

# FEF2024009 年度報告

## 1. 行政摘要

### 1.1 項目概述：

為了解決香港海洋網箱下有機物堆積和過載問題，我們建議利用氧氣納米氣泡技術，溫地和向缺氧的海床及其周圍水體充氣，以修復水質和海底微生物群落。我們將借鑒智利公司用於深海沉積物修復的方法，並對其進行調整，使其適用於香港較淺的水域。

在本項目中，我們將驗證該方法是否能夠改善沉積物微生物群落和水質，並評估該技術是否可移植到本地漁場的魚類養殖區。

### 1.2 引言

隨著水產養殖的集約化和新魚類養殖區的即將設立，改善海洋養殖方法以提高產量和可持續性變得非常重要。海洋養殖場面臨的一個主要問題是有機物的積累。香港魚類養殖區的海床因海洋養殖中過量的飼料和魚類排泄物累積，導致有機物超載，這是一個重大問題。

隨著漁場海床的生態系統消耗氧氣，微生物群落可以從主要由好氧細菌轉變為產生硫的厭氧細菌。這些厭氧細菌利用氮和碳的效率較低。系統的富養化可導致環境缺氧，促進浮游生物大量繁殖（Chen 等，2021 年）。

由於香港水產養殖業的情況特殊（養魚戶通常只能使用一個場地，並在該場上養殖多個物種），休耕漁場並不可行，否則將對業務產生負面影響。有機沉積物的累積速度輕易超過其分解速度，使海床轉變為缺氧環境，並可能導致魚類健康問題或因意外干擾而釋放出有毒的硫化氫氣體。香港城市大學的水產獸醫服務觀察到夏季溫暖月份時，漁場的溶解氧水平可低至2 ppm，不利魚類的健康和生產。此外，有害物質或病原體爆發導致魚類死亡事件相對頻密。

### 1.3 建議解決方案

為了改善漁場周圍的海洋環境，我們提議增加水體和海床交界的氧氣供應，尤其是在廢物積累最嚴重的區域，以加速自然分解的過程。近年來，納米技術在將氧氣輸送至沉積層以改善有機廢物分解的科技正在急速發展。納米氣泡是直徑小於200納米的微小負電荷氣泡。由於它們的小尺寸，它們能夠長時間懸浮在水中並能被魚類和細菌迅速吸收。這使它們成為將氧氣輸送到生態系統中的理想選擇。我們的團隊和其他研究團隊最近已經記錄了這項新興技術在調節水體和沉積物中微生物群落結構和平衡以及化學特性方面的有效性 (Mauladani et al., 2020; Xu et al., 2022; Chaurasia, 2023; Wang et al., 2023; Huang et al., 2023)。此外，智利的三文魚水產養殖業正在成功使用這項技術來修復其漁場下的海床，並減少休耕時間。在這個項目中，我們將運用並評估納米氣泡技術，以修復香港海水漁場下的沉澱層。我們的目標是改善水質，減少與網箱下沉積物相關的病原體接觸。這個系統將適用於所有無法休耕的海水養殖場，尤其是經歷過疾病爆發和溶解氧降低的漁場。納米氣泡技術在世界各地的應用越來越普遍，但在香港的漁場尚未使用。這個項目將確認在香港現有營運的漁場是否能夠使用納米技術來修復海床。

## 2. 計畫名稱及概要

### 養殖區海床修復計劃

本計畫旨在於本地海洋網箱養殖場設置納米氣泡系統，以評估其對長期水產養殖造成的沉積物及水質惡化的修復效果。

### 項目推行期

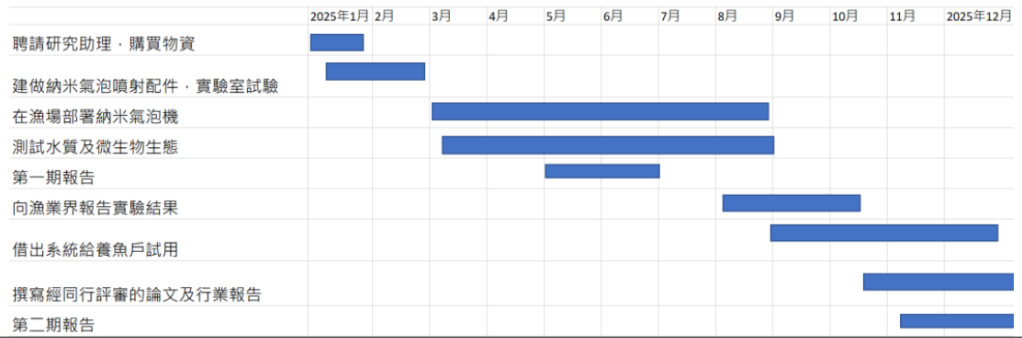
FEF2024009: 2025年1月1日至2025年6月30日

### 項目目標

本項目的目標是在本地營運中的海水網箱養殖場上設立納米氣泡技術系統並評估其應用，以改善因長期養殖導致海床退化和水質惡化的問題。

3. 按照時間表完成的活動

原定時間表



活動	擬議時間表	實際時間表	備註
聘請研究助理，購買物資	2025年1月至2月	2025年1月至4月	4月才成功聘請研究助理
建做納米氣泡噴射配件，實驗室試驗	2025年1月至2月	2025年1月至6月	準備於第二期重複試驗
在漁場部署納米氣泡機	2025年3月至8月	2025 年 3 月 – 2025 年 12 月	噴射配件已完成，待第二期重複試驗
測試水質及微生物生態	2025年3月至8月	2025年4月 – 進行中	結果分析中
第一期報告	2025年5月至6月	2025年7月至9月	

4. 已完成的活動成果包括照片等

設備設置

我們已完成納米氣泡擴散器的首個版本，這是一個50厘米x50厘米的方形網格，帶有供通氣水通過的注入孔。該擴散器（圖1）距離海床約8厘米。然而，仍需進一步調整以改善平衡性和擴散效果。

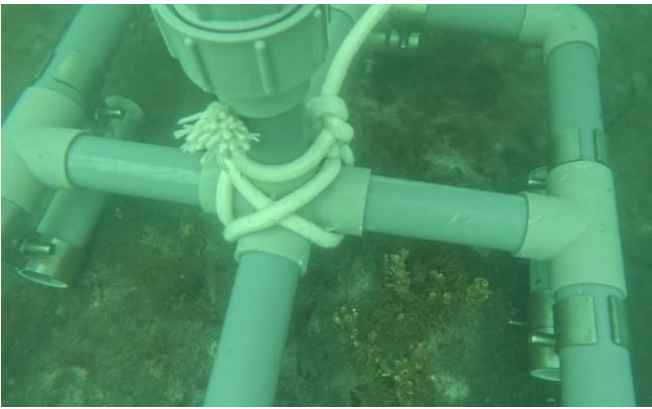


圖 1. – 部署在水產養殖場海床上的納米氣泡擴散器。

## 實驗試驗

利用從水產養殖場採集的沉積物樣本，我們進行了一項實驗室試驗，每天用氧氣納米氣泡對水箱進行6小時處理，持續18天（附錄A）。我們還從距離養殖場100米處採集了沉積物樣本作為參考。

水質每天進行監測，每週採集沉積物樣本進行脫氧核糖核酸提取。實驗開始和結束時，也對沉積物孔隙水質進行了採樣。

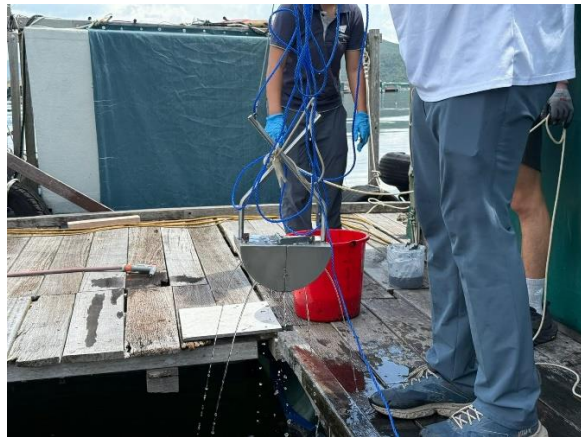


圖 2. – 計畫工作人員使用 Van-Veen 抓取採樣器在水產養殖場採集沉積物樣本

## 5. 與提案目標和影響相比的結果評估

### 設備設置：

第一版擴散器原型已完成，但現場部署系統設置時遇到一些技術及採樣困難。仍需更多時間進行調整，因此我們決定更有效地專注於詳細的實驗室規模試驗，並使用實驗室試驗的數據來協助調整現場試驗的設計。

實驗試驗；水質與微生物群落測試：

初步實驗試驗已完成，但由於招聘支持人員和設備到貨的延誤，進度較原定時間表略有延遲。。由於第一階段的重點已轉移到實驗試驗，實驗試驗的水質監測已經完成，但我們仍在等待微生物組定序分析的結果（微生物組組成、 $\alpha$  和  $\beta$  多樣性），因為實驗後處理耗時較長。

在現場採集沉積物樣本時，海底網箱下的沉積物樣本散發出強烈的臭蛋氣味，顯示硫化氫含量較高，而距離研究養殖場100米的現場對照樣本則未檢測到此氣味。我們已為未來實驗購買了硫化氫測試套件。養殖場沉積物樣本中還觀察到許多管狀海洋蠕蟲，而現場對照樣本中未觀察這些蠕蟲。

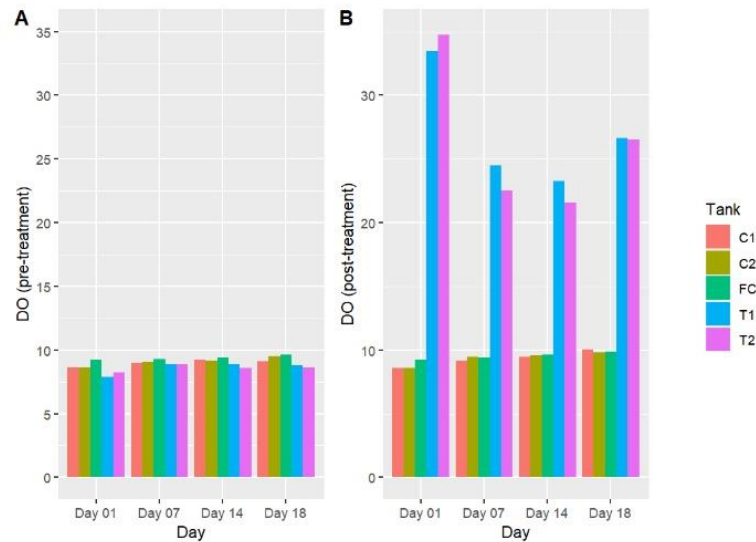


圖3 - A) 氧氣納米氣泡處理前的溶氧量 (DO) 柱狀圖, B) 處理後30分鐘的溶氧量, 針對對照 (C1、C2)、非漁場沉泥對照 (FC) 及納米氧治療組 (T1、T2)。

在為期18天的試驗中, 工作日每天對處理組施加氧氣納米氣泡, 溶氧量 (DO) 每天維持在20百萬分之一以上, 持續6小時。圖3顯示了處理前和處理後30分鐘的溶氧量。實驗期間溫度始終維持在室溫 (24度)。

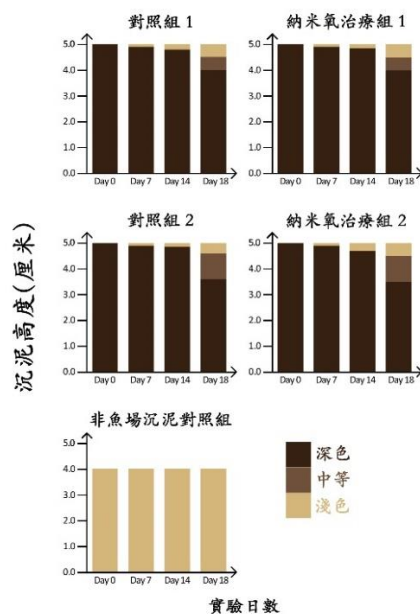


圖4 – 各實驗水缸的沉積物顏色 (淺色、中等和深色) 剖面圖 (厘米)。

在為期18天的實驗後, 對照組和處理組水箱的沉積物表面顏色隨時間變淺, 然而對照組與處理組樣本之間並無顯著差異 (圖4)。我們懷疑水中增加的氧含量無法到達沉積物的深層。

目前, 在 18 天試驗結束時, 處理組和對照組之間的孔隙水質量沒有明顯差異, 包括總有機碳 (TOC; 表面 10-13mg/L, 底部 15-25mg/L)、總氨氮 (TAN; 表面 1-2mg/L, 底部 2-5mg/L)、總氨氮 (Tppm-30m-300 2005 0-30m)、磷酸鹽 ( $\text{PO}_4$ ; 表面 0.5-0.75ppm, 底部 1.25-2ppm)、鎂 (Mg; 表面 800-1000ppm, 底部 800-1300ppm) 和鈣 (Ca; 表面 300-4000 Xppm, 底部 350) (圖5)。

然而，從水產養殖場100米外採集的沉積物樣本（非漁場沉泥對照組 FC）孔隙水水質，與從養殖區內採集的沉積物（C, T）在某些參數上顯示出明顯差異，包括總有機碳（TOC；表面<10毫克/升，底部<12毫克/升）、總氨氮（TAN；表面約0毫克/升，底部<1毫克/升）、鎂（Mg；表面<800 百萬分之一，底部約800 百萬分之一）和鈣（Ca；表面約250 百萬分之一，底部<300 百萬分之一），這表明養殖活動對沉積物質量有一定影響（圖5）。

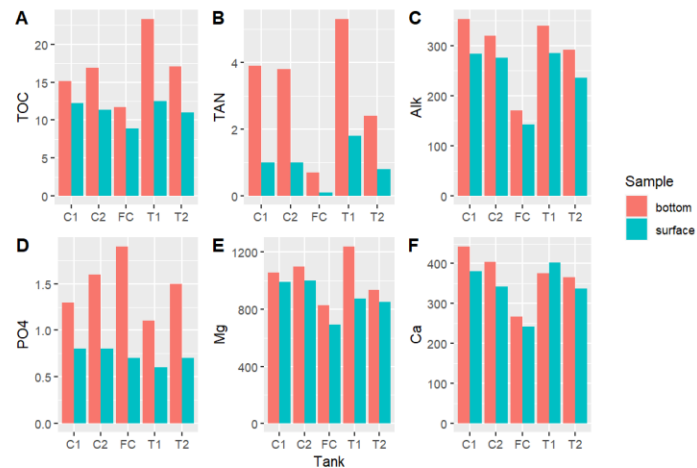


圖5 – 5個水箱（對照組 - C1、C2；納米氧治療組 - T1、T2；FC組 - 非漁場沉泥對照組，沉積物取自距離水產養殖場100米）的孔隙水水質曲線圖。實驗第18天，從表層（淺色）和底部（深色）沉積物中採集孔隙水樣本，參數包括總有機碳（TOC）、總氨氮（TAN）、鹼度/硬度（alk）、磷酸鹽（PO<sub>4</sub>）、鎂（Mg）和鈣（Ca）。

在氧氣納米氣泡處理水箱中觀察到白色菌墊，疑似由硫化物氧化細菌種類組成。從第三週開始，對照水箱表面觀察到棕色生長物，而在處理水箱中，截至第三週末，棕色生長物的數量較少（圖6）。現場對照水箱中未觀察到任何生長物。雖然16s rRNA測序結果尚未取得，但對照水箱與處理水箱中不同的生長物可能表明存在不同的微生物群落。待微生物群落結果完全取得後，將作出進一步結論。

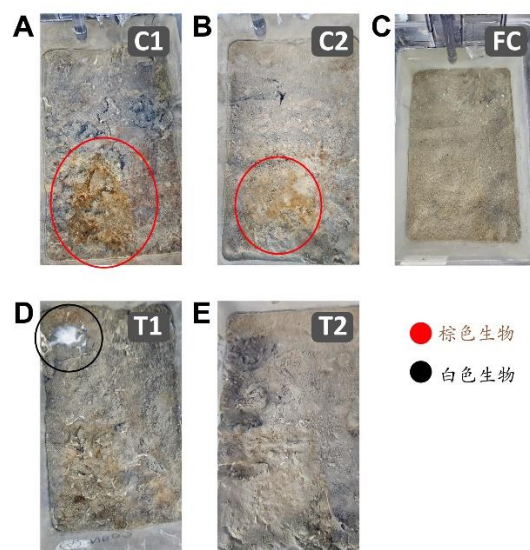


圖6 - 照片顯示第18天在對照水箱中發現的棕色生長物以及處理水箱1中發現的白色生長物。

總體而言，在沉積物上方的水中添加18日氧氣似乎不會對水質和沈積物狀況產生似乎沒有顯著差異，只有一些觀察上的差異。

現場試驗：出於安全考慮，我們決定在實驗室條件下改進研究方案。當我們確定了能夠正向影響微生物群落的沉積物增氧方法，我們將在養殖場實施優化後的系統。



## 6. 總結與展望

雖然目前的孔隙水質結果顯示，網箱沉積物處理組與對照組在總有機碳（TOC）、總氮（TAN）、鹼度（Alk）、磷酸鹽（PO<sub>4</sub>）、鎂（Mg）和鈣（Ca）等方面無明顯差異，但網箱沉積物組與非網箱沉積物（距離養殖區僅100米的沉積物）在這些參數上的差異顯著，非網箱沉積物的水質較佳，特別是TOC和TAN含量較低。

結果明確顯示，水產養殖場下方的沉積物健康和質量與距離100米以外的沉積物存在顯著差異。沉積物中有臭蛋味的存在，極大可能是硫化氫，以及在養殖場沉積物樣本中發現的管狀多毛蠕蟲，都是有機富集環境的指標。在極端天氣條件或其他意外干擾下，缺氧沉積物的不受控再懸浮可能會對水質造成重大影響，繼而影響這些區域內魚類的健康和生長。由於有機物累積的問題將隨著該區域水產養殖活動的持續而加劇，因此需要通過人為干預來改善沉積物質量。儘管此次測試結果在僅18天的處理時間內並未顯示出足夠的改善，我們推測這是由於相對較短的處理期，或者因為與高氧水接觸的沉積物表面形成了保護層，阻止額外的氧氣滲透到沉積物的更深部分，因此處理過的農場沉積物與未處理沉積物之間未出現明顯差異。由於靜止的海洋蠕蟲的普遍存在，以及在沉積物樣本中缺乏活動性蠕蟲或其他生物，導致各沉積層之間的交換不多。為了測試層混合是否能與提高的溶解氧水平一起改善沉積物質量，我們即將在第二階段進行的實驗將設計為有額外的處理，並與更多的樣本和水質測量進行比較，與我們的試點試驗相比，重複性也會有所增加。

我們建議對研究進行以下調整：

- 延長每次處理的時間（每天增加8小時的溶解氧）和研究的長度（30-40天）
- 在提高的溶解氧水平下，翻耕沉積物以增加接觸面積並促進沉積層之間的交換。
  - 5種處理：奈米氣泡氧 + 翻耕、僅奈米氣泡氧、僅翻耕，及對照（4種農場沉積物處理），以及我們的現場對照處理（使用距水產養殖場100米外的沉積物進行對照）。
  - 在實驗水槽中，我們會使用園藝耙輕輕擾動沉積物，每約4-5厘米以3厘米的小步驟翻耕，以便在表層和下層沉積物之間進行混合。小步驟旨在最小化對靜止海底生物（如管狀蠕蟲）造成的損害，同時允許富氧水到達沉積物的更低部位。該翻耕動作將每週執行兩次。
- 增加分析的重複次數。
- 更頻繁的水質測試（每兩天一次）和沉積物取樣（而非僅在開始和結束日期進行3-4個樣本），以更詳細地觀察水質和微生物群的變化。
- 每週更換水以提高水的穩定性，並模擬自然的鹽水條件。
- 進一步測量孔水中的硫化氫以評估水質。

由於我們已申請（並獲得批准）將第二階段延長6個月，項目完成時間從原定的2025年12月延至2026年6月，我們計劃重複進行實驗室水箱試驗，延長處理時間並調整方法，以評估氧氣納米氣泡處理對沉積物微生物群落和孔隙水質的長期影響。我們也將在解決現場試驗設置的技術和安全問題後繼續進行現場試驗，並根據實驗室試驗結果調整研究設計（如處理時間和採樣頻率）。

**7. 專案人員監測計畫（基於資料保密原因，專案人員監測計劃不作公開）**



## 8. 聲明

本人特此向漁業提升基金管理委員會及包含增補基金在內的相關基金的督導委員會作出以下不可撤回的聲明：本完成報告已就涉及的所 有由第三方擁有的數據及資料適當地列明了相關的資料來源，而本機構已就此等數據及資料獲得所需的授權。

項目負責人簽署：

*Omid NEKOUEI*

---

Sep 30, 2025

本報告內所表達的任何意見、結果、結論或建議，不一定反映漁業提升基金或基金信託人的立場。

## 附錄 A. – 實驗設計

我們設置了五個 7 升的水缸，分為氧氣納米氣泡處理組和無處理（對照組），每組各有兩個重複水箱，另外亦有一個非漁場沉泥對照組。試驗持續 18 天，處理組水箱每天通過氧氣納米氣泡通氣 6 小時。實驗期間每天監測水質，包括溫度、溶氧量（DO）和總有機碳（TOC）。每天測量淺色和深色沉積物的厚度，以評估處理的有效深度。每 7 天從水箱中收集 5 克表面沉積物樣本進行 DNA 提取，以盡量減少干擾。每個樣本約 30 克沉積物以 2000xg 離心 5 分鐘，從表面和底部沉積物中提取孔隙水，用於在實驗結束時測量 pH、總有機碳（TOC/DOC）、鹼度、鎂、鈣和氮廢物。。

所有沉積物樣本均使用 QIAGEN PowerSoil Pro 試劑盒按照製造商的說明進行脫氧核糖核酸萃取。萃取的脫氧核糖核酸將被送去進行 16S 定序，以確定微生物群落組成，結果尚待確定。

**附錄 B. – 實驗助理工作紀錄詳情 (基於資料保密原因，本附錄內容不作公開)**

**附錄 C. – 專案人員招募流程記錄**

(基於資料保密原因，本附錄內容不作公開)

**附錄 D. – 經審核的帳目報表**  
(基於資料保密原因，本附錄內容不作公開)