

南美白对虾循环水养殖系统设计养殖手册

2025 年 3 月

日本大乘農業科技合同会社

日本グリンテック株式会社

此手册是基于日本大乘農業科技合同会社和日本グリンテック株式
会社在中试规模中的南美白对虾养殖系统开发中总结的知识和技术。

编写人：张驰

审核人：张振亚教授 张振家教授

2025年3月

目录

第1章 绪论.....	1
1.1 工厂化循环水养殖系统简介	1
1.2 养殖的可行性和市场前景	1
1.3 编写手册的目的和适用范围	2
第2章 南美白对虾的生物特性与养殖特点.....	3
2.1 南美白对虾的基本生物学特征	3
2.1.1 生活史和生命周期	3
2.1.2 生长环境要求（温度、盐度、pH值等）	3
2.1.3 营养需求与饲料转化效率.....	4
2.2 南美白对虾在循环水系统中的养殖特点	5
2.2.1 高密度养殖的优势与挑战.....	5
2.2.2 水质要求及维护策略.....	6
第3章 工厂化循环水系统的设计.....	8
3.1 循环水系统的基本构成	8
3.1.1 水处理设备.....	8
3.1.2 生物过滤器的设计与使用.....	11
3.1.3 供氧设备.....	13
3.2 养殖车间的布局设计	14
3.2.1 水池设计与分布.....	14
3.2.2 水流设计与循环模式.....	16
3.2.3 污水排放与回收系统.....	17
3.3 其他设施配置	17
3.3.1 光照系统.....	17
3.3.2 通风系统.....	19
3.3.3 备用电力系统.....	20
第4章 工厂化循环水系统的施工.....	22
4.1 施工前的准备工作	22
4.2 施工过程中的设备安装和配套系统布置	23
4.3 设备调试与运行测试	24

第 5 章 南美白对虾日常养殖管理.....	26
5.1 水质监控与维护	26
5.1.1 pH、盐度、温度、溶解氧的控制.....	26
5.1.2 水质检测频率及数据记录.....	29
5.2 饲养管理	30
5.2.1 饲料种类与配比.....	30
5.2.2 饲料投喂时间与方法.....	31
5.3 疾病预防与处理	33
第 6 章 日常设备维护.....	34
6.1 过滤设备的清洁与更换	34
6.2 生物滤池的维护与管理	36
6.3 管道、曝气及其他设备的巡查	37
6.4 系统的定期清洗与消毒	39
第 7 章 风险控制与应急措施.....	41
7.1 常见故障的识别与处理	41
7.1.1 水质异常.....	41
7.1.2 设备故障和用电故障解决.....	42
7.2 风险评估与定期安全演练	44
第 8 章 数据记录与分析.....	47
8.1 数据收集的标准与内容	47
8.1.1 生长指标（个体大小、重量）	47
8.1.2 水质指标（日常数据）	49
第 9 章 系统升级与改造.....	53
9.1 提升养殖密度的系统调整	53
9.2 新型设计的改造	54
9.3 环保与节能措施	54
9.3.1 废水回收利用.....	54
9.3.2 能源节约方案.....	55
参考文献.....	56

第 1 章 绪论

1.1 工厂化循环水养殖系统简介

工厂化循环水养殖系统（RAS, Recirculating Aquaculture System）是一种通过高效水处理技术，实现水资源循环利用的现代化水产养殖方式。该系统由养殖池、生物过滤器、物理过滤器、气体交换设备、紫外消毒器、加热或冷却设备以及水质监测系统组成。其核心在于通过连续的水处理和循环，保持稳定的水质，减少养殖过程中的环境污染，提升养殖密度和产出效益。

与传统的池塘或网箱养殖相比，RAS 具有显著优势。首先，它极大地节约了水资源，水的消耗量仅为传统养殖方式的 5-10%（本技术 1%）。其次，系统具备高度可控性，通过精确调节水温、溶解氧、pH 值及氮循环等关键参数，优化养殖环境。在当今气候变化的背景下，极端天气现象增多，传统养殖业容易受制于当地的地理气候，可能一次降温或者暴风雨导致灭顶之灾。而且 RAS 封闭运行模式降低了病原体传播的风险，从而显著减少了养殖病害的发生。RAS 不依赖自然环境，适合在城市或环境敏感区域开展高效养殖，为可持续水产养殖提供了重要的技术路径。

1.2 养殖的可行性和市场前景

随着全球人口增长和对高品质蛋白需求的增加，水产品市场的需求正快速扩大。尤其是南美白对虾、三文鱼等高附加值水产品，其市场潜力十分可观。然而，海洋捕捞资源的日益枯竭，加之传统养殖方式受到土地、淡水资源和环境容量的多重限制，促使工厂化循环水养殖系统成为水产养殖未来发展的重要方向。

从可行性来看，RAS 技术已经趋于成熟。近年来，随着生物过滤材料、传感器技术和自动化控制和人工智能技术的不断进步，RAS 在商业化应用中的表现令人瞩目，为规模化推广奠定了技术基础。此外，全球多国出台支持环保型水产养殖的政策，进一步推动了 RAS 的发展。同时，RAS 可根据

不同的养殖品种和规模需求灵活设计，适用于南美白对虾、鳟鱼和鲑鱼等多种水产动物。

从市场前景看，联合国粮农组织（FAO）数据显示，未来十年水产品消费量将持续增长。RAS 作为一种环保高效的养殖模式，已成为政策和资本关注的焦点，未来有望在产业升级中发挥重要作用。以南美白对虾为例，其全球市场规模已超过 500 亿美元，且呈现持续增长态势。高密度、高产量的 RAS 技术在缓解供需矛盾方面将发挥关键作用。

1.3 编写手册的目的和适用范围

本手册旨在为工厂化循环水养殖系统的设计、建设、运营与维护提供系统化且实用的指导。通过总结行业最佳实践和最新技术，帮助读者全面掌握 RAS 的基本原理与关键操作要点，从而提升养殖效率、降低运行成本，并实现水产养殖的可持续发展目标。

手册适用对象包括初学者、养殖企业及投资者。初学者可通过手册快速了解 RAS 的原理、设备和操作流程；养殖企业的技术人员和管理者能够借助手册优化现有系统；投资者则可将其作为评估 RAS 项目潜力的参考指南。此外，本手册适用于从事对虾、鱼类等水产动物高密度养殖的试验性或商业化项目，涵盖从小规模试验系统到大规模商业化项目的规划、实施与管理。

本手册因涉及到一些关键技术参数，仅限于内部使用，严禁外传泄密。

第2章 南美白对虾的生物特性与养殖特点

2.1 南美白对虾的基本生物学特征

2.1.1 生活史和生命周期

南美白对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 适应能力强，自然栖息区为泥质海底，水深 0~72m，能在盐度 0.5~35‰ 的水域中生长，2~7cm 的幼虾，其盐度允许范围为 2~78‰。能在水温为 6~40°C 的水域中生存，生长水温为 13~40°C，最适生长水温为 22~30°C。对高温忍受极限 43.5°C（渐变幅度），对低温适应能力较差，水温低于 18°C，其摄食活动受到影响，9°C 以下时侧卧水底。要求水质清新，溶氧量在 5 mg/L 以上，能忍受的最低溶氧量为 1.2 mg/L。适应的 pH 为 7.5~8.5，要求氨氮含量较低。可生活在海水、咸淡水和淡水中。刚孵出的浮游幼体和幼虾在饵料生物丰富的河口附近海区和海岸泻湖软泥底质的浅海中的低盐水域（4~30‰）觅食生长，体长平均达到 12 cm 时开始向近海回游，大量回游是在一个月的最低潮时，与满月和新月的时间相同。

人工养殖条件下，白天一般都静伏池底，入幕后则活动频繁。南美白对虾食性为杂食性。幼体以浮游动物的无节幼体为食；幼虾除摄食浮游动物外，也摄食底栖动物生物幼体；成虾则以活的或死的动植物及有机碎屑为食，如蠕虫、各种水生昆虫及其幼体、小型软体动物和甲壳类、藻类等。在人工饲料条件下，对饲料的营养需求低，饲料的粗蛋白含量 25~30% 就可满足其营养需求。该虾具有相互残食的习性，而且随着生长这种习性表现更为明显。南美白对虾为开放型纳精囊类型。其生殖习性与中国对虾不同。雌雄虾性腺完全成熟后，才进行交配。交配时，雄虾排出精囊粘附在雌虾胸部第 3—4 对步足之间(纳精囊位置)交配后数小时，雌虾开始产卵，精囊同时释放精子，在水中完成受精。

2.1.2 人工养殖生长环境要求（温度、盐度、pH 值等）

南美白对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 适宜生长在 26~32°C 的水温下，日

均温度变化最好不要超过 2°C；耐受盐度范围为 0.5–40‰，最佳生长盐度为 10–35‰，成虾日均盐度变化最好不要超过 3；pH 值需保持在 7.5–8.5 之间，并尽量稳定，日波动不超过 0.5。溶解氧浓度应不低于 5 mg/L，氨氮（游离氨）和亚硝酸氮浓度分别应低于 0.05 mg/L 和 0.1 mg/L（在实际中经验，氨盐和亚硝酸盐不超过 1 ppm），以防止中毒。水体的碱度和硬度分别保持在 80–150 mg/L 和 100–200 mg/L（以 CaCO₃ 计）有助于稳定 pH 和促进脱壳发育。适当使用钙镁钾和微量元素补充剂。光照适中，底质需清洁，避免有机质堆积产生有害物质。养殖密度根据系统选择，传统模式为 20–50 尾/平米，高密度循环水养殖（RAS）可达 100–300 尾/平米。本次高密度循环水养殖系统探索 1000 尾/平米养殖密度的可行性。

2.1.3 营养需求与饲料转化效率

南美白对虾对营养的需求较为全面，涉及蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素和矿物质等多个方面。合理的营养供给是其高效生长、增强免疫力和提高存活率的关键，而饲料转化效率（Feed Conversion Ratio, FCR）则是衡量饲养管理水平的重要指标。

蛋白质是南美白对虾的主要营养来源，用于生长、脱壳和组织修复。饲料蛋白质含量一般需保持在 30–40% 之间，高密度养殖条件下蛋白质需求更高。蛋白质来源包括鱼粉、大豆蛋白和其他植物蛋白，但需注意氨基酸平衡，特别是赖氨酸和蛋氨酸的补充。不平衡的氨基酸结构会降低蛋白质利用率，导致饲料转化效率下降。

脂肪是对虾的重要能量来源，饲料中的脂肪含量一般在 5–8%。南美白对虾对必需脂肪酸（如二十碳五烯酸 EPA 和二十二碳六烯酸 DHA）需求较高，这些物质对其生长和免疫功能至关重要。鱼油和藻是优质脂肪酸的主要来源，但为降低成本，可部分使用植物油替代。

碳水化合物主要为南美白对虾提供能量，饲料中一般添加 10–20% 的碳水化合物。对虾对碳水化合物的利用能力有限，过多会导致糖代谢负担，从而影响健康。通过合理搭配淀粉类原料（如玉米和小麦），可以有效提高能量

利用效率并降低饲料成本。

维生素（如维生素 C、维生素 E）在抗氧化、免疫调节和促进生长中起重要作用，饲料中需根据配方科学添加。矿物质（如钙、磷、镁、钾）对于虾壳形成和渗透压调节不可或缺，尤其是在低盐度养殖条件下，需要额外补充钙镁钾。

南美白对虾的饲料转化效率通常为 1.2–1.8，即每增重 1 公斤需要 1.2–1.8 公斤饲料。在高密度循环水养殖中，由于环境控制良好，FCR 可降低至 1.0–1.2。影响 FCR 的因素包括饲料配方、加工质量、投喂方式和水质管理。优质饲料能显著提高 FCR，降低养殖成本，同时减少环境污染。

南美白对虾的营养需求与饲料转化效率密切相关。科学的营养供给和高效的饲养管理，不仅能够促进对虾健康生长，还能实现更高的经济效益和环境可持续性。

2.2 南美白对虾在循环水系统中的养殖特点

2.2.1 高密度养殖的优势与挑战

南美白对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 在循环水养殖系统 (RAS) 中的高密度养殖，因其资源利用效率高和环境友好性，被视为现代水产养殖的趋势。在实际应用中，这种模式既有显著优势，也面临诸多挑战。

RAS 通过生物过滤和物理处理技术实现水体的循环再利用，大大减少了用水量和排污量，与传统池塘养殖相比节约了 90% 以上（本技术 99.9%）的水资源，特别适合水资源匮乏或环保要求严格的地区。系统内的温度、盐度、溶解氧、pH 值等关键参数可以精确控制，避免外界环境的剧烈变化对对虾生长的影响。这种稳定的环境能显著提高对虾的生长速度和存活率。由于与外界水体隔离，RAS 有效降低了病原体的入侵风险，尤其是在病毒（如白斑综合症病毒）多发的养殖区域，这种模式能显著减少疾病暴发的概率。

在 RAS 中，可实现每平方米 100–300 尾甚至更高的养殖密度，单位面积的产量远超传统养殖模式，为解决土地资源紧张和产量需求增加的问题提

供了可行方案。RAS 能通过高效的固体废弃物捕捉和水体净化，减少养殖废水中氨氮、亚硝酸盐和有机物的排放，降低养殖对环境的污染。

RAS 的初始投资大，主要用于生物过滤器、泵、增氧设备和水质监测系统等设备采购。运行过程中，能源消耗（如泵的运行和增氧）及维护费用较高，对资金和技术支持要求较高。高密度养殖对水质要求苛刻，需实时监控并调控氨氮、亚硝酸盐、溶解氧和 pH 等关键指标。如果处理不及时，水质恶化会迅速影响对虾健康并降低存活率。尽管 RAS 减少了外界病原体的侵入，但一旦系统内部出现疾病，由于养殖密度高，病害扩散速度快，可能导致大面积损失。因此，生物安全管理和疫病防控极为重要。

操作和管理 RAS 需要专业技术，包括设备维护、养殖管理和水质控制等领域，普通养殖人员可能需要额外培训。

南美白对虾在循环水养殖系统中的高密度养殖具有节水、高产、环保等显著优势，但在技术要求、成本投入和水质管理方面也面临挑战。随着设备成本的下降和技术的成熟，这一模式在未来有望成为水产养殖的主流。为提高效益，应通过优化系统设计、提升养殖技术和强化管理能力来应对挑战，实现可持续发展。

2.2.2 水质要求及维护策略

在工厂化循环水养殖系统（RAS）中，水质的稳定性和适宜性是确保养殖动物健康生长和高效生产的关键。以下是 RAS 常见的水质参数要求及维护策略。

表 1 水质要求

指标	合理范围	异常值	处理方法
溶解氧， mg/L	> 4.0	≤ 4.0	<ul style="list-style-type: none">● 检查曝气设施是否工作良好；● 池内水过于浑浊导致

			<p>微生物耗氧增大；</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 是否池内养殖密度过高。
pH	7.6~8.4	/	<ul style="list-style-type: none"> ● 勤监测 pH，若低于 7.6 或近几日有连续下跌，适量泼洒石灰乳以维持 pH 在 8.0 以上； ● 藻类过多繁殖会影响 pH 稳定。
氨氮， mg/L	< 0.1	> 0.1	<ul style="list-style-type: none"> ● 检查生物池工作状况； ● 换水。
亚硝酸盐氮， mg/L	< 0.1	≥ 0.1	<ul style="list-style-type: none"> ● 检查生物池工作状况； ● 换水。
硝酸盐氮， mg/L	/	/	<ul style="list-style-type: none"> ● 一般不会高于 200 mg/L。
温度， °C	26~31	< 24;	<ul style="list-style-type: none"> ● 温度低于 24 摄氏度摄食受影响；温度低于 22 摄氏度可能会有部分虾死亡；温度低于 20 摄氏度虾活力降低，每日有死亡现象。
盐度， ‰	/	/	可以淡化至 3‰

第3章 工厂化循环水系统的设计

3.1 本技术的循环水系统基本构成

3.1.1 水处理系统

水处理系统是循环水养殖系统的核心部件，良好的水处理是保证养殖成功的关键。水处理系统一般由①养殖池单元；②物理过滤单元；③生物反应器单元组成。各个单元主要包含以下主要组成部分：污物收集装置、物理过滤器、生物过滤器、循环水泵、循环水管件等。

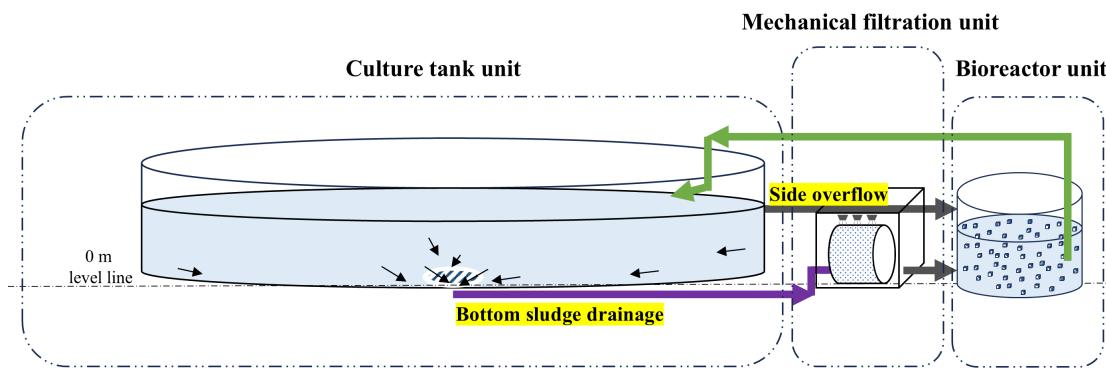


图1 循环系统整体示意图

污物收集装置目的是快速高效收集养殖中不断产生的固体物（包括大量粪便和食物残渣等）。一般认为这些固体物含有系统中 70%以上的污染，粪便和食物残渣等的移除可以极大减小生物过滤器的处理负荷。如果这些固体物没有被及时移出养殖系统，随着时间增长会导致溶解于水体中的营养物质（氨氮等）快速增长，增大生物过滤器的处理负担。也会导致水体浑浊，甚至会有大量微生物在池内繁殖，进一步导致池内溶解氧降低、水体发臭等恶性事件，最终导致养殖失败。例如，本次养殖试验中，养殖池中的残留饲料第 4 天后开始变成氨氮，一周后，氨氮转化完成。固体物的移出首先要依靠良好的污物收集装置，本手册总结使用“鱼马桶”收集污物的方案。



图 1 养殖池底部的鱼马桶和污物过滤管

物理过滤器是将收集的粪便、食物残渣等固形物进行固液分离，将固形污染物移出养殖系统的装置。本手册编写基于物理过滤器使用反冲洗微滤机。根据包裹过滤网的孔径大小，微滤机一般可以过滤出大于 $75 \mu\text{m}$ （使用 200 目滤网）的固形物。反冲洗微滤机的款型一般按照能通过过滤网的最大水流量标识，例如， 8 ton/h 即为干净水循环条件下，每小时能经过反冲洗微滤机（滤网）的最大水量为 8 吨。一般，按照安全系数 1.5~5 倍，根据养殖池池水的循环流量，选择较大型号的微滤机。下表展示 20 吨标准池的微滤机型号设计案例。

表 2 微滤机流量和养殖池有效容积的设计案例

养殖池直径	5 m
池水高度	1 m
养殖池有效容积	19.6 m^3

设计养殖池水循环流量	每小时循环 10 吨
安全系数	3 (3~10)
微滤机型号	$3 \times 10 = 30 \text{ ton/h}$

案例 A: 试验测得 10 ton/h 的微滤机自动反冲洗开启时, 每次排水量 0.25 升, 每次干重污物排出量为 1.27 克。在养殖过程中排污量最大时期每 5 分钟一次自动反冲洗, 每天冲洗 288 次, 可以排出干重 365.8 克的固体废物。若按照每平米最大养殖产量为 20 千克时, 饲料投喂量为虾重的 3%, 每平米每天投入饲料量为 0.6 千克, 此时排污量为 0.18 千克 (饲料重量的 30%), 考虑到集污效率和微滤机的排污效率为污物的 70%, 每平米每天可排出 0.126 千克的污物, 即 10 ton/h 的微滤机能满足 2.9 平米的养殖需求; 如果反冲洗间隔调整为 2 分钟, 这样微滤机就可以满足 7.3 平米的需求。本次试验较小的养殖池为 7 平米 (1 米水深), 使用 10 ton/h 的微滤机, 可以满足养殖排污高峰时期的需求。

循环水泵采用直流供电水泵, 便于根据实际情况调加流量。最大流量应大于等于设计的养殖池水循环流量。养殖池水循环设计流量按照每 1 至 2 小时将整个池水换一遍。一般按照 1~1.2 的安全系数选择对应流量的水泵。水泵是水循环的动力部件, 保证整个系统的水依次流过污物收集装置、物理过滤器、生物过滤器, 完成污物的分离与分解工作。因此应选用可靠耐用的循环水泵。必要时, 有备用品可用。循环水泵需要 24 小时几乎不间断工作, 电力消耗需要适当考虑。本技术参数为选择水泵的扬程为实际操作扬程的 1.5 倍最佳。

循环水管件采用 PVC 管材, 接端使用 PVC 专用粘结胶水, 粘结力牢靠。按照标准粘结操作粘结管件, 避免粘结不牢导致部件受力情况下漏水。粘结头应保证干净、干燥, 需要使用洁净的操纵工具避免粘结部位有污物影响粘结牢固程度。参照粘结胶水使用说明, 按压数秒至数分钟 (依据环境温度和管材直径不同) 后保证粘结剂干结, 粘结牢固。按压粘结期间避免扭动错动粘结部位。粘结部位请检查是牢固, 特别是隐藏位置部件、不易维修位置部

件，如有不牢靠之处，擦拭干净，重新粘结。

3.1.2 生物过滤器的设计与使用

生物过滤器是整个循环水养殖系统和水处理系统中的核心部件。生物过滤器主要原理是利用微生物处理养殖过程中产生的有害的化合物。主要是利用硝化反应将氨（ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ）和亚硝酸盐（ NO_2^- ）转化为硝酸盐（ NO_3^- ），使水质指标维持到可以健康养殖水生生物的水平。

氮化合物（如氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮）在水产养殖系统中常见，对南美白对虾的毒性强度依次为氨氮 > 亚硝酸盐氮 > 硝酸盐氮。氨氮的主要毒性来源是游离氨（ NH_3 ），在高 pH 和高温条件下比例增加，其毒性强烈，可通过干扰细胞离子平衡和代谢功能引发严重的生理问题。当游离氨浓度达到 0.1 mg/L 以上时，会导致对虾摄食减少、行为异常，而超过 0.5 mg/L 则可能致死。铵离子（ NH_4^+ ）毒性较低，但长期暴露或高浓度情况下仍会影响对虾生长和健康。亚硝酸盐（ NO_2^- ）的毒性主要表现在血液系统。它与对虾血蓝蛋白结合生成高铁血蓝蛋白（MetHb），从而降低氧运输能力，导致缺氧。此外，亚硝酸盐还会引发氧化应激，损害细胞膜和 DNA。在低盐度环境中，亚硝酸盐毒性增强，对虾在 1 mg/L 以下的浓度通常安全，但当浓度超过 5 mg/L 时，可能出现缺氧症状和死亡。硝酸盐（ NO_3^- ）的毒性最弱，主要通过增加渗透压对对虾产生慢性影响。尽管对虾能耐受较高浓度的硝酸盐（96 小时 LC50 通常在 96~500 mg/L 之间），但长期暴露于 100 mg/L 以上的浓度可能导致免疫力下降。高盐度可有效缓解亚硝酸盐和硝酸盐的毒性，因此在养殖管理中适当调整盐度有助于降低氮化合物的影响。

生物过滤器的大小应按照养殖密度和水处理载体的类型决定。根据养殖的生物量密度，通用生物滤池面积一般占养殖池面积的 20~60%。本次南美白对虾的产量为 15 千克/平方米，生物滤池占养殖池面积的 5~10%，基本可以满足最大密度设计需要。按照设计原则，可按保险系数 1.2~2.0 采用更大面积的生物滤池，消除因硝化细菌等微生物活力波动造成的水质风险。一般需要填充 30% 生物滤池容积的生物载体。根据使用生物载体的种类的不同，填充和微生物驯化需要考虑养殖的商业周期安排和不同盐度的变化等做充

分、合理安排。本次养殖试验驯化生物载体为 10 天，效果良好。

案例 B：按照每平米最大养殖产量为 20 千克时，饲料投喂量为虾重的 3%，每平米每天投入饲料量为 0.6 千克，此时产生的粪便量为 0.18 千克（饲料重量的 30%）。如果物理过滤率单元可以排出 70% 的粪便，30% 的粪便溶解出的氨氮需要被生物处理单元处理。按饲料中蛋白质含量 30%，粪便中含有 16.2 克的蛋白质，换算成氨氮量为 2.6 克。如果养殖池面积 7 平方米，每天需要被生物处理单元去除的总氨氮量为 18.1 克。

本次使用的高效生物载体的氨氮净化能力是 642 克/立方生物载体/天，按照生物滤池充填率 30% 计算，需要生物滤池容积为 94.2 升。考虑到硝化细菌的工作状态不稳定和安全冗余，一般根据实际情况按照 3 至 5 的安全系数设计生物滤池容积，生物滤池的设计容积为 282 至 471 升。

生物滤池内曝气必须充分，保证溶解氧值在 4.0 mg/L 以上，并且无死角。保证几乎所有的生物载体被充分搅动起来，保证水力关系合理，使尽量多的生物载体处理流进生物滤池的水。



图 2 刚刚放入的生物载体，白色



图 3 运行三个月后的生物载体，棕黄色

3.1.3 供氧设备

循环水设施养殖通常采用中密度甚至高密度养殖，大量的水生生物在呼吸过程中需要充足的氧气供给。本次养殖（2024 年 7 月 1 日至 11 月 30 日）供气系统采用数台日本产安永气泵（安永エアポンプ）：电压 100V，功率 30~125W 不等，气压 12~18kPa 不等，气体流量 40~120L/min 不等；一台中国产涡旋气泵：电压 200V，功率 750W（**实际测得 1300W**），最大正压 23kPa，最大吸压 -20kPa，气体流量 150m³/h，气泵商家建议使用水深 1m。

养殖过程中涡旋气泵主要通过集中供气管道供气一、二、三号水池，供水养殖面积约 37m³，供气曝气盘共约 45 个。涡旋气泵同时供给一、二、三号池的生物滤池曝气。为了保证生物滤池曝气完全和安全性，生物滤池内曝气供气使用日本产安永气泵。涡轮气泵和安永气泵全过程工作良好，未发生故障。

养殖水体溶解氧的含量与多种因素相关，主要是曝气盘数量，养殖密度，水中好养微生物呼吸量。

低溶解氧事故备忘录：

本次养殖过程中，各水池溶解氧基本维持在 4.0mg/L 以上。但一号池与三号池在 9 月 3 日至 9 月 26 日期间发生溶解氧数值低于 4.0 mg/L，甚至测得有低至 1.0 mg/L 的情况。发生低溶解氧期间正处于不断增加投喂饲料期间，溶解氧低的原因可能是：一、随着虾长大，耗氧量不断增加，曝气盘不能提供足够的氧气。9 月 10 日开始的两周期间，一直在增加池内曝气盘数量，溶解氧数值略有回升，但不明显。二、池内污物不能及时排出，导致池内固体废物不断积累，甚至产生了大量耗氧的异养生物絮团。特别的，在三号池增加一个额外的循环水泵，使用棉布过滤，可过滤出大量的黄色固体污染物。三、溶解氧和筑波大学实验室内的溶解氧仪对照测试，并未发现大棚使用的溶解氧仪器有数据误差。但不排除使用过程中产生测量误差。9 月下旬某一天开始，溶氧均突然恢复到 4 mg/L 以上，原因未解。

在一号池溶解氧数值低于 4.0 mg/L 期间，池内额外增加一个水泵循环造流，既可使水流形成漩涡，利于固体污物集中在中央排污管，使耗氧物质顺利排到池外；也通过水泵的扬洒，造成水体溶解氧有所增加。有关高密度养殖增加溶解氧至接近饱和溶解氧是未来需要考虑的课题。

3.2 养殖车间的布局设计

3.2.1 水池设计与分布

水池的设计和分布应根据场地实际状况合理布局。循环水养殖车间的水池设计与分布是整个系统高效运转的基础，影响到养殖密度、水质控制和日常操作管理的便捷性。在设计中，水池的形状、大小及材料选择需要综合考虑养殖生物的习性和养殖目标。本次养殖使用圆形帆布材料池子，直径在 3~5 米不等，一字排列分布在大棚内。

飼育実験室(水産養殖ビニールハウス)の図面

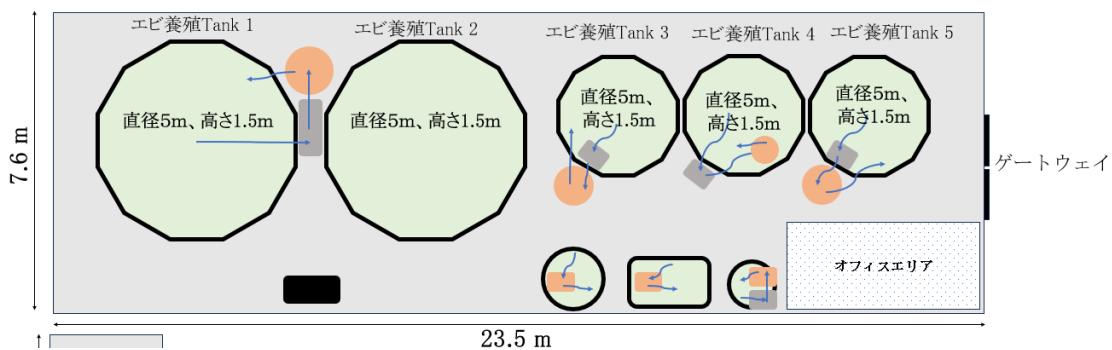


图 4 养殖池的布置平面图



图 5 帆布养殖池

水池的布局应根据场地条件和工艺流程进行优化设计。集中式布局可将所有水池围绕中央过滤设备分布，缩短管路长度并提高水力效率；而分散布局则更适合分组管理，特别是在分阶段养殖中能灵活调整操作。水池尺寸和数量需要根据具体养殖对象的生物学特性、养殖密度及预期产量合理规划，本次高密度南美白对虾养殖使用两个 20 平方米水池，一个 7 平方米水池，水深约为 0.9 至 1.1 米。

水流设计对循环水系统至关重要，需确保水池内水流均匀且无死角。对于虾类养殖，底部水微搅动不影响虾类生活，同时底部中央排污口有助快速去除固体废物。辅助设备如增氧装置、水质监控传感器和循环管路的合理分布，也能确保水质稳定性和系统运行效率。为了防止交叉污染，供水、排水和循环管路需独立设计，同时便于检修。

功能分区是水池分布的一项重要内容，包括苗种培育区、中间养殖区和商品养殖区。这种分区设计能满足不同生长阶段养殖对象的特殊需求，例如苗种培育区水池较小且易于控制水质，本次使用 0.4 吨至 0.7 吨的小型养殖池进行虾苗的淡化和标粗。便于管理和使用少量含盐水而节省成本。商品养殖区则需大型的水池以容纳高密度养殖。

备用水池设置能应对病害隔离和系统维护等突发情况。备用水池应设置在方便调水的区域。备用水池的水体积不少于一个正式养殖池水的体积。备用水池的水应提前准备并做好充分曝气使溶解氧充足，并放置数天（根据水体大小）使温度和养殖水体趋同。通常地下水溶解氧在 0.5~1.0 mg/L 之间，温度在 15 摄氏度左右，都不同于常规养殖用水指标要求；城市供水自来水含有一定量余氯，不利水生生物生长，需要曝气提前数天准备。备用水池盐度可根据需要调配。尽量遵循随用随有，有备无患的原则。

此外，车间内的操作通道设计也需充分考虑日常投饲、检查和维护的需求，通道宽度通常设置为 1 到 1.5 米，便于人员和机械设备通行。

3.2.2 水流设计与循环模式

循环水养殖系统的水流设计与循环模式是维持水质、提高养殖效率的关键环节。合理的水流设计可确保养殖池内的水均匀流动，避免死角，并使废物、残饵和代谢物有效集中和排出。不同的循环模式则决定了水流如何在系统内运行，包括水体净化的效率和资源的利用率。

利用切向进水口和中心排污口设计环流模式，使池内水流形成规则的旋转。这种设计不仅使废物集中于底部中央排污区域，便于快速清除，还能模仿自然环境的流水条件，促进鱼类的活力和健康。对于直径较小的水池，例如养殖池直径小于 3 米，可采取曝气使污物集中收集、排出的方法。

在循环水系统中，水流设计还需结合设备的布置。例如，增氧装置应放置在水流交汇处，以增强溶氧分布；过滤系统的进水口和出水口设计需避免短路效应，确保水体充分接触净化装置。此外，循环泵的选择和布置直接决定了水流的稳定性和能耗，应根据系统规模和水流需求匹配适当规格的设备。

集中排污的设计方案有继续优化改进的可能。尽量避免虾粪在养殖池内的粉末化和分解。第一时间、快速地把完整的大颗粒固体废物收集并排出养殖池是减少池内污染的重大措施。一旦较大的固体颗粒物被曝气、水流、水泵循环破坏分解成直径低于 70 微米的小颗粒污染物，即使使用 200 目的滤网也不能将污染物通过物理方法分离，可能造成池水逐渐地污染和浑浊。

3.2.3 污水排放与回收系统

循环水养殖系统使用不断处理的水进行养殖，基本不排水，但也会定期排放一定量含高浓度固体废弃物（虾粪、残饵等）的污水。这些污水一般通过物理过滤器过滤，或通过滤布等装置过滤出来的。

根据养殖水池实际养殖负荷和物理过滤器的反冲洗频率，一般数分钟至数小时会排放定量的高浓度固体有机物废水。这些废水可暂时收集在可容纳固液混合物的容器中，用于每日观察这些过滤设备是否工作良好，也可用于观察是否有大量虾粪和残饵被排出，用于判断池内饲料投喂情况和虾吃食排便情况。

本试验中，在 20 吨高密度养殖系统中，每日投喂饲料约 3~5 千克，物理过滤器每隔 15min 反冲洗约 10s，约 100~200 升浓缩污物废水被排出。

3.3 其他设施配置

3.3.1 光照系统

合理的光照设计对虾类养殖尤为重要。多数对虾，如南美白对虾，属于对光敏感的物种，其在生长和摄食过程中偏好弱光或微弱的间歇性光照环境。强光可能引发应激反应，导致生长受阻或免疫力下降。因此，在养殖车间内，光照强度宜保持在 100 至 200 勒克斯左右，具体可根据虾苗与成虾的需求调整。例如，虾苗阶段需要较低的光强，而成虾阶段可适当增强光照以促进活动和摄食。

根据南美白对虾的生活习性，虾类养殖不需进行特别的光照设计。本次养殖中全部采用自然光周期。在炎热的夏季（6~10 月份），可依据情况在透

光大棚上部加装黑色遮阳布，减少强烈光照导致水池内藻类滋生和温度过高。在光照减少的季节，可移除遮光设施，有利于增加池内水温。根据养殖场本地的气候资料，茨城县筑波市的每日光照时常在 9 小时 42 分钟（12 月 21 日）和 14 小时 38 分钟（6 月 21 日）之间。

如有需要，光照系统的布置需结合水池的分布和水体深度。一般采用均匀分布的柔性灯具，如 LED 灯或荧光灯，避免产生强烈的阴影或局部光强过高的情况。灯具应悬挂在水池上方 1 至 2 米处，确保光线均匀覆盖整个水池表面，同时减少水体对光的散射和吸收。此外，使用防水和防腐蚀灯具可长设备使用寿命。



图 6 海南定大养殖场，虾苗孵化池，LED 灯（工作照明用）

在光照时间的控制上，建议模拟自然的昼夜节律，保持 12 小时光照和 12 小时黑暗的周期。这种光周期不仅有利于虾类的正常生长，也能减少对车间内藻类和微生物的过度刺激。如需要特殊管理（如促进某些阶段的生长或提高产卵率），可使用定时器和可调光设备对光照强度和时间进行精确控制。



图 7 海南定大养殖场，亲虾交配池，红色灯光诱导亲虾交配用

3.3.2 通风系统

循环水养殖系统设施内的通风设置是保证空气质量、维持稳定水质及为养殖生物提供健康生长环境的关键环节。合理的通风设计有助于排出湿气、降低二氧化碳 (CO_2) 浓度、避免氨气 (NH_3) 和硫化氢 (H_2S) 等有害气体的积聚，同时也能调节室内温湿度，防止霉菌滋生并改善工作环境。

根据大棚内气温和当日光照条件，适当调节大棚的通风避免温度过高过低，利于保持养殖池水温在 26~30 摄氏度间。也适于工作人员在棚内工作为宜。

3.3.3 备用电力系统

养殖系统一切设备的正常运行需稳定持续的电力；曝气装置一旦断电，会导致养殖池内溶解氧短时间内下降，造成虾窒息、死亡。

备用电力系统使用锂电池和一个电源自动切换开关组成，当城市供电中断时，电源自动切换开关会将电力从城市供电改为锂电池供电，切换时间小于 1 秒。一般将重要电气设备连接至备用电源，主要是鼓风机等必须 24 小时不间断工作的设备。需保证供电系统能在无人值守时工作 5 至 10 小时以上。

需每日检查备用电源余电量。需将备用电源充电，尽量每日将备用电源充电至 90%以上。不要让备用电源电量低于 50%。人离开大棚时不要充电，避免发生火灾等意外。每周检查一次备用电源供电系统是否正常工作：手动切断城市供电电源，检查备用电源是否能正常自动切换，鼓风机是否正常工作。

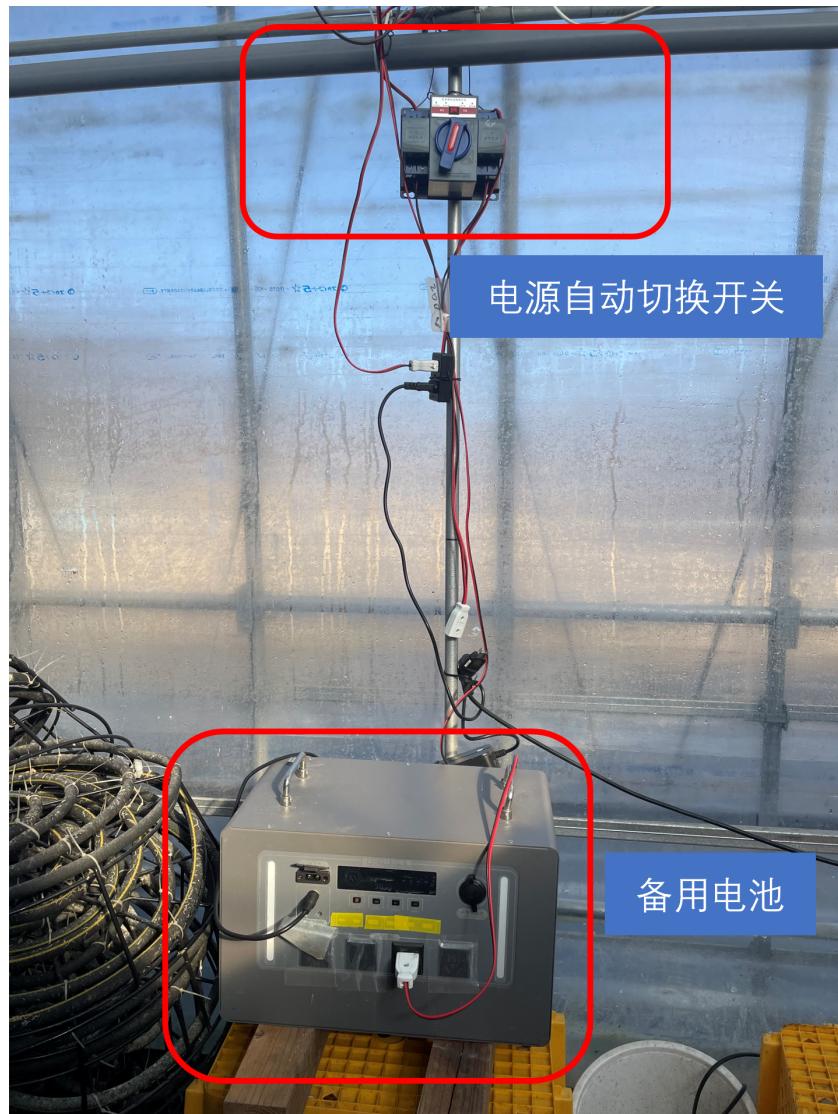


图 8 备用电源系统

第4章 工厂化循环水系统的施工

4.1 施工前的准备工作

最小养殖单元是能保证一个成虾养殖周期的包含水循环单元、供气系统、饲料投喂系统、测试试剂等在内的系统。根据一个最小单元的设计方案，需要采购的设备清单如下。

表3 一个养殖系统需要采购的设备清单

序号	物品	备注
1	养殖池	根据需要选择，直径约3~7米
2	物理过滤器	根据养殖池面积选择
3	生物滤池	一般为养殖水体积的5~10%
4	生物载体	一般为生物滤池容积的30%
5	水泵	每小时最大水量按照养殖水体的1~2倍设计
6	鼓风机	750 W，可供应约30~50平米养殖面积
7	备用电源	可供应鼓风机工作10小时以上
8	水管	按需选择
9	自动投食机	1~4台
10	法兰盘	连接物理过滤器和生物滤池
11	鱼马桶	1套鱼马桶+立管
12	曝气盘	按照每平方米1.5个准备
13	曝气管及开关零部件	按需准备
14	捞网	数个

15	水质分析试剂	氨氮，亚硝酸氮快速分析试剂
16	pH计	1台
17	溶解氧仪	1台
18	定时开关（水泵用）	1台
19	虾料台	3~5个
20	浓缩污水系统	1套（水桶，水泵等）
21	水位自动感应开关	2套
22	100V变220V变压器	1台

根据施工准备工作，还应准备钳子、各种型号螺丝刀、扳手、梯子、手套等工具。

4.2 施工过程中的设备安装和配套系统布置

施工流程可以分为设计准备、土建施工、设备安装、调试运行等几个阶段，每个阶段都需要细致规划和高效协调。根据养殖系统水循环的方式，先根据场地现状，规划合理的设计图纸，按图施工。实地踏勘并确定对应场地的尺寸、现状，做好合理施工计划。

土建施工阶段是循环水系统建设的重要基础环节，首先要对施工场地进行地基处理，确保养殖池的防水性能，避免尖物划破养殖池。确保管道坡度合理且连接紧密，以避免未来运行中出现堵塞或渗漏问题。

设备安装是系统实现功能的关键环节。各种较大过滤设备（如物理过滤器、生物滤池）需按照设计要求安装到位，确保进出水方向正确并预留足够的维护空间。泵站及管路的连接应特别注意密封性和耐压性。

电力系统的安装要考虑安全性，使用的便捷性。养殖车间较潮湿，避免供电线接触潮湿地方；避免电线特别是插座落水。

4.3 设备调试与运行测试

设备安装好后需要进行调试与运行测试。设备安装好需要等待所有胶水晾干，检查需要密封的部位是否完工。

表 4 系统验收标准

序号	内容	检查
1	所有管件接合处是否漏水；	肉眼观察；使用干抹布或纸巾检查
2	电线、电源安全；	肉眼检查
3	生物滤池是否曝气充分	肉眼观产；用网兜捞底部是否有大量生物载体沉积；溶解氧仪检测
4	养殖池内曝气是否充足	溶解氧仪检测
5	物理过滤器污水是否顺畅排出至指定位置	手动测试物理过滤器反冲洗功能
6	长时间稳定	一天后稳定后即可

第5章 南美白对虾日常养殖管理

5.1 水质监控与维护

5.1.1 pH、盐度、温度、溶解氧的控制

pH 通过简易 pH 计来测试，要经常校准 pH 计。水温可以通过水产养殖专用电子温度计或传统玻璃温度计。电子温度计方便读数，可以快速直观监测，但由于大棚温度湿度较高，电子温度计容易损坏。溶解氧通过溶解氧仪器测试。溶解氧仪较精密，需要专心维护。电子测试设备都需要安放在通风阴凉处，避免阳光直射，避免水渍泼洒。

养殖水体的 pH 建议每日测试。pH 对于观察水质变化，及时调节养殖水体状态非常有用。pH 值降低一般是由于硝化反应消耗一定的碱度造成的。硝化反应强烈时，甚至每日 pH 都有规律地降低。当 pH 低于最适范围(7.6~8.4)时，需要加 10%石灰乳调节。具体操作如下：

- ①. 一般来说，若 pH 低于 7.6，按照每立方水体加 25~50 毫升石灰乳的标准调节。
- ②. 若 pH 值在 7.6~8.0，但监测 pH 值时发现每日 pH 值有下降趋势，可以适当添加石灰乳以避免 pH 值降低于 7.6；
- ③. 石灰乳的添加要根据实际情况，适量、多次添加，避免水体 pH 发生剧烈波动。
- ④. 根据本次养殖经验，养殖池内投入（每 20 吨加约 1~2 升 10%石灰乳时）石灰乳时，会导致 pH 短时间内急剧上升，半天~一天时间恢复原值，此举可能对虾造成生长压力；建议可以少量多次投放石灰乳，例如可采用蠕动泵等每日定时定量投放石灰乳。

盐度对南美白对虾生长非常重要，一般来讲，南美白对虾除了在苗期进行淡化养殖，或者将淡化养殖的大虾再盐化回正常海水盐度时，不需要在养殖过程中进行盐度调节。根据文献，南美白对虾淡化养殖最低能耐受的盐度

为千分之二（建议不要低于千分之三）。但要注意，物理过滤器排污会排出一部分盐分，根据物理过滤器排水频率，可监测养殖水体盐度，每周需要补充对应排出盐分的海盐，维持盐度在稳定水平。还需注意，在养殖过程中养殖水体会蒸发，水体温度、养殖水体面积导致蒸发有快有慢。一般来根据固定养殖水位（比如 1.0 米），2~3 日需补充适量蒸发淡水至原水位。

育苗过程为海水，在需要进行淡化养殖时，将养殖苗的水体淡化至适合淡水（盐度 3 左右）养殖的过程叫淡化。淡化注意事项如下：①淡化一般在小水体中进行，便于排水换水操作。苗期（大约 P5~P20）密度可以至每平米 1 万尾左右；②每日进行换水操作，建议每日的淡化盐度不高于 3，有利于维持苗的安稳；（虽然可以每日淡化超过盐度 5，但不建议。）③每日通过排出一定量海水，换进一定量淡水进行淡化，换进的淡水一定要和养殖水体的指标相近，pH 不要相差超过 0.5，温度不要相差超过 0.3 摄氏度。

淡化过程中盐度在变化，硝化细菌会因为适应而减弱工作能力，需要提前驯化生物滤池内的硝化细菌。提前 10 天开始驯化使生物滤池处在盐度 30 的工作环境。（专利申请中。）

下面是一个 1 吨水体的标准淡化过程。

表 5 淡化流程（1 吨水体）

淡化天数	盐度，千分之	换水量	换水比例
第一天	35	85 升	8.%
第二天	32	94 升	9%
第三天	29	103 升	10%
第四天	26	115 升	11%
第五天	23	130 升	13%
第六天	20	150 升	15%
第七天	17	177 升	18%

第八天	14	214 升	21%
第九天	11	272 升	27%
第十天	8	375 升	38%
可放养殖池；养 殖池盐度为 3	5	调节到和养 殖池盐度相 近	适当

盐化是将淡化养殖的成虾，加海盐盐化至海水盐度的过程。本次养殖过程中，进行过两次盐化过程。盐化过程是逐渐增加海盐，相比淡化过程操作简单，而且渗透压增加是恢复原生环境，风险较小。主要作用是将淡化的成虾恢复成海水养殖状态，便于交配繁殖产卵。还可以考虑在养殖后期，将淡化养殖的成虾，通过短暂的盐化养殖，起到增加食用口感，减少寄生虫的作用。（专利申请中。）

温度建议每日测试，温度变化会影响虾类的摄食活动和活力。一般最适温度为 28~32 摄氏度。在夏季大棚，水温一般能维持在 30 摄氏度左右，非常适合虾类生长。在关东地区，温度从 11 月份开始下降，至水温 20 摄氏度左右，虾类已减少进食，温度低于 20 摄氏度，每日约有 5~10% 的虾死亡。

溶解氧至少需要保证在 4.0 mg/L 以上，保证在 5.0~8.0 mg/L 是最适的。溶解氧是保证虾存活最快速被反应的指标，这意味着如果溶解氧低于下限（通常是 1.0 mg/L）一小时甚至数分钟，会导致虾窒息死亡。溶解氧的监测使用溶解氧仪，使用较方便。但需考虑溶解氧降低时该如何提高溶解氧，特别在曝气充足情况下。本次养殖过程中溶解氧曾被监测到非常低（低于 2.0 mg/L）的数值，该数值一般认为会导致虾类死亡。本次采用更换使用大型曝气机和增加曝气盘数量解决。如果在养殖过程中发现溶解氧有持续降低的趋势，或者测得数值有异常，需要在不同点位，使用不同的溶解氧仪重复测量，确保测试数值准确。日常养殖的正常溶解氧过低可能是由于养殖密度过高、水体内耗氧微生物繁殖过于强烈造成，可以通过增加曝气盘，增加溶解氧效率如使用新的曝气盘或使用微纳米气泡技术甚至纯氧曝气解决。

在工厂化养殖条件下，溶解氧被认为是一个需要被不间断监测的指标。从现有大型工厂化养殖的公开信息中看到，温度，溶解氧，甚至 pH 和盐度都被实时在线监测。当然，考虑到成本和收益的平衡，在传统的小棚养殖、高位塘养殖中，甚至一些工厂化养殖中，都少有实时监测溶解氧的。一般事故性溶解氧降低是由于供气设施中断导致全部的养殖曝气盘失去曝气功能。可以使用简易的曝气中断警报装置、备用电源自动切换装置和在线网络监视摄像设备。



图 9 停电停气断氧报警器 水产养殖缺氧报警器

5.1.2 水质检测频率及数据记录

水质检测主要检测氨和亚硝酸盐，小于 200 mg/L 的硝酸盐一般被认为对虾类是无害的。氨的水质监测使用简易试剂盒，一般应小于 0.1 mg/L，在生物反应器驯化合适的条件下，这一指标是较容易达成的。亚硝酸盐监测使用简易试剂盒，一般应小于 0.5 mg/L。根据文献和经验，亚硝酸氧化菌(NOB)比氨氧化菌(AOB)需要更长的驯化时间使其固定在生物载体上。所有数据应该按照时间、水温、pH、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解氧、盐度、投食量、备注等事项一一记录清楚。数据应清晰，数据单位要齐全，每日的

操作和备注等要记录下来。

水质突变可能由投喂过量、设备故障或环境变化引起。需要快速、准确找到水质恶化的原因。主要检查下列问题：

- 1) 若物理过滤器堵塞导致水循环不良，解决方案：彻底清洗物理过滤器，疏通水循环；检查水循环水泵等。
- 2) 若生物过滤器内溶解氧低于 4.0 mg/L，解决方案：增加生物过滤器曝气头。
- 3) 若喂食过多，料台上有剩余饲料，解决方案：减少当日~第二日喂食量，等待水质指标恢复正常。
- 4) 若因环境变化，例如气温剧烈下降等导致水环境变换，要及时采取有效措施，例如适时开关大棚保温层维持合适的养殖温度。
- 5) 因水质恶化导致大量死虾，及时捞出死虾避免水质进一步恶化。

5.2 饲养管理

5.2.1 饲料种类与配比

在饲养管理中，饲料的种类与配比是关键因素之一。南美白虾的不同生长阶段需要不同类型的饲料。例如，幼体阶段适合蛋白含量较高的颗粒或粉末状饲料，而在成长期可以选择中等蛋白含量的膨化饲料，并适量补充动物性蛋白。在接近出虾阶段，可提高饲料中的脂肪含量以增强抗逆能力。同时，饲料中的营养成分需要合理配比，如蛋白质、脂肪和碳水化合物的占比应符合虾的营养需求，并适当添加微量元素和益生菌，以提升生长和抗病能力。本养殖期间，在苗期（0~10 天）（估计到达大棚的苗期为 Z15 左右）使用正大产虾宝宝粉状饲料、中期和后期（11~90 天）使用正大斑节对虾零号破碎料（标号：45 蛋白 9980）和日本东丸(ヒガシマル)南美白对虾成虾饲料。

本次养殖使用三种规格的饲料，主要为粉状饲料，零号破碎饲料和一号

饲料。不同养殖时期使用的饲料规格和每日投料比例如下所示。

表 6 不同养殖时期使用的饲料规格，以正大饲料（CP）为例

虾时期	饲料规格	每日投料占体重比例
0~10 天，苗期 (P15~P25)	粉状料	20%
11~40 天，过渡期	粉状料、零号料混合	12%
31~40 天，小苗	零号料	9%
41~60 天，中苗	零号料、一号料混合	6%
61~90 天，成虾	一号料	4%

5.2.2 饲料投喂时间与方法

饲料的投喂时间与方法应科学合理。通常建议一天分四次投喂，分别在早晨 4 点、上午 10 点、下午 4 点和夜间 10 点进行。投喂应以少量多次为原则，避免饲料浪费和水质污染。可结合自动投喂设备和人工观察，确保虾群摄食均匀。对于投喂量的控制，应根据虾的规格、密度和水温等条件动态调整，一般每日投喂量为虾体重的 5%-10%。通过“托盘检查法”观察虾的摄食情况，若有剩料则需适当减少投喂量。大约在喂食 70 分钟后检查料台，如料台有剩料，说明投食过多，需要减少投喂量；若饲料基本无，但仍有虾，说明投食不足，需要适当增加投食量。注意水质变化，如果水质变差，特别是氨氮和亚硝酸盐浓度升高，通常说明投喂量过大，饲料未能完全被消耗，需适量减少投喂。

使用自动投食机器可以节省人力。自动投食机器的选择多种多样，选择使用方便，维护方便的。可根据需要选用是否需要网络在线版。一般来说，需要根据不同阶段南美白对虾投食的饲料粒径大小改变自动投食机的单次投食卡口大小，根据不同阶段改变投食量的设定。具体使用方法参照购买投

食机的商家网站，并和商家客服沟通。

每日需要检查自动投食机的残余饲料量是否充足。在养殖后期，一个10升容量的自动投食机每日投食可多达2~3千克饲料，需要每2~3天添加一次饲料，不要忘记。可以适时检查投食机是否正常投食。

投食机的布置和投食泼洒需要合理。一般直径5米的养殖池需要布置三个小型自动投食机，并加装自动泼洒设备，可以使饲料均匀泼洒至全池，有利于虾摄食。自动投食机饲料出口处容易堵塞和变脏，需要及时清理。

养殖密度的管理对南美白虾的生长速度和健康状况有重要影响。在高密度养殖中，虾的生长容易受抑制，因此需要合理设计养殖池，一般初始放苗密度为500~1000尾/m²。随着虾体重的增加，应逐步降低密度。此外，定期分群与密度调整是重要的操作方法，每隔2~3周通过网筛将生长快慢不一的个体分开养殖，这有助于减少个体间的竞争，降低应激反应，从而提升总体产量。

但在养殖早期，使用粉状料喂食时，不适宜使用自动投食机，采用手动喂食。粉状料需要和一定量的水混合，使粉状饲料充分溶解在一定量水中，



图10 粉状饲料（正大-虾奶宝）溶解在水中然后投喂

然后按量均匀泼洒在小苗养殖池中。每日2~3次，如有可能，尽量做到每日4次。如果在更早期的育苗时期，粉状料也偏大，需要使用更小颗粒的饲

料，可以将粉状料倒入 200 目滤网，一步步用手将饲料揉搓进一定量水中，使小颗粒饲料充分悬浮在水中，然后均匀泼洒至小苗养殖池中。

5.3 疾病预防与处理

疾病预防与处理是养殖管理的重要组成部分。常见的南美白虾疾病包括白斑综合症（WSSV）和弧菌感染等。为预防这些疾病，应加强水质管理和生物安全措施，如保持水中溶解氧高于 5 mg/L，氨氮低于 0.1 mg/L，并定期消毒水体以避免引入病原体。同时，可以在饲料中添加益生菌或免疫增强剂以提升虾的抗病力。一旦疾病爆发，应立即隔离病虾以减少交叉感染，并检测病因（病毒、细菌或环境）后采取针对性处理措施，如停止投喂、适量换水和改善水质。药物的使用必须规范化，严格选择国家允许的水产用药，禁止滥用抗生素，并记录药物的名称、用量、使用日期及原因。此外，收获前应确保药物停药期已过，以避免药物残留对产品质量的影响。

通过科学的饲养管理、密度调整和疾病预防措施，可以显著提高南美白虾的养殖效率和产量，同时确保虾群的健康和产品的安全性。

第6章 日常设备维护

6.1 过滤设备的清洁与更换

本系统中的过滤设备主要是反冲洗微滤机。微滤机的反冲频率根据池中固体污染物的多少决定，通常 30 分钟至 120 分钟反冲洗约 10 至 20 秒，需要时使用自动反冲洗。冲洗出的固体污染物作为废弃物处理，需要每日检查反冲洗出的污染物多寡，并且据此判断反冲洗微滤机是否正常工作，把足够量的固体污染物带出养殖池。如果排出的反冲洗液体含有大部分水，而少含有固体污染物，说明反冲洗微滤机的过滤效果没有达到理想状况，结合养殖池内的污染状况，需要做进一步判断；如果没有排出足够量的浓缩反冲洗液体，证明昨日反冲洗微滤机没有正常反冲洗，需要检查反冲洗水泵、反冲洗管道等是否正常工作，顺畅。反冲洗微滤机是重要的固形物过滤和排出设备，需要每日检查是否工作良好。一旦出现异常，需要及时排除异常状况。

反冲洗微滤机虽然可以自动工作，但每日维护的日常检查也是必要的。每周需要使用高压水枪或水泵配合工作，将微滤机内部清洁干净。需要彻底清洁的部位包括但不限于微滤网、反冲洗喷头、反冲洗 V 型槽、进水仓、滤水仓。每两周需要检查反冲洗水泵是否正常工作，需要检查反冲洗管道，如有堵塞，需要拆开，清洁，维护，保证反冲洗微滤机的正常工作。

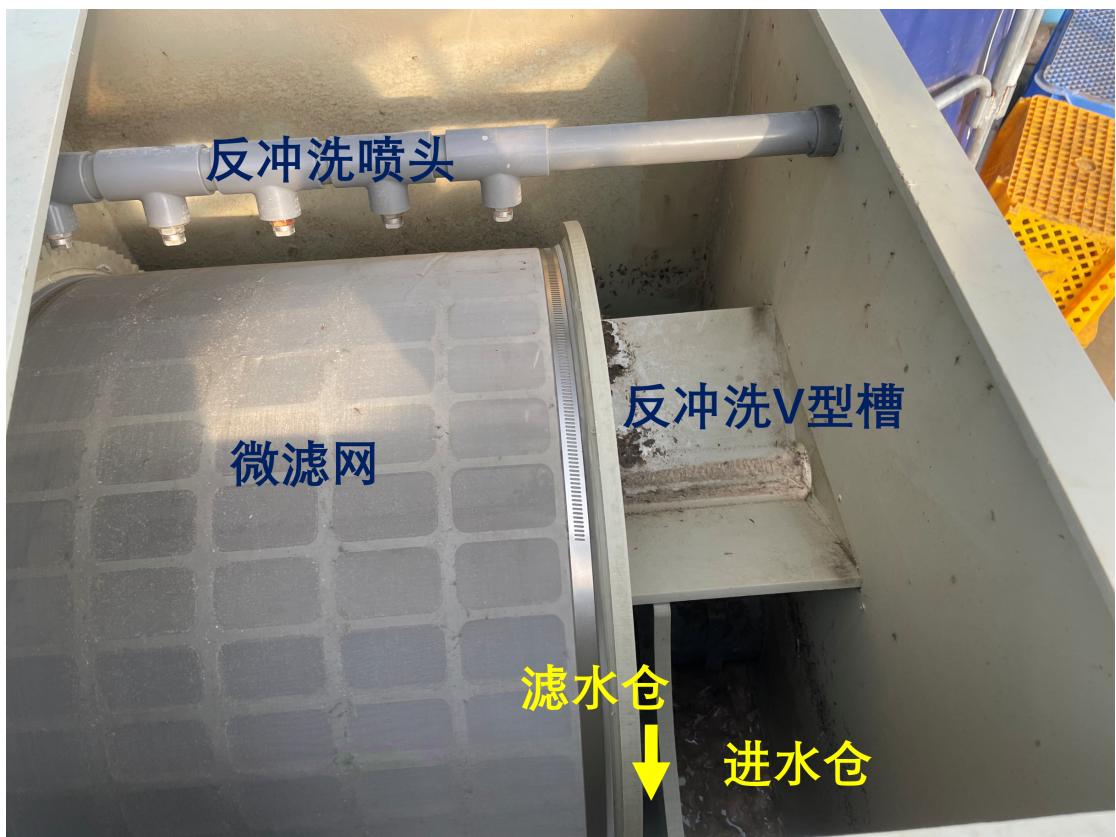


图 11 反冲洗微滤机内部清洁维护

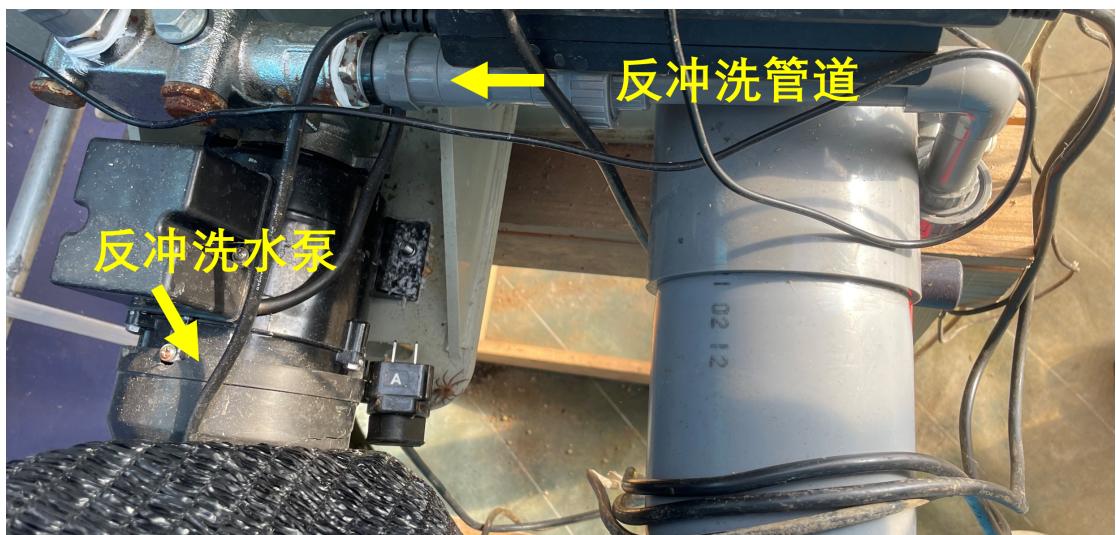


图 12 反冲洗微滤机外部清洁维护

微滤机需要维护的部件及周期如下。

表 7 微滤机需要维护的部件及周期

部位	清洁内容	清洁周期
微滤网	高压水枪冲洗，以免生物膜堵塞（避免压力过大滤网损坏）	每天检查；数天清洁一次
反冲洗喷头	检查即可	每天检查
反冲洗 V 型槽	高压水枪冲洗	每天检查；数天清洁一次
进水仓	高压水枪冲洗，避免过多沉淀物	每天检查；数天清洁一次
滤水仓	高压水枪冲洗，避免过多沉淀物	每天检查；数天清洁一次
反冲洗水泵	检查	每天检查，无损坏无需维护
反冲洗管道	检查；避免内部生物膜过厚而堵塞管道。	每天检查，无损坏无需维护

6.2 生物滤池的维护与管理

生物滤池是保证生化反应正常进行，将氨、亚硝酸等有害污染物转化为硝酸盐的重要设备。保证生物滤池合理的水循环将养殖池的水充分处理，并返回养殖池。生物滤池是核心设备，需要每日检查。

本次养殖案例中，发现主要维护点在于水循环的不顺畅。当水泵循环停止时，或者反冲洗微滤机堵塞导致进入生物滤池的水量不足都会导致养殖池内水不能进入生物滤池被处理。此时应及时解决水循环问题，使生物滤池起到处理作用。

其次，必须充分保证池内处处的溶解氧水平在 4.0 mg/L 以上。特别是底部部分的生物载体，时常因为曝气石/曝气管的安排不够合理，或者曝气石/曝气管随着时间移动，而使生物滤池内曝气位置不均匀，一部分生物载体堆积在角落。而且，如果曝气量不够大，或者安置的曝气石/曝气管不够多，底部堆积有相当量的生物载体，这都是不合格的。尽量使用充足的气量曝气，并将曝气装置困捆扎固定在固定位置。

生物滤池需要维护和检查的内容如下。

表 8 生物滤池需要维护和检查的内容

部位	检查维护内容	周期
生物载体	是否充分搅动，是否有死角区域	每天
溶解氧	溶解氧大于 4.0 mg/L	每天

6.3 管道、曝气及其他设备的巡查

每日巡查大棚事项包括所有涉及是否漏水、供气不断、电力和设备。需要一项项仔细检查，甚至要预期到可能会发生的风险，及时排除风险。

所有检查每日进大棚时检查一次，及时处理问题；离开大棚时检查一次。所有操作过的动作，及时恢复原状，不要遗留问题。请牢记“墨菲定律”，这意味着有可能出问题的地方，一定会出问题，只是时间早晚问题。需要做的是将可能的问题消灭在初期阶段，避免可能会发生的问题，提升整体设计、管理、运营效率。

表 9 每日巡视事项

事项	内容	检查频率
大棚整体	<ul style="list-style-type: none"> ● 薄膜完整无异常 ● 两侧开合通风无异常 ● 门锁正常 	每日

◆ 水		
<u>地面没有异常水渍；各封闭水池内水位没有异常</u>		
养殖池	是否漏水，重点在管道接合处，无被异物划破风险	每日
水循环管道	是否漏水，重点在开关、管道接合处，无异常受力点	每日
供水管道	<ul style="list-style-type: none"> ● 开关是否正常归位 ● 管道是否完整不漏水 	每日
◆ 气		
<u>听曝气声；看各曝气点正常曝气</u>		
曝气机	听涡旋曝气机的声音可以判断是否正常工作；摸曝气机是否正常震动，是否过热	每日
曝气管	是否有异常漏气声音；是否脱落	每日
曝气石/曝气盘	是否有合适大小的气泡冒出	每日
◆ 电		
<u>检查各设备亮灯、正常工作中</u>		
电线	不要有进水的风险	每日
插座	不要有进水的风险	每日
备用电源	<ul style="list-style-type: none"> ● 不要有进水的风险 ● 电量低于 50%需要充电；人员不在场时禁止充电 	每日
自动切换开关	测试一次是否正常工作	每周

◆ 设备

设备正常动作

微滤机	可测试反冲洗是否正常工作	按需
自动投食机器	<ul style="list-style-type: none">● 可测试是否正常投食● 检查剩余食量是否充足	按需

6.4 系统的定期清洗与消毒

整体系统在初期，是干净，无外源病原微生物的，但为了防止疫病的发生，需要在养殖开始是对水体和整个系统，工具等消毒。一般采用次氯酸盐，高锰酸钾或者碘化合物（如聚维酮碘）。本次进苗前使用了工业漂白粉（次氯酸钙），有效氯 70%，每立方水体投入 50 克进行了消毒。

次氯酸盐（如次氯酸钠、漂白粉）是一种高效氧化性消毒剂，广泛用于水产养殖中的水体、设施以及鱼卵的消毒。其常用浓度为 1~5 mg/L（有效氯浓度）用于水体消毒，200~500 mg/L 用于工具和设施的消毒。使用时，需将次氯酸盐溶解稀释后均匀泼洒或浸泡。次氯酸盐适合杀灭水体中的细菌、病毒及部分寄生虫，但应注意避免过量使用以防对养殖生物造成应激或对环境产生副作用，如氯化副产物的生成。此外，其有效成分易受日光和温度影响，需现用现配。

高锰酸钾是一种常见的氧化性消毒剂，主要用于水体杀菌、寄生虫控制和水质改善。水体消毒时通常浓度为 0.5~1 mg/L，全池泼洒时浓度可增加至 2~4 mg/L 以控制寄生虫；针对鱼虾的浸泡处理则使用 10~20 mg/L，浸泡时间为 15~30 分钟，而工具的消毒浓度则为 100~200 mg/L，浸泡约 30 分钟。高锰酸钾溶解后应均匀泼洒或浸泡使用，适用于处理鱼虾的体外寄生虫、水霉病等问题，同时能氧化水体中的有机物。但在水质较差、有机物较多的环境中，其效果会减弱，并可能在底泥中积累二氧化锰 (MnO_2)，需适时换水。对虾类等敏感生物需谨慎使用高浓度，以免引发毒害。

聚维酮碘是一种高效、低毒性的碘制剂，广泛应用于水产养殖中的水体

消毒、鱼卵和亲鱼病害预防以及伤口处理。水体消毒时，其有效碘浓度为1~2 mg/L，鱼卵和亲鱼消毒则用10~20 mg/L浸泡10~15分钟，伤口处理时使用50~100 mg/L涂抹或短时间浸泡。聚维酮碘在水中稳定性较高，对细菌、病毒和真菌均有良好的杀灭作用，尤其适合敏感的鱼虾卵和感染伤口的局部处理。在使用时需控制剂量，避免浓度过高引发毒性，同时注意药剂的储存有效期和与其他药物的相互作用。

合理选择和使用次氯酸盐、高锰酸钾及聚维酮碘等消毒剂，可以有效控制水体中的病原微生物，改善养殖环境，预防病害，但需结合实际养殖条件和生物的耐药性严格控制剂量和频率，避免副作用并减少对环境的影响。

在进行一次养殖周期后，也需要根据情况对养殖系统和工具等进行消毒，准备下次使用。但在消杀过程中注意保护生物滤池内微生物的硝化细菌等细菌。

第 7 章 风险控制与应急措施

7.1 常见故障的识别与处理

7.1.1 水质异常

水质异常在初期是因为生物滤池未能发挥出最大能力，或者养殖后期投料过多，负荷过高时容易发生的异常。一般认为氨超过 0.5 mg/L ，亚硝酸盐超过 0.5 mg/L 时是异常情况。长期的水质超标，会导致虾大量死亡，养殖失败。

初期短暂的氮化合物超标，可以考虑适量换水，换水后指标维持稳定，不再超标。如果换水后指标长期不能恢复至安全值以下，需要考虑是否养殖密度过大，生物滤池设计不合理/工作状态不好，可以减少投食量，甚至暂停投食解决，需要每日换水，换水时注意其他指标尽量维持平稳，避免应激。一旦指标超过正常值数倍，例如亚硝酸盐一夜超过 10 mg/L ，需要立即换水解决水质问题，所以备用水源是非常重要的。备用水源至少要有和养殖水体同样的体积，并且备用水源的水温，pH 值，盐度要和养殖水体相近，要日常曝气以维持充足溶解氧，避免鱼虾因换水发生应激死亡。备用水源要在使用后可以立即补足，以供第二天继续使用备用水源。

pH 值的超出范围一般是指低于正常范围，很少遇到 pH 值无缘无故超过 8.4 以上的。随着养殖进行，一般水体会消耗碱度，发生酸化，pH 值降低。随着 pH 降低，需要每日投加石灰乳以维持 pH。这是日常操作而不是事故。但要注意添加石灰乳时要适量，多次，缓慢，避免 pH 值剧烈升高。

表9 养殖指标异常操作方案

指标异常	解决方案	注意事项
水质指标超标（氨，亚硝酸盐大于 0.5 mg/L）	换水，减少投食，以致停止投食	<ul style="list-style-type: none"> ● 短期（两天）超标，换水 ● 长期（超过三天）超标，减少投食 ● 超标数倍，立马换水 ● 需要常备备用水源（水温，pH，盐度和养殖水体相近，溶解氧充足）
pH 值超标(低于 7.8)	投石灰乳	适量，多次，缓慢
溶解氧超标（低于 4.0 mg/L）	增加曝气盘	注意是否密度过高
温度过低	电热棒	注意用电负荷和用电安全
温度过高	大棚通风，黑布遮挡	无

7.1.2 设备故障和用电故障解决

1) 物理过滤器

物理过滤的故障一般是由反冲洗水泵、反冲洗水管和反冲洗喷头的异常造成的。主要是堵塞，随着时间运行反冲洗水管和喷头可能会因内部滋生生物膜而堵塞，当堵塞时需要将反冲洗水管和反冲洗喷头拆下，彻底清洁后装回。

物理过滤器可能因为质量不过关而容易损坏。反冲洗转鼓的旋转电机因为潮湿或其他原因而停止转动，可尝试涂抹防锈油、润滑剂等维护。虽然物理过滤器具有一般防水功能，但也要注意，特别是电气设备远离可能漏水处，尽量避免潮湿处使用或选用质量可靠耐潮湿的商品。

2) 气泵

气泵一般不会损坏。本次养殖过程及以前的经验中，气泵仅仅因为出气量远远少于额定出气量而导致气泵过热停机。拔下插头，待气泵冷却后，自动恢复运转。要注意气泵尽量高于水面，否则可能会造成倒吸，水会沿着曝气管进入气泵而造成损坏。

3) 水泵

水泵也较少有损坏现象。主要是使用过程中注意接口的适用，防水防漏电。水泵进水口的过滤器/过滤网注意堵塞和定期维护。

4) 自动投食器

自动投食器要安置在防水处，避免跌落。自动投食器的出料口会因为潮湿凝结露水而导致堵塞，甚至饲料发霉。注意定期清洁。

5) 备用电源

备用电源在无人值守时可能发挥作用，平时需要充满电待机。备用电源开机待机时也会有一定电量损耗，需要每日充电。根据商家使用说明，电源尽量充电至 50%以上，因为电量低于 0%可能会造成无法开机、无法充电等故障。无人值守时，禁止充电，避免发生火灾。

6) 电源、插座、电线

电源使用注意安全。各处电源应做好标签，方便识别。插座和电线避免落在水中，需要固定。特别是大棚外用电设备，避免雨天使用导致漏电，跳闸而使大棚整体断电。

7) pH 计、溶解氧仪、温度计等

水质检测设备平时储藏在通风、凉爽处，避免阳光直射。根据设备使用说明维护和维修设备。长期不使用的设备，干电池要取出，避免电池漏液损坏设备。

7.2 风险评估与定期安全演练

高效生产，安全第一。首先，施工和日常工作要保证人员安全，避免进行危险作业。要带好穿好防护设备，避免磕碰。尽量不进行带电作业，不要独自一人进行危险作业。尽量不要同一时间进行两项作业，以免因分心或疏忽导致操作失误。下面列举几项发生过的风险事故。

案例一：循环水漏水导致池水被抽干（一级事故）

三号池因循环水管掉落至池外，导致一夜间养殖池水被抽干。无人值守，生物死亡。详见额外事故报告。

案例二：大棚一侧电力负荷过大导致过电流保护停电（一级事故）

零号池因加热棒功率过高，在夜间持续工作而导致配电箱过电流保护（超过 20A），配电箱跳闸而失去电力供应，无备用电源，所有设备包括曝气机停止工作。无人值守，生物死亡。详见额外事故报告。

案例三：生物滤池的过滤网堵塞导致生物载体溢流至地面（二级事故）

三号池的生物滤池过滤网因长时间运转导致被脱落的生物膜堵塞网孔，进入生物滤池的水不能及时返回养殖池，导致生物滤池内水位不断上升。第二天发现生物滤池的水池沿着生物滤池的池边留至地面，大量生物载体被带出至地面。但养殖池内水位仍保有 80%。人员不在场，未导致生物死亡。

案例四：同时操作两项作业导致水满水溢（三级事故）

一号池因池水蒸发造成水量减少，进行加水作业，在将加水管放入一号池的同时开展其余水池的日常水质检测工作。在检测过程中发现三号池的部分生物载体从生物滤池中漏入养殖池中。于是解决三号池生物载体泄露问题，

忘记一号池在加水。待想起时，发现一号池的水已经加过多，水位上升超过1.2米，一号池的生物滤池在另一侧，没有及时发现水溢流，发现时地上满是外溢的水和外溢的生物载体。人员在场，清扫外泄生物载体和水。

案例五：在水池上方操作电线导致漏电保护停电（三级事故）

在操作电线插座时，不小心将插座掉入水中，导致大棚的配电箱立即感应到漏电电流，漏电保护器动作，大棚立即断电。人员在场，立即解决恢复电力。

为了避免发生类似事故，保证生产安全，需要指定事故级别，相关人员在操作过程和安全检查中需要对照事故风险，提前预防，及时处理问题。根据是否人员在场和是否可能造成重大损失，事故可被分为四级。

表 10 循环水养殖场事故划分

事故级别	分类依据	可能导致的后果	举例
一级	无人值守，可导致生物死亡	生物死亡	无人值守时包括但不限于发生如下事故： ①. 整体断电（无备用电源）； ②. 养殖池漏水至池底； ③. 曝气机停机； ④. 曝气管全部脱落
二级	无人值守，不会导致生物	生物不会死亡，但发现不及时可能	无人值守时包括但不限于发生如下事

	死亡	会造成生物死亡，或造成设备损坏	故： ①. 整体断电，但备用电源有效； ②. 生物滤池漏水 / 生物滤池堵塞外溢至地面； ③. 曝气管脱落一个，但不影响整体曝气； ④. 自动投食器故障，一天没有投食； ⑤. 进水管忘记关，但没有往池中加水，导致大棚大面积被水淹
三级	有人值守，不会造成生物死亡，可能造成设备损坏	处理及时，生物不会死亡，一般无危害	有人值守时发生的一级、二级事故
四级	有人值守，无损坏	无损害	有人值守时，物理过滤器反冲洗污水管断掉，污水流至地面等事故

第 8 章 数据记录与分析

8.1 数据收集的标准与内容

8.1.1 生长指标（个体大小、重量）

每周需要记录生长的大小，体重。在 2024 年 7 月 1 日到达大棚 20 袋虾苗，人工数苗，平均每袋子 1500 只虾苗左右，每袋均有约 100 只虾苗死亡。虾苗大小极其不均一，长度约 1.0~3.7 cm，重量约 0.05~0.1 g，平均每百只重 5.65 克。投食按照每万尾投 10~30 克粉状饲料，按实际情况增加。共十天淡化完毕，分别放入一号池和三号池养殖。

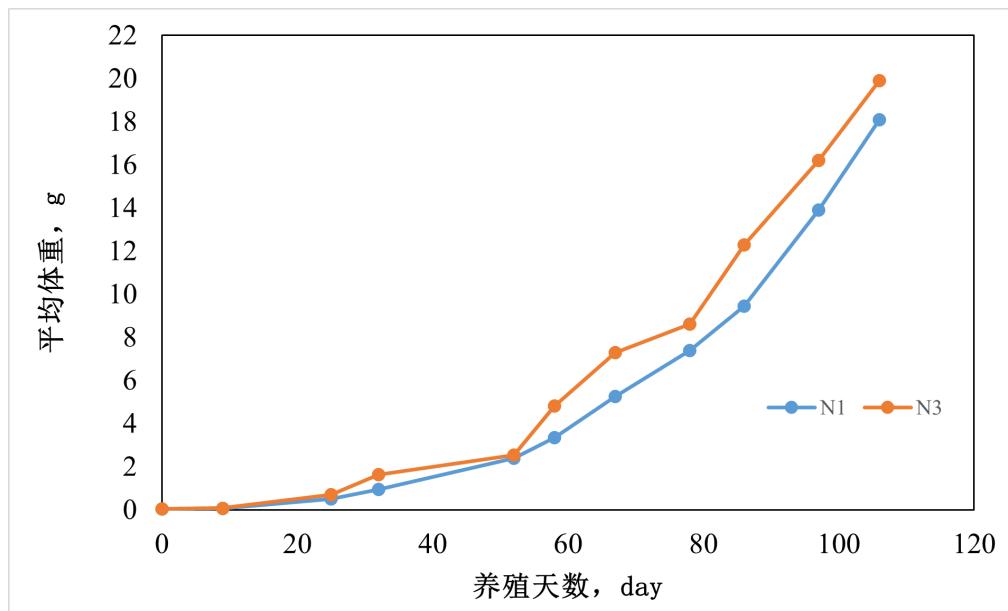


图 13 虾平均体重增长，N1：一号池；N3：三号池

上图展示了，经过三个月的养殖，一号池内虾平均体重 18.1 克，三号池虾平均体重 20.3 克，平均体重达到 20 克左右。

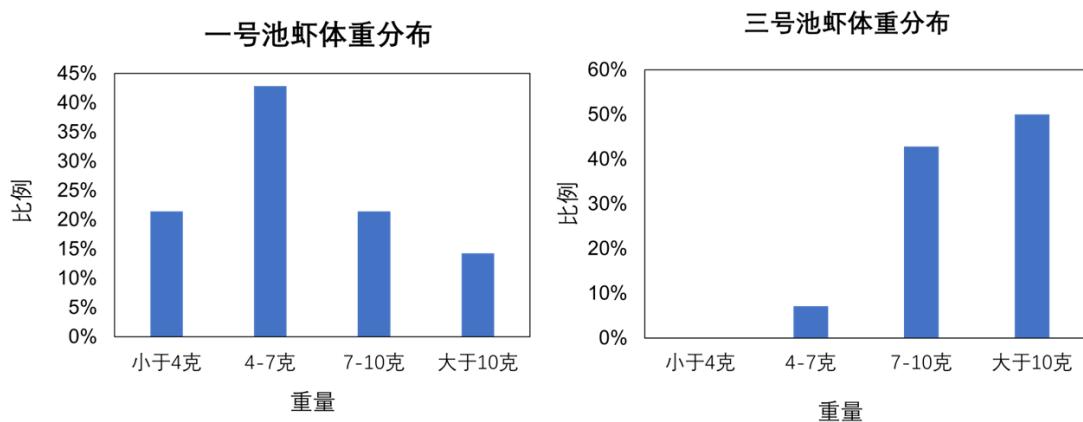


图 14 养殖 80 天时一号池三号池的虾体重分布情况

但主由于虾苗大小不均一，导致投料被大虾抢吃小虾几乎没有食物可吃而不长甚至死亡。收获时虾大小也不均一。上图展示了养殖 80 天时，虾大小分布不均一的情况。一号池虾平均体重 7.08 克/只；体长 7.0~14.5 厘米。其中最小的 3.24 克，最大的 17.99 克。三号池虾平均体重 9.58 克/只；体长 9.0~12.0 厘米。最小的 4.83 克，最大的 14.31 克。因为来苗时的某些袋子中虾苗大小更不均一的部分被投入了一号池养殖，从而一号池的虾苗大小不均

一情况更严重一些。

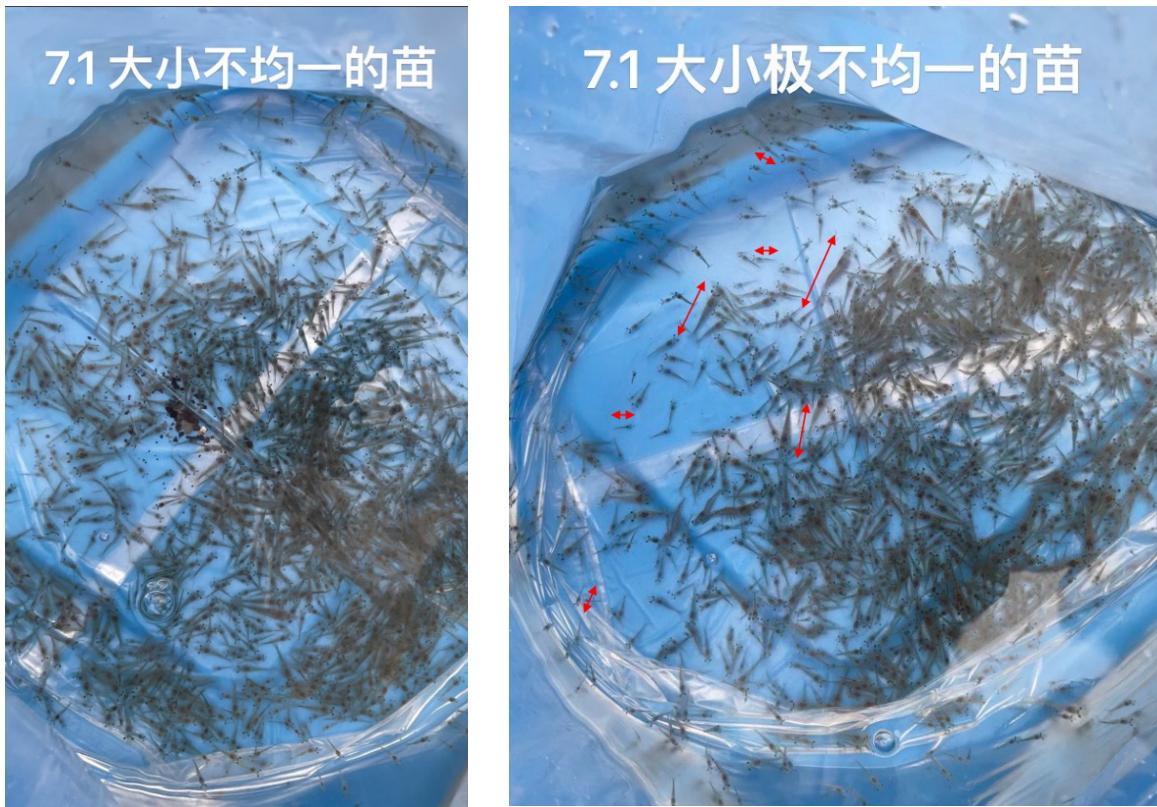


图 15 2024 年 7 月 1 日到达虾苗大小不一的情况

上图展示了 2024 年 7 月 1 日二十袋虾苗到达大棚时的样子，虾苗大小不均一。每袋 1500 尾左右虾苗。人工抽查两袋计数，分别为 1468 (+24 尾死苗) 和 1520 (+17 尾死苗) 尾。数量基本正常。问题是：①虾苗过大不耐运输，部分死亡；②虾苗大小差异大，苗大小 0.8~3.7cm 不等。养殖后期会出现大者恒大，小虾苗几乎不长的问题。

8.1.2 水质指标（日常数据）

在 2024 年 7 月 1 日至 11 月的养殖过程中，一号池和三号池没有发生大的水质波动。养殖过程中初期一号池氨较高，后期基本稳定，数值为 0 mg/L；三号池氨基本维持在标准值以下，后期数值为 0 mg/L。亚硝酸盐稍有波动，能基本维持在 0~0.5 mg/L 之间，对养殖无大影响。硝酸盐浓度随着养殖天数增加在增加，但硝酸盐对虾类影响较小。pH 值通过添加石灰乳调节，基本维持在适宜范围内。养殖水温随着从 7、8、9 月份维持在 28~31 摄氏度之间，

最适宜虾类生长，到 10 月中旬水温开始下降，至 11 月 10 日，水温能维持在 20 摄氏度以上。溶解氧数值波动较大，随着虾的长大和投食量增加，溶解氧会从 7.5 mg/L 逐渐跌落至 3.0 mg/L 左右，考虑如何增加高密度养殖下的溶解氧水平是一个关键课题。

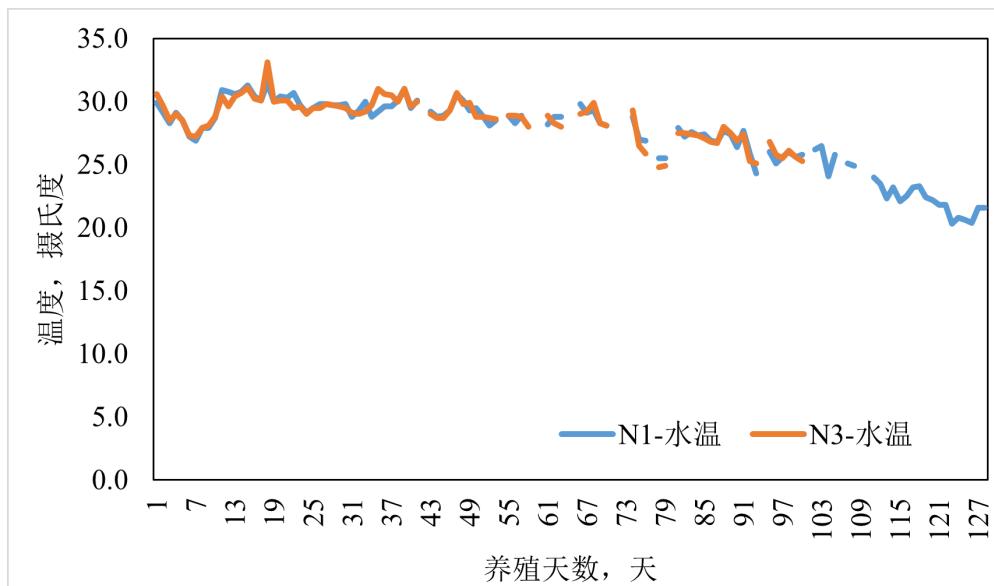


图 16 养殖池水温随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

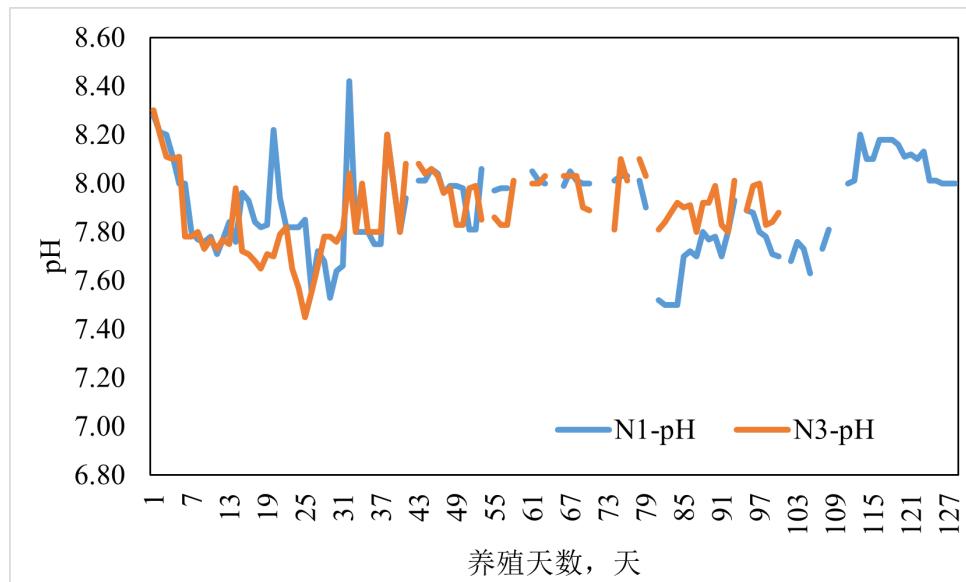


图 17 pH 随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

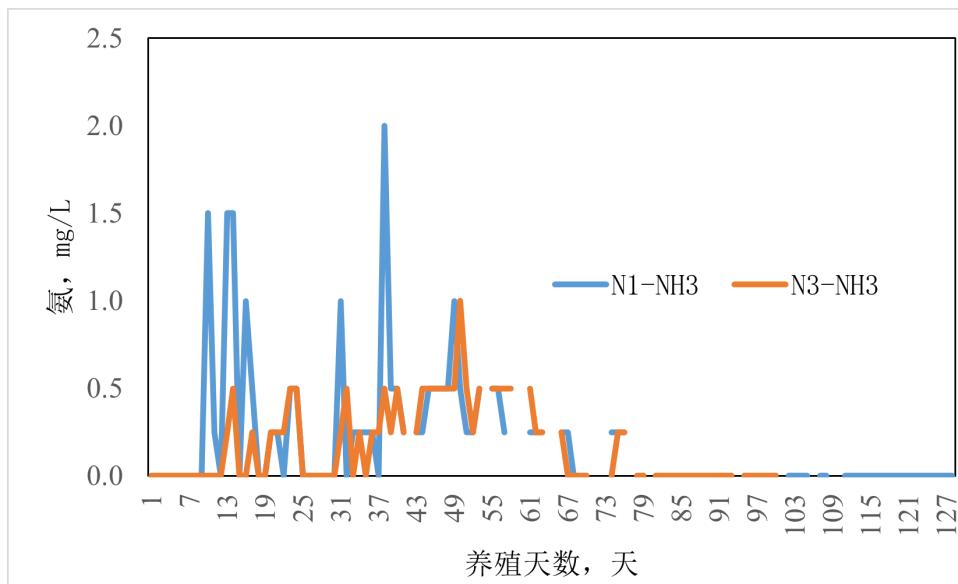


图 18 氨浓度随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

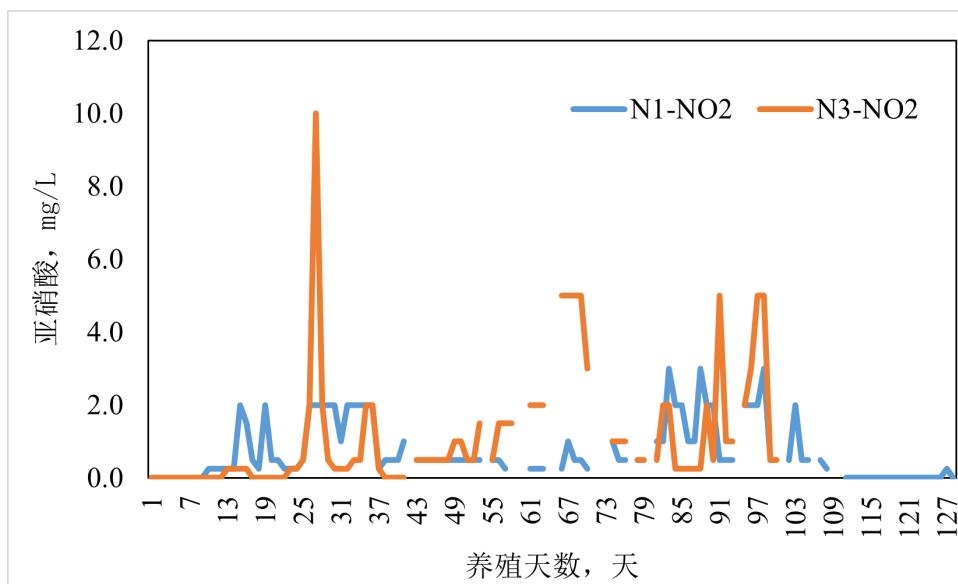


图 19 亚硝酸盐浓度随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

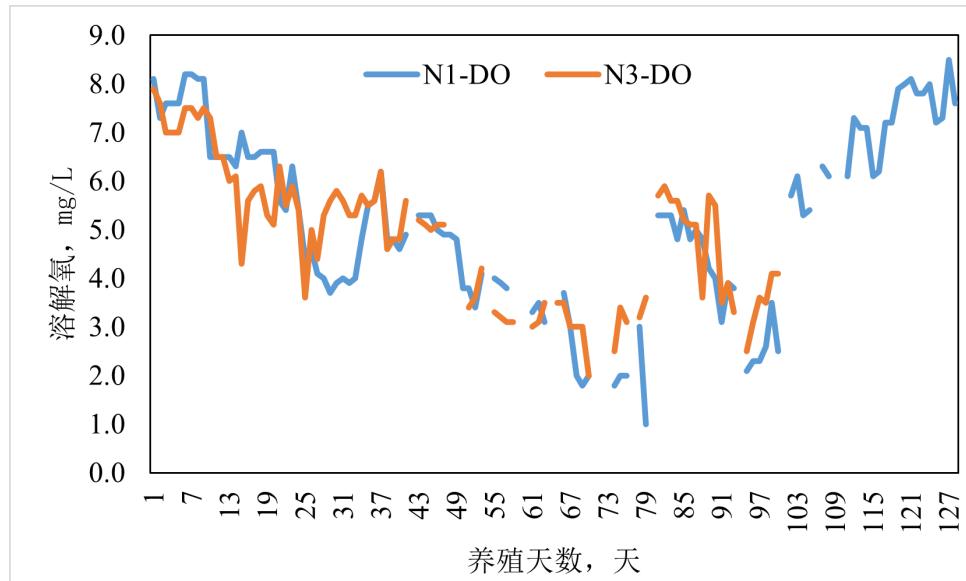


图 20 硝酸盐浓度随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

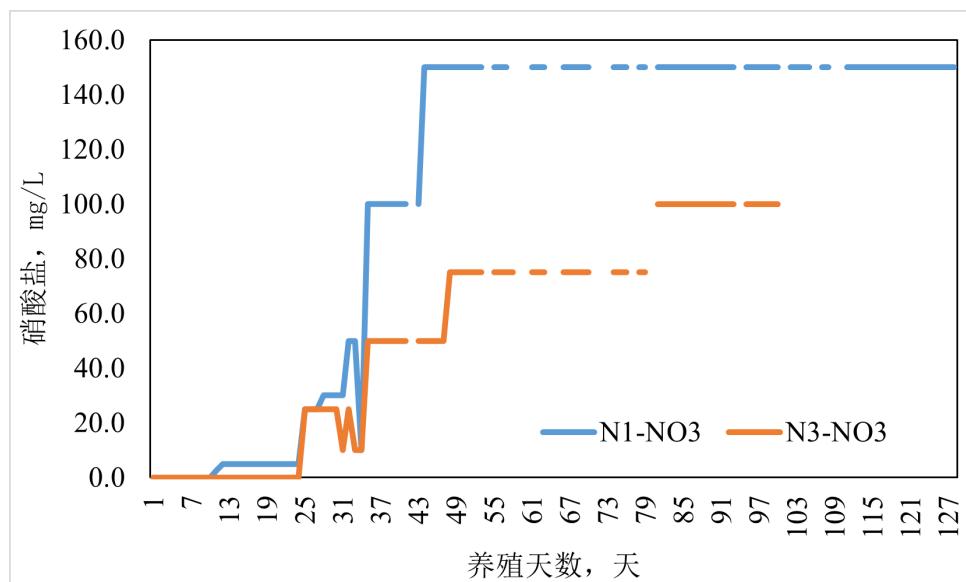


图 21 溶解氧随养殖天数变化，N1：一号池；N3：三号池

第9章 系统升级与改造

9.1 提升养殖密度的系统调整

本次养殖密度基本维持在 500~1000 尾/平米，考虑到不换水养殖，这是一个比相当高的养殖密度。但有一些问题仍不能忽视。

1) 提高固体废物的收集和排出养殖系统外的效率

物理过滤器可以将 70 微米（使用 200 目滤网）以上的固体物过滤出，但关键在于如何提高池中固体物集中到物理过滤器内效率和减少物理过滤器的反冲洗频率以减少排污量。

合理的水流设计可以将污物集中到养殖池中心，进而被收集到反冲洗物理过滤器内。可以使用较大循环水量/合适的入水角度将池水旋转起来，可以将污物集中在池中央，进而被收集进物理过滤器内。尽量避免池内的各种设备（特别是曝气设备）损失造流的动能，使造流失败。

使用双排系统。双排系统的关键在于大流量的循环水流来自于池内的上部清水，这部分水要避开物理过滤器，避免造成物理过滤器的堵塞和过于频繁的反冲洗；小流量的循环水要高效率地将底部沉淀的固体污物带出到物理过滤器内，这部分小水量可以将 90% 以上的固体沉淀物带出。双排系统既能保持较大的总循环水量（通过生物滤池），不至于生物滤池的循环水量被物理过滤器堵塞而失去功能；又能靠良好的集污效率将大部分污物（通过小水量）集中在物理过滤器内而被滤出。

物理过滤器尽量使用大型号。也可考虑使用其他过滤形式。

2) 提高高密度养殖的溶解氧水平

养殖密度的增高，对需要曝气维持高溶解氧水平提出了极高的要求。虽然一定程度的低溶解氧水平不会导致养殖失败，但必然会对生物的呼吸消化和生长产生影响，因此维持高水平的溶解氧是十分重要的。

本次养殖中的溶解氧可能由于密度过高，曝气效率不能到达消耗氧气速

率而出现问题；也可能因为水中大量繁殖的耗氧微生物消耗了大量的氧气。在养殖中后期，一个极小的实验，证实了在没有虾类生活的 2 升水（浑浊）中，溶解氧也在被快速地消耗（短短 1 分钟，从 5.3 mg/L 降低到大约 0.5 mg/L）。大量耗氧微生物的消耗氧气的能力是不能忽略的。此项也和快速移出固体废物有直接的关联，大量的固体废物在养殖池中会为微生物的生长提供一定的附着和营养，造成微生物快生长，甚至形成一定的生物絮团（Biofloc Technology）。

生物絮团技术也是一种介于土塘养殖和完全循环水工厂化之间的一种减少换水的养殖技术，但它需要维持生物絮团和养殖生物之间的一个平衡关系，并且可能会造成土腥味等问题。它与本循环水工厂化养殖没有可以借鉴的关系。

使用氧锥（Oxygen Cone）可以将溶解氧水平提高至 20 mg/L，并减少在池中的传统曝气石/曝气盘数量。使用微纳米气泡技术也可以提高水中的溶解氧水平。

9.2 新型设计的改造

物理过滤器的选择与设计非常重要。可以考虑将数个养殖池并连起来，并提供一个更完善的物理过滤、生物滤池和消毒杀菌设施。数个养殖池可以共用一套生命维持系统，便于维护和故障解决。但为了安全性，必须至少有一套设备备用，这样可以在其中一个系统中的某个模块（物理过滤器、生物过滤器、水泵、气泵等）故障或不良运行时提供立马切换的可能。也可以一套维护期间，启用另一套系统。这可能会提高整体运行的稳定性和可靠性。例如每 5 个 20 吨的养殖水池并联，提供一套设计容量 100 吨的生命维持系统，另一套同样的系统备用。可以计算和考虑这样运行的成本和收益。

9.3 环保与节能措施

9.3.1 废水回收利用

考虑目前状况下的更节水方案，可以将物理过滤器过滤出的固体废物沥

干，上部清水继续返回生物滤池，处理后返回养殖池。剩余的固体废物含水量极少，可以做堆肥减量。此举除蒸发量外几乎可以不补充新水，甚至可以将废水排量降低至 0。

9.3.2 能源节约方案

- 使用虾粪等固体废物做沼气发酵可以产生能源，可以供给大棚日常电力消耗；
- 使用太阳能发电板可以产生大棚使用的电力；
- 使用太阳能加热水，可以节省秋冬季节加热水需要的能源消耗；
- 做好养殖水池的保温措施和大棚的保温措施，可以极大节省能源。

参考文献

- Michael B. Timmon, 朱松明. 2021. 循环水养殖系统（第五版）. 杭州：
浙江大学出版社.
- 蔡生力, 黄旭雄, 刘红. 2015. 水产养殖学概论. 北京：海洋出版社.
- 李生, 朱旺明, 周萌. 2018. 南美白对虾高效养成新技术与实例. 北京：
海洋出版社.