艺设计出水直接排放或继续进入循环系统。

4 结论

本研究基于 $466\ 666.7 \text{ m}^2$ 现代农业地块,设计了一套水产养殖尾水和农田退水联合净化工艺,结合水产养殖和农田种植季节特征以及退水特点,系统考虑现有各类型地块、沟渠等分布特点,充分利用小型河道、农田排水系统、林地控制N、P等污染物浓度。

1) 经过1a的跟踪检测,联合净化工艺在进水COD值 $32.1\sim 58.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水TN浓度 $2.28\sim 6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水TP浓度 $0.08\sim 0.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,出水COD为 $11.3\sim 25.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN为 $1.13\sim 2.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP为 $0.06\sim 0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,稳定达到设计目标($\text{COD}\leq 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{TN}\leq 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{TP}\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。此外,COD和TP出水分别有8个月可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)III类水质要求。

2) 养殖尾水及农田退水等面源污染的治理是一个综合性工程,经过改造设计,本工艺农业地块在保留原有生产功能的基础上,还实现了水产养殖尾水和农田退水的水质净化、水生态修复及景观再造等多项功能。工艺设计理念和工程实践可为养殖尾水及农田退水等污染控制与综合治理、生态修复提供借鉴。

参考文献

- [1] 李裕元,李希,孟岑,等.我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径[J].农业现代化研究,2021,42(2):185-197.
- [2] 王钰钦,郑尧,钱信宇,等.中国水产养殖尾水污染现状及净化技术研究进展[J].农学学报,2022,12(3):65-70.

- [3] 董怡华, 张盛宇, 陈峰, 等. 植物塘-人工湿地复合系统基质与植物筛选及农田退水处理研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 771-779.
- [4] 王华栋, 唐浩, 张卫. 生态沟渠对农田径流污染物的去除效果[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(9): 1083-1088.
- [5] 郝贝贝, 王楠, 吴昊平, 等. 生态沟渠对珠三角稻田径流污染的削减功能研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1856-1864.
- [6] ALEXANDER R B, SMITH R A, SCHWARZ G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. *Nature*, 2000, 403(6771): 758.
- [7] PETERSON B J, WOLLHEIM W M, MULHOLLAND P J, et al. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 86-90.
- [8] 田昌, 陈敏, 周旋, 等. 生态沟渠对小流域农田排水中氮磷的拦截效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(4): 186-191.
- [9] 秦沂樟, 白静, 赵健, 等. 生态沟渠磷拦截效应对不同因子的响应特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(S1): 122-130.
- [10] 秦沂樟, 白静, 赵健, 等. 长江流域农田生态排水沟渠氮磷削减效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2023: 1-15.
- [11] 刘兴国, 刘兆普, 徐皓, 等. 生态工程化循环水池塘养殖系统[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 237-244.
- [12] 冯金亮, 李奎, 孙静好, 等. 复合生态沟渠对池塘养殖尾水和稻田退水的净化效果[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 206-213.
- [13] 张亚莹. 沟塘湿地对农田排水氮磷污染的截留作用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [14] 吴梦. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. *江西农业*, 2019(16): 109.
- [15] 李益群, 王珂. 汛期农田退水对水环境的污染分析及其应对措施——以苏中某农业大县实调为例[J]. *泰州职业技术学院学报*, 2022, 22(3): 59-63.
- [16] 王沛芳, 娄明月, 钱进, 等. 农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 1-10.
- [17] 曹杨. 某地农田灌溉退水水质及对主要河流水质影响的分析[J]. *环境科技*, 2021, 34(5): 67-71.
- [18] 胡韵爽. 水生植物-基质组合技术对农田退水的净化效果研究[D]. 天津: 天津农学院, 2023.
- [19] 王永尚. 南方湿润平原区农田氮、磷流失研究及对策[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [20] 晋迎兵. 基于炭基有机肥替代和生态沟拦截的稻田氮磷流失控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [21] 盛世雯, 陈雪初, 聂晓钟, 等. 大都市郊野农林湿复合生态空间设计——以上海金山区友好村农林水乡为例[J]. *园林*, 2022, 39(6): 74-81.
- [22] LI X, ZHANG W, ZHAO C, et al. Nitrogen interception and fate in vegetated ditches using the isotope tracer method: A simulation study in northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105893.
- [23] LIN Y F, JING S R, WANG T W, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(3): 413-420.
- [24] SHEN W, LI S, MI M, et al. What makes ditches and ponds more efficient in nitrogen control?[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 314: 107541.
- [25] 高阳, 王超, 王沛芳, 等. 不同尺度排水沟道对稻田退水中氮磷的削减规律及影响因素研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(5): 8-15.
- [26] 程浩森, 季书, 葛恒军, 等. 生态沟渠对农田面源污染的消减机理及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 42-52.

(责任编辑: 曲娜)

Design of combined purification process for aquaculture tailwater and return water of farmland

GU Jiayan^{1,2}, HU Yingying¹, XUE Wenjin¹, HE Guofu^{1,3,4,*}, CHEN Xiaonan¹, TIAN Hong¹

1. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-restoration, School of Ecology and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Xunhe Environmental Technology Co. Ltd., Shanghai 200062, China; 3. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China; 4. Shanghai Organic Solid Wastes Biotransformation Engineering Technical Research Center, Shanghai 200241, China

*Corresponding author, E-mail: gfhe@des.ecnu.edu.cn

Abstract Aquaculture wastewater and return water of farmland are two major sources of non-point source pollution in agriculture. In the study, a combined purification process for aquaculture wastewater and return water of farmland was designed based on a 466 666.7 m² modern agricultural site. This process included three types of modules: ecological purification ditch, farmland purification, and landscape wetland forest. Of which, the ecological purification ditch aims to utilize small-scale river drainage systems to control the concentration of pollutants such as nitrogen and phosphorus. It consists of ecological collection and pre-treatment ditches, suspended ecological bed ditches, ecological water conveyance corridors, and regulating and stabilizing ecological ditches. Taking into account the water quality characteristics of aquaculture wastewater and return water of farmland, the effluent water quality were set as follows: chemical oxygen demand (COD) ≤ 40 mg·L⁻¹, total nitrogen (TN) ≤ 3 mg·L⁻¹, total phosphorus (TP) ≤ 0.5 mg·L⁻¹. After one year of tracking and monitoring, the effluent water quality reached the design targets. In addition, except for TN, both COD and TP could meet the Class III water quality requirements specified in the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838-2002) for eight months. After implementing this engineering project, the agricultural site not only retains its original production function but also incorporates water purification and landscape aesthetics. The design concept and engineering practices of this process can serve as a reference for controlling agricultural non-point source pollution, particularly in the combined purification of aquaculture wastewater and return water of farmland in other rural areas.

Keywords aquaculture tail water; return water of farmland; non-point sources; process design; water purification and ecological restoration