

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

第一名

探究精神獎

030505

北極地區河口水體自然對流現象之實驗探討

學校名稱： 臺北市立龍門國民中學

作者： 國二 盧羿涵 國二 楊宜臻 國二 葉于裴	指導老師： 陳英杰
---	------------------

關鍵詞： 北極、鹽度、羽流

得獎感言

難忘的科學探究之旅

「國中組地球科學科第三名……」頒獎典禮主持人的聲音在場中迴盪，我們既期待晚一點聽到自己的名字，又害怕名次落空。空氣似乎凝固了，我們一動也不動，目光緊盯著主持人。終於，那句夢寐以求的聲音傳來：「第一名及探究精神獎，臺北市立龍門國民中學！」

從佈展日到頒獎典禮的五天中，我們在展場見到許多優秀的作品，相信能從中脫穎而出獲得大獎，除了自身的努力之外，老天的眷顧也很重要，而指導老師更功不可沒！英杰老師將我們三個熱愛科學的女孩集結在一起，利用課後及假日的時間指導我們做實驗、寫報告，有時候假日待在實驗室超過12個小時，而老師總是最早到校且最晚離校。猶記得全國科展的前一天，老師對我們說：「還有沒有之前沒注意到的問題？我昨晚作惡夢，夢到妳們被評審問到答不出來！」當時雖然笑著回答：「老師，信任我們一點啊！」但大家都很清楚，這是一個前所未有的研究主題，很可能遭到評審委員的質疑，老師應當承受很大的壓力。

我們研究的起源是組員盧羿涵參加公視「下課花路米前進北極」的節目拍攝，她在北極的河口發現一個特殊現象：河水中有類似棉絮的物質自河底湧上來，並隨著流水往海邊移動。於是我們依據她現場採集的水樣以及拍攝的影片，去設計實驗模擬該現象並探討其成因。每次做實驗我們都必須謹慎小心，如果儀器裝置擺設的位置、方向，甚至攝影機拍攝的角度稍有偏差，就無法獲得好的結果。

其實研究的過程並非一帆風順，尤其是閱讀參考文獻時經常遇到障礙，往往整篇文章只看懂” conclusion” 這個標題。因為遭遇如此的挫折與困難，讓我們更堅定想研究這個主題的念頭：國內沒有學生進行相關的研究，能成為先驅者何樂而不為呢？此外，家長一度認為花太多時間在科展的實驗，為此犧牲了讀書與休閒的時間，可能影響課業成績的表現。但對我們而言，假日於學校進行實驗具

有探索與學習的樂趣，而這個"樂趣"唯有親身參與才能體會。幸好經過親子溝通後，父母決定支持我們繼續研究。

感謝一路上協助我們的貴人！龍門學姊認真尋找關鍵問題，提昇了作品的完整性；學者專家多次聆聽簡報，提供了寶貴的建議；同學熱心提問，發現了作品及海報的錯誤；班導師時時刻刻叮嚀，給予許多溫暖及鼓勵。

這段難忘的科學探究之旅，不僅讓我們體會科學研究的艱辛與樂趣，更讓我們領略團隊合作與持之以恆的力量。得獎並不是終點，而是新旅程的起點！未來，我們將帶著科展經驗與研究熱情，繼續探索未知，迎接更大的挑戰！



師生攝於龍門國中地球科學教室



師生攝於參展作品前



頒獎典禮後師生合影

摘要

本研究旨在探討北極地區河口水體之自然對流現象，並解析其特殊羽流形態與形成機制。我們調配不同濃度的食鹽水模擬海水與河水進行實驗，使用壓克力水槽建置鹽水與淡水的對流環境，以模擬河海交界處河水與海水的交互作用情形。此外，利用注射筒與自製水槽模擬河水局部對流形成羽流(Plumes)之情形，並測定不同鹽水濃度的羽流之流速。實驗結果顯示，鹽水與水之密度差較小時(鹽水鹽度小於 20 psu)，對流速度較慢且較易形成穩定蘑菇狀羽流；反之，鹽水與水之密度差較大時，對流速度較快，容易產生不穩定蘑菇狀羽流。

壹、前言

一、研究動機

暑假期間，本研究團隊一位成員前往北極地區參加活動，在挪威 Isfjorden 海灣旁，注意到位於河海交界處的水流有特別的對流現象(圖 1)。返回臺灣後經過調查，發現這種現象是因為河海交界處，密度不同的流體交匯並進行對流，進而在流體介面產生獨特現象，可利用水中能見懸浮顆粒的特徵而被觀察到。因此，我們設計一系列的實驗來模擬並研究此現象，試圖探討其形成機制並揭露其特徵。



圖 1 鳥瞰河面特殊 流線
(作者拍攝)

二、研究目的

- (一)探討北極地區河口水體的自然對流現象及其形成之物理過程。
- (二)分析淡水與海水密度差形成之羽流的流速及其頭部形態之特徵。

三、文獻回顧

- (一)<液體交流道>探討了不同密度液體在細管中的交交流動，發現當兩種液體的密度差較大時，密度梯度會產生強烈的震盪現象，使流體來回交換形成穩定的交交流動。該研究還指出，液體密度的變化會影響震盪的週期與穩定性，當密度差過大或過小時，液體可能無法形成穩定的交流現象。(陳柏言等，2007)
- (二)根據<The Rayleigh-Taylor instability>，北極海河口的密度差對流現象與 Rayleigh-Taylor 不穩定性在流動機制與界面發展上具有高度相似性。兩者皆由密度差與重力作用驅動，當高羽流體位於低羽流體上方時，界面會因擾動而形成對流及蘑菇狀結構。(Piriz A., Cortázar Osvaldo, López cela, Juan José, Tahir, and Naeem. 2006)

- (三)根據<Natural versus forced convection in laminar starting plumes>的研究，探討自然對流與動量驅動的強制對流之差異，指出密度差驅動自然對流關鍵在於浮力大小。由浮力主導的對流穩定且界面清晰，流線較細，而動量主導的對流則產生渦流與不穩定結構且流線較粗。該研究透過在透明水槽中，注入不同密度的甘油水溶液，利用陰影成像技術與染料標記，觀察密度差改變對流速及羽流頭部形態的影響。該文獻所提到由浮力驅動的羽流頭部形態和我們所觀察到的蘑菇狀類似(Rogers Michael, Morris Stephen. 2009)，因此參考該研究的實驗拍攝方法。
- (四)根據<滾滾濁水入海流－河川入海濁流之實驗模擬>的研究，利用活動式隔板模擬混濁河水與海水交會，海水的鹽度定為 35 psu，主要在改變泥砂的多寡，觀察混濁河水與海水交會後的流動情形(李佩庭、陳又瑄，2009)，本研究參考該作品的實驗方法。
- (五)根據<海洋密度流之探討>，密度差異是驅動海洋密度流的重要因素，當不同鹽度或溫度的水層相互作用時，會產生穩定或不穩定的密度對流現象。該研究使用不同濃度的鹽水模擬海洋密度流，發現當鹽度梯度較大時，羽流速率增加，並可能在特定條件下形成旋或層流結構(李佩庭、歐柏昇，2008)。這與本研究的發現相似，在實驗條件適當時羽流產生蘑菇狀結構。
- (六)根據<雙擴散對流及鹽手指現象>指出，當流體間溫度與鹽度不同時，高壓會往低壓流動，產生雙擴散現象，並在交界面產生鹽手指(Salt finger) (許峰翌、林軒毅，2022)
- (七)羽流(Plumes)：指當一種流體垂直流入另一種流體時所形成的流動結構，其運動受動量（慣性）、擴散與浮力（密度差）影響。若流體密度較低且上升，則浮力為正；若密度較高但因動量驅動上升，則為負浮力。羽流通常因邊界夾帶效應而擴散，並可能由初始的浮力主導轉變為動量主導。此外，羽流在遠離源頭時，常由層流過渡至湍流。(取自 Wikipedia)
- (八)本研究所定義的流體流速是指羽流頭部頂點移動的速度。
- (九)卡門渦街(Kármán vortex street)：指流體以一定速度流經物體(如礫石)時，會出現不穩定的邊界分離，進而產生兩道對稱排列的漩渦，分別以不同方向轉動，流經物體後會形成交錯排列的漩渦列。
- (十)內波(Internal wave)：流體因密度差造成分層，在分層的交界處產生波動，而這種波動就是內波。驗方法。。

貳、研究設備與器材

- 一、實驗器材：食鹽、水、水性染料、電子秤、鹽度計、滴管、刮勺、滴定管、量筒、升降台(腳架)、滴定管、廣用夾、鐵架、攝影器材(手機)、手機架。電動轉盤、沉水馬達。使用食鹽調製鹽水來模擬海水，鹽度計用以確認鹽度。使用水性染料以避免影響實驗結果。

二、實驗裝置：

(一)孔洞置中塑膠注射筒：出水孔洞置中的注射筒是用來模擬單一位置對流情形。

(二)壓克力水槽：使用雷切機切割壓克力自製不同尺寸的水槽，可全面精確拍攝影像。

三、分析軟體：

使用 Tracker 軟體進行影片的分析，使數據的呈現與計算更加客觀。實驗完成之後將流速的數據放入 LabPlot 繪製圖表。

參、研究過程與方法

一、實驗一：模擬漲潮時河口河床底泥的運動情形

(一)器材：壓克力水槽(內含斜坡)、泥砂、鹽水、水、滴定管、鐵架、鐵夾、 手機

(二)步驟：

- 1.使用厚度為 0.5 cm 的壓克力水槽進行實驗，內含斜坡模擬河海交界處地形
- 2.在斜坡平台上放入泥砂厚約 2mm
- 3.配製鹽度 4 psu 的鹽水。將鹽水加入水槽至斜坡平台上 1 cm
- 4.於水槽斜坡平台上 方架設盛裝水的滴定管，水槽另一側架設盛裝鹽水的滴定管
- 5.打開滴定管的活栓， 開始錄影並分析河水與海水交會時泥砂的運動影像

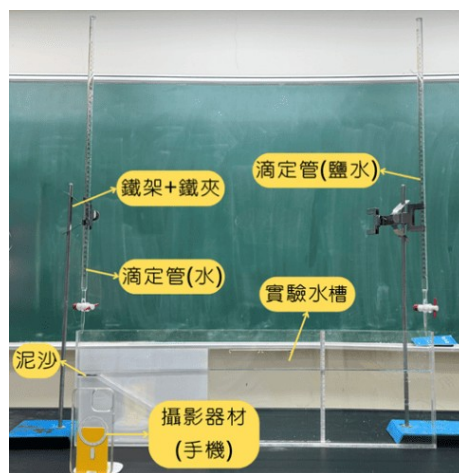


圖 2 實驗一裝置(作者拍攝)

二、實驗二：模擬河水與海水的交互作用

(一)器材：壓克力水槽(中間有閘門)、鹽水、染料、水、手機

(二)步驟：

- 1.使用厚度為 1 cm 的壓克力水槽進行實驗，中間附有活動閘門(圖 3)
- 2.調製鹽度 4 psu、30 psu 的鹽水。將實驗水槽中間閘門放下，並在其中一邊加入染色的鹽水，在另一邊加入水至相同高度
- 3.開啟實驗水槽中間活動閘門，開始錄影

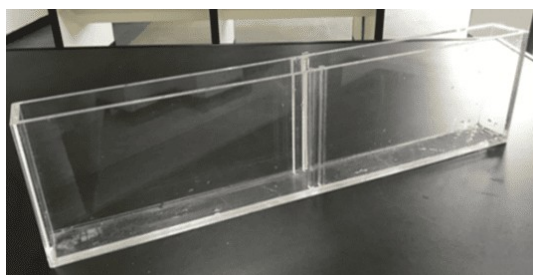


圖 3 80x6x20 cm 壓克力實驗水槽
(作者拍攝)

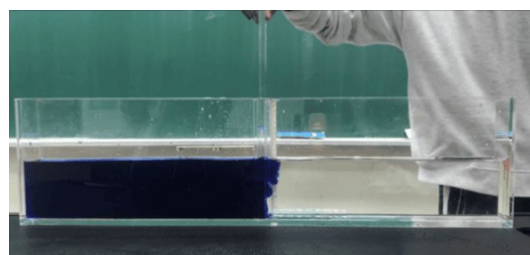


圖 4 開啟壓克力水槽中的活動閘門
(作者拍攝)

三、實驗三：模擬海水入侵河道之現象

(一)器材：斜坡壓克力水槽、鹽水、染料、水、滴定管、鐵架、鐵夾、手機

(二)步驟：

- 1.使用附有斜坡的壓克力水槽進行實驗
- 2.將調製好的藍色鹽度 4 psu 的鹽水倒至接近岸邊，大約低 0.3 cm，兩側用鐵夾固定滴定管，加滿水、鹽水。打開滴定管並開始錄影，如圖 5，錄影 5 分鐘，觀察焦點在河海交界的河道面

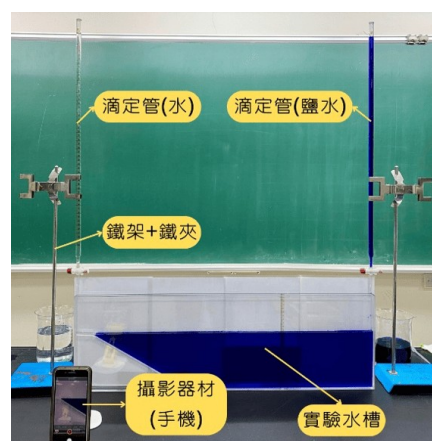


圖 5 實驗三裝置(作者拍攝)

四、實驗四：模擬河水與海水自然對流形成羽流

(一)器材：鹽水、水、染料、鐵架、鐵夾、手機、注射筒、壓克力水槽

(二)步驟：

- 1.配製鹽水及水(淡水、染色)靜置一天備用
- 2.以溫度計測量鹽水及水的溫度確認水溫相同(避免因溫差導致密度差與預期不同)，並以鹽度計確認鹽水的鹽度
- 3.使用孔洞置中的 60 mL 注射筒吸滿鹽水，確定注射筒中沒有氣泡(氣泡會影響周圍液體的流動)，再以鐵夾將其固定在鐵架上
- 4.量筒盛裝 135 mL 的水並加入 1 mL 的藍染劑，混合均勻後放置於注射筒正下方。手機架設於同一高度，並開始錄影記錄
- 5.將注射筒下降至其出水口接觸量筒內液面後開始自然對流，當藍色的水流上升到達注射筒頂端後停止錄影，接著使用 Tracker 軟體自動追蹤蘑菇狀結構頂端的位置並計算上升流速，最後將結果作圖分析 (圖 7)
- 6.調製 1~4 psu 的鹽水並染色，將壓克力水槽裝滿水置於腳架上，利用鐵架固定注射筒，上升腳架直到水面接觸到注射筒，開始錄影
- 7.比對將鹽水與水染色的流線差異

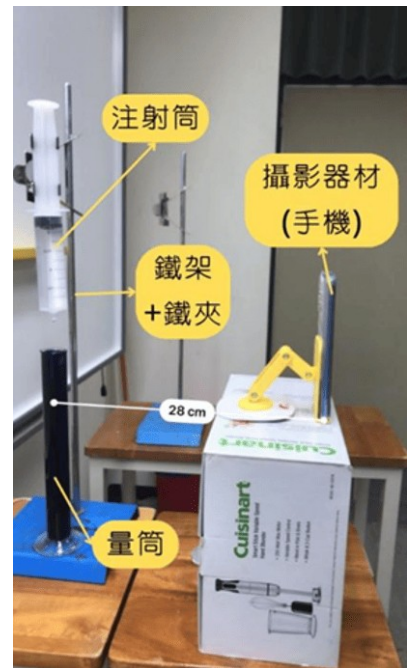


圖 6 實驗四裝置(作者拍攝)

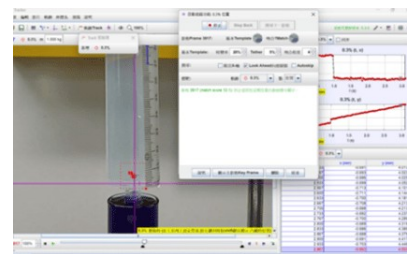


圖 7 使用 Tracker 軟體自動追蹤蘑菇頭頂端位置並計算作圖(作者繪製)

五、實驗五：模擬多組羽流之形成

(一)器材：鹽水、染料、水、注射筒、壓克力水槽、手機、鐵架、鐵夾

(二)步驟：

- 1.使用自製的方形實驗水槽、拍攝底座及升降台，分別將 20 mL 的塑膠注射筒四個 (2x2 陣列)、塑膠注射筒九個(3x3 陣列)用泡棉膠及膠帶進行黏合。接著製作拍攝用的頂蓋並調製鹽度 4 psu 的鹽水，最後將注射筒吸滿染色的鹽水並以鐵夾固定 (如圖 8)
- 2.手機定位後從底部及側面開始錄影，隨後緩緩升高升降台直到液面碰觸到注射筒，開始錄影 5 分鐘

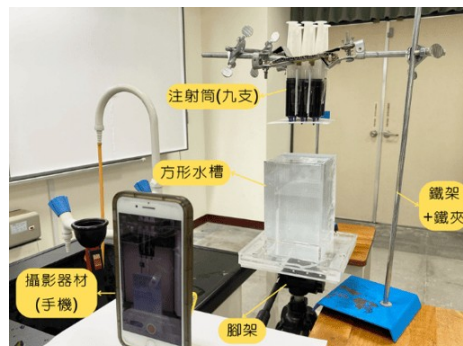


圖 8 實驗五裝置 (作者拍攝)



圖 9 自製水槽(作者拍攝)

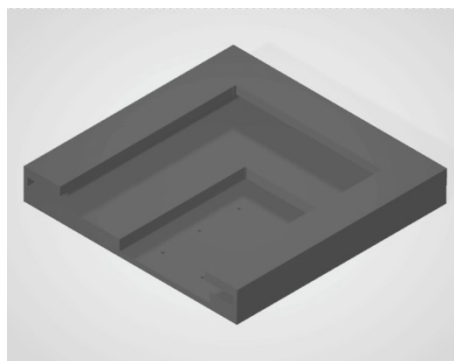


圖 10 自製水槽拍攝底座(作者繪製)

六、實驗六：探討外加動力的羽流型態

(一)器材：壓克力水槽、2x2 陣列注射筒、鐵架、鐵夾、手機、電動轉盤

(二)步驟：

- 1.調製 4 psu 鹽水並染色，放置常溫一天
- 2.壓克力水槽盛滿水並置於轉盤中央
- 3.2x2 陣列注射筒吸滿染色鹽水
- 4.利用鐵夾夾住注射筒，並用鐵架將注射筒固定於壓克力水槽正上方
- 5.緩緩降低注射筒高度直到出水孔碰觸水槽液面，啟動轉盤開始錄影

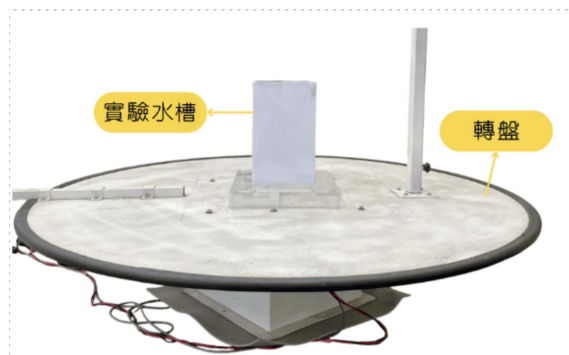


圖 11 實驗轉盤(作者拍攝)

肆、研究結果

一、實驗一：模擬漲潮時河口河床底泥的運動情形

根據實驗結果，我們可以推論當海水湧入河道與河水交會時，將產生因密度差所造成的對流作用，同時帶動位於河道底部的泥向上運動而湧升。由於河水與海水的鹽度不同，導致密度不同，因此這個特殊湧升現象可能為河水與海水交會時，因密度差造成的羽流所產生的揚起現象。

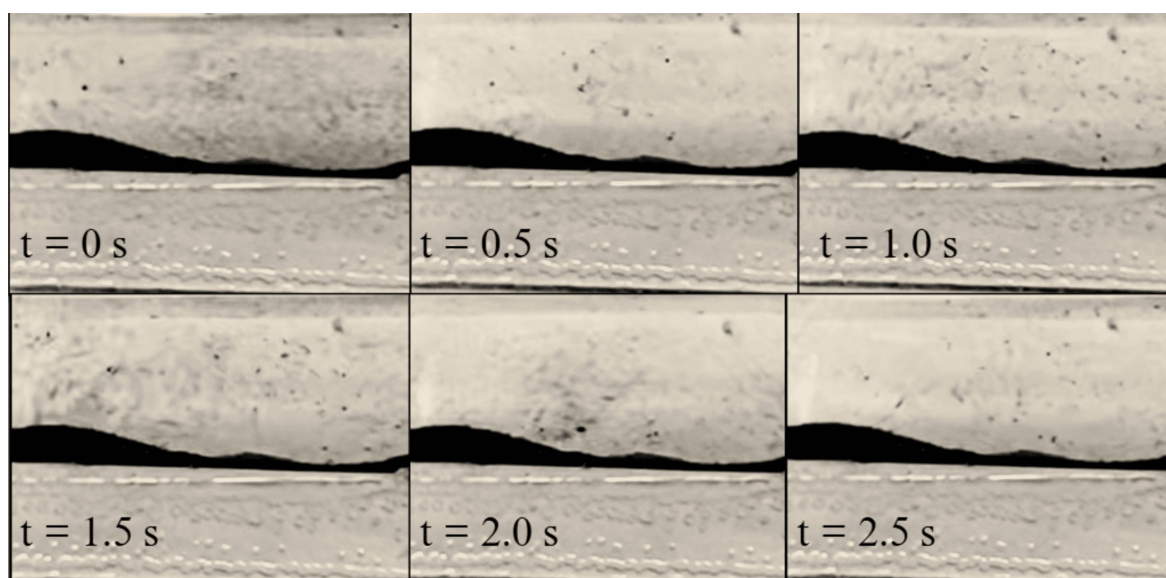


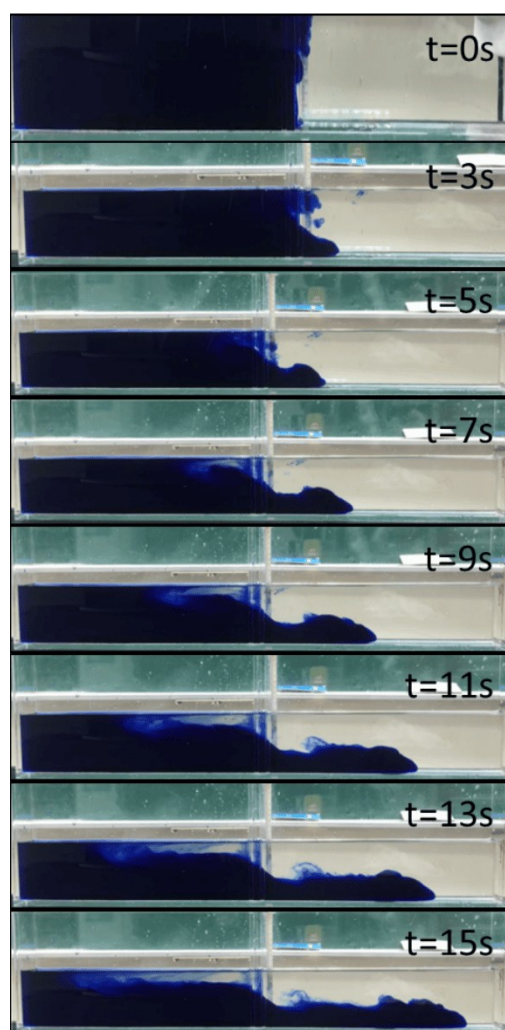
圖 12 模擬河海交界處河床底部泥砂的流動情形(作者拍攝)

$t = 0.5\text{ s}$ 時，可觀察到泥向上移動而產生湧起的現象，由於泥的顆粒小不易觀察。 $t = 1.5\text{ s}$ 時，有更多的泥被帶起，並形成向上流動的流線。 $t = 2.5\text{ s}$ 時，可以清楚觀察到平台上方的泥揚起後，會再下沉進而產生上下循環對流。這與現地觀察到的現象相符。

二、實驗二：模擬河水與海水的交互作用

為了模擬河水與海水的交會情形，我們使用 4 psu 和 30 psu 的鹽水分別與淡水進行對流，並觀察其變化過程。結果發現：在交會處邊緣會產生捲揚現象，推測與實驗一所見的揚起作用有所關聯，詳細過程如下：

(一)實驗結果：



$t = 0\text{ s}$ ：閘門開啟瞬間，左側鹽水向右擴散，交界處開始出現擾動。

$t = 3\text{ s}$ ：擴散對流初步展現，鹽水開始滲透到淡水中。

$t = 5\text{ s}$ ：鹽水向右擴散，淡水則向左漂浮，形成交錯流動。

$t = 7\text{ s}$ ：擴散的前端因重力影響而凸出，並沿著底部前進。

$t = 9\text{ s}$ ：擴散過程中開始出現上揚現象。

$t = 11\text{ s}$ ：鹽水持續向右擴散，並產生明顯向上揚起的結構。

$t = 13\text{ s}$ ：鹽水持續向右擴散，上方揚起部分增加。

圖 13 鹽度 4 psu 鹽水與水相互流動

(作者拍攝)

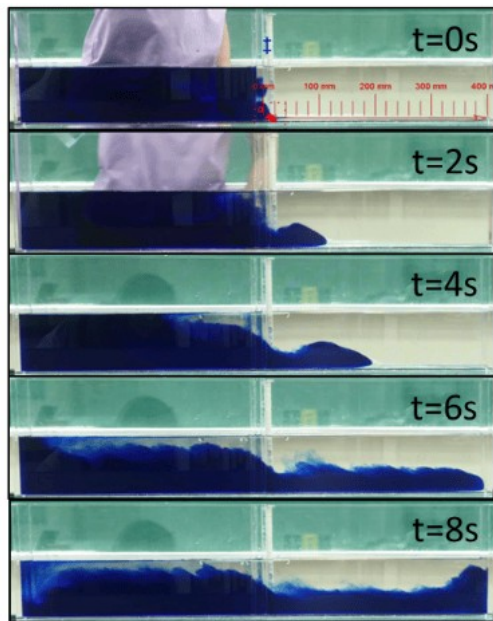


圖 14 鹽度 30 psu 鹽水與水相互流動
(作者拍攝)

$t = 0\text{ s}$ ：門開啟瞬間，左側高鹽度 30 psu 鹽水開始向右擴散，交界處產生擾動。

$t = 4\text{ s}$ ：30 psu 鹽水持續向淡水擴散，因密度較大，沿底部運動。

$t = 6\text{ s}$ ：淡水從上方進入鹽水，形成對流現象，顯示羽流的運動方向開始發生變化。

$t = 8\text{ s}$ ：30 psu 鹽水擴散至 40 cm 處，擴散範圍相對較大。同時，揚起現象較少，遠低於 4 psu 情況，顯示出密度較大的鹽水不容易產生明顯的上揚結構。

(二) 結果分析：

1. 當藍色 4 psu 鹽水與淡水相互對流時，交界處有揚起的現象(黃色圈選處)。推測實驗拍攝到的揚起現象，是產生特殊流線的主要原因。



圖 15 4 psu 鹽水與水交界處的捲揚現象(作者拍攝)

2. 當鹽水向右擴散時，其前緣呈現尖銳的推進形態，這種推擠效應使前方的水體受壓，沿著擴散前緣外流，形成明顯的頭部(黃色圈選處)。

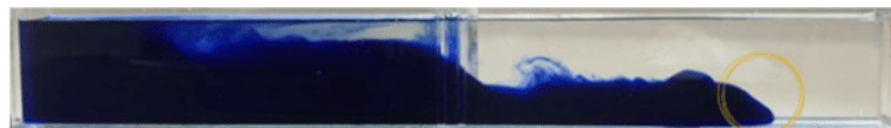


圖 16 4 psu 鹽水向右擴散時形成明顯頭部(作者拍攝)

三、實驗三：模擬海水入侵河道之現象

為了更加清楚的觀察到海水湧入河道的情況，我們使用水性染料讓攝影更加清晰，實驗結果如下：

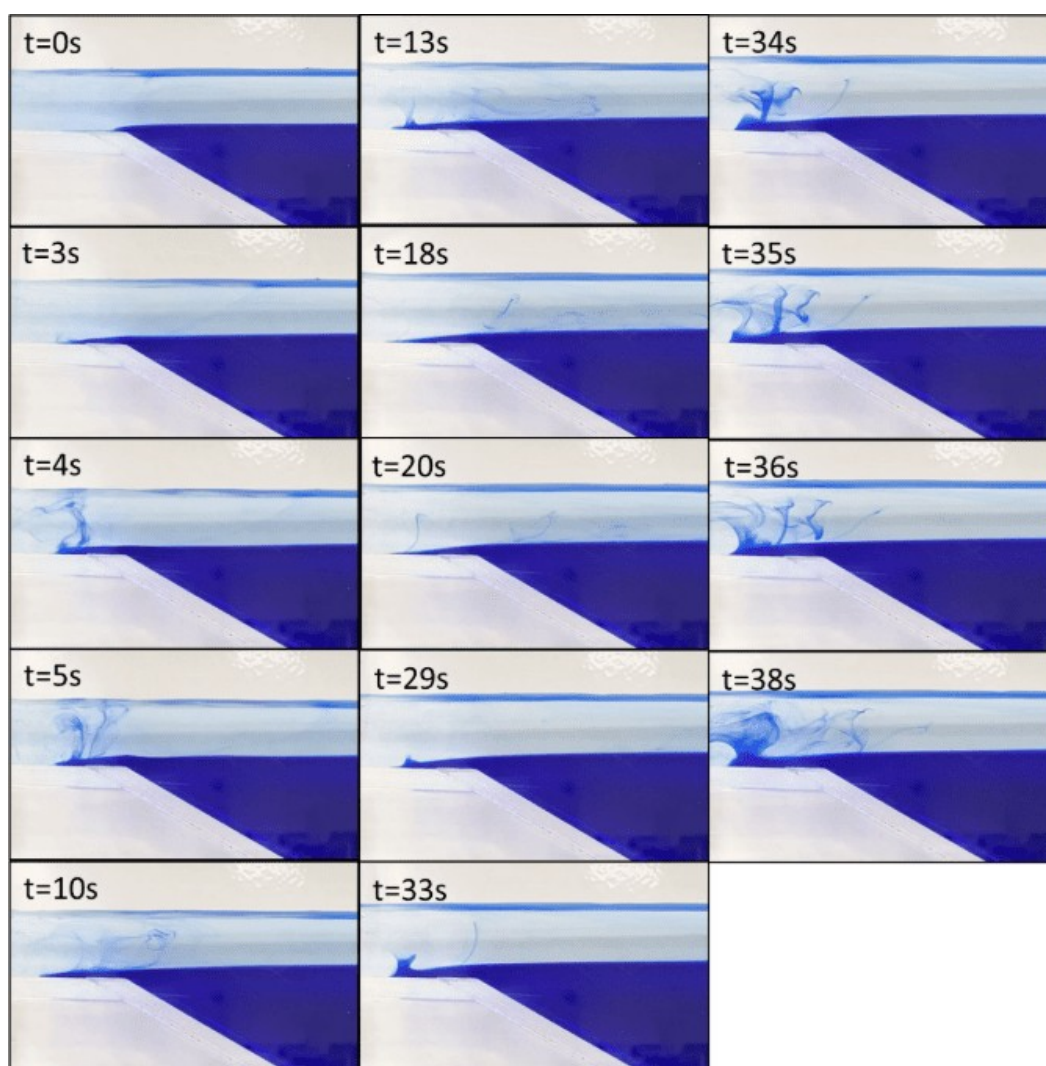


圖 17 在實驗三，鹽度 4 psu 的鹽水與淡水在河道的擴散情形(作者拍攝)

在 $t = 4 \text{ s}$ 時，鹽水(藍色)開始向淡水區域擴散，並在交界處產生局部擾動，這是第一次揚起現象的初始階段。此時，低密度的水受浮力作用上升，而高密度的鹽水則沿底部推進。這樣的密度差造成不穩定流動，導致了渦流結構的出現。

到了 $t = 5 \text{ s}$ ，擴散繼續進行，揚起現象逐漸明顯形成。由於鹽水的密度高於淡水，鹽水的擴散前端受到浮力與壓力梯度的影響，部分鹽水向上翻騰，形成揚起結構。這一現象表示了對流作用逐漸加大，密度梯度造成了垂直方向的運動。

在 $t = 10\text{ s}$ ，第一次揚起現象達到最大範圍，揚起的鹽水開始與周圍淡水混合，導致其邊緣變得平滑。此時，湍流結構變得更為圓潤，顯示出流體開始進入穩定擴散階段，揚起結構從集中轉向水平擴散。

第二次揚起現象出現在 $t = 13\text{ s}$ ，此時鹽水已經擴散到更遠的範圍。與第一次相比，第二次揚起，雖有波動結構，強度較不明顯。說明了擴散過程仍在持續中，但因為部分鹽水已經與淡水混合，密度差減小，使得揚起現象相對平緩。

第三次揚起現象出現在 $t = 20\text{ s}$ 時。與第二次相比，此階段的揚起幅度增加，並隨著有更為清晰的流線結構。這擴散過程中局部的不穩定性再次加強，導致局部區域的鹽水發生強烈的對流運動。

第四次揚起現象出現在 $t = 29\text{ s}$ 時，此時鹽水的擴散範圍已經顯著擴大。與前幾次相比，第四次揚起的範圍更大，但揚起的強度略微減弱。可能是密度梯度仍然存在，但整體的流體運動已經趨於平穩，鹽水與淡水之間的混合更加均勻，局部揚起現象變得較為緩慢。

根據實驗結果我們可以得知，當海水(鹽水)湧入河道(淡水)時，交界會因為紊流導致的不穩定性形成揚起的現象。

四、實驗四：模擬河水與海水自然對流形成羽流

本實驗透過觀察鹽水及水自然對流形成羽流的過程，進一步探討其形態與流動速率。

(一)實驗結果：

- 1.鹽水鹽度對羽流的影響：隨著鹽度增加，密度差異變大，羽流的流速隨之增大。我們使用 Tracker 軟體追蹤羽流影像並計算其流速，結果圖 18：

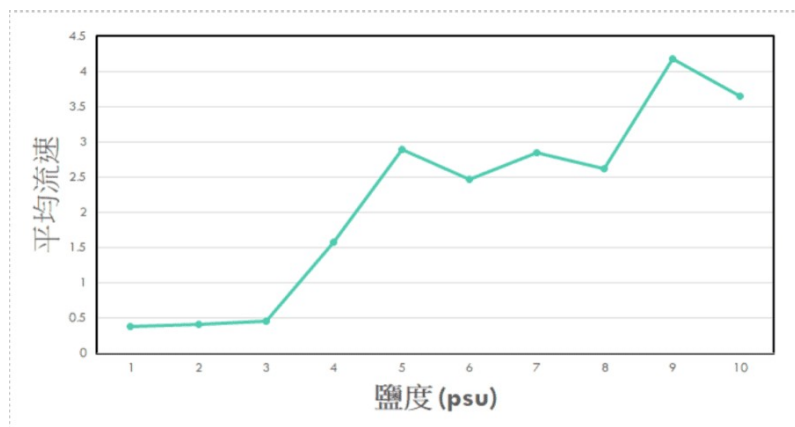


圖 18 不同鹽度下羽流的流速。可以看出，整體流速隨著密度差異而改變，呈正相關，密度越大，流速越快。(作者繪製)

2.不同鹽度下羽流上升時的頭部結構：

當羽流進行時，前進時的頭部會產生類似於蘑菇狀的結構，並且在不同鹽度之下，會產生相似型態但略有不同，結果如圖 19：

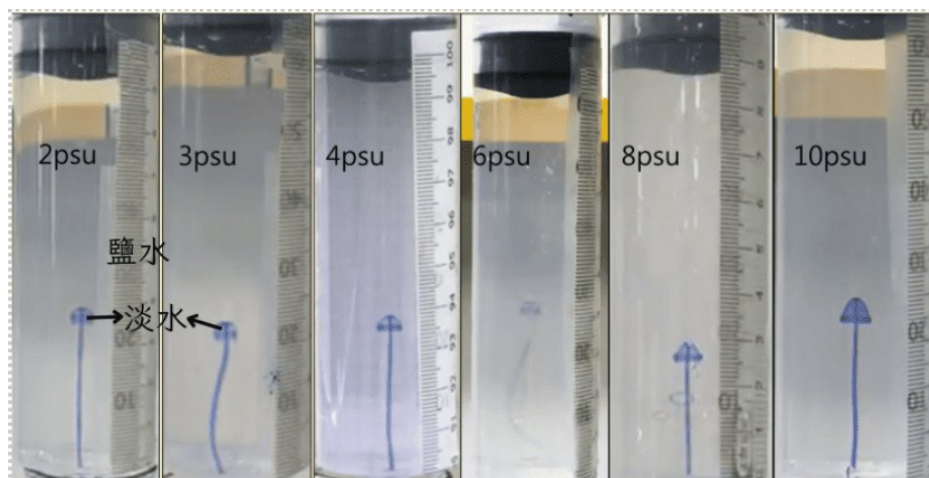


圖 19 不同鹽度水與水的對流情形，放大頭部觀察可以發現，在 2 psu 、3 psu 時，頭部結構較為圓潤；在 4 psu 以後的蘑菇狀結構較為尖頂。(作者拍攝)

3.單組向下對流結構與向上的比較：在對流過程中形成了羽流結構，當鹽水因密度較大向淡水擠壓時，因為我們的體積總量是固定的，空間大小也是固定的，我們推測向上對流向向下對稱，於是我們將向上對流的影像與向下對流的影像進行重疊比較。

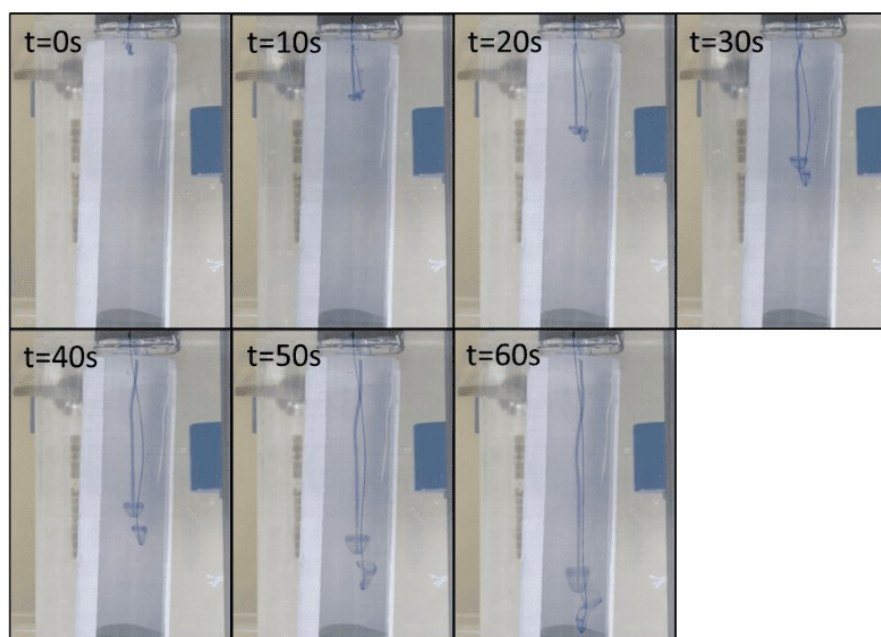


圖 20 將相向上擴散、向下擴散的鹽水對流影像重疊(作者拍攝)

在對流初期， $t = 20\text{ s}$ 時，向上擴散對流的速度和向下擴散對流的速度相同。然而在 $t = 30\text{ s}$ 之後，向下擴散的鹽水速度較向上的快，推測原因為：

在對流初期 ($t = 20\text{ s}$)，向上與向下擴散的對流速度相近，顯示系統仍處於對稱發展階段。然而自 $t = 30\text{ s}$ 起，觀察到向下擴散的鹽水速度顯著快於向上的清水對流。其可能原因為：高密度（對應高壓）的鹽水受到重力驅動，對下方低密度流體產生明顯的擠壓作用，使得下沉速度加快；而相對的，上升對流則由低密度水緩慢地被擠向上方，推進效率較低。

基於體積守恆原則，整體流體需維持流入與流出的平衡，因此系統調整為：下沉羽流呈現細長、集中、流速較快的特徵；而上升羽流則較為緩慢、擴散且形狀圓潤。此一不對稱發展反映了密度差異對於對流型態的主導影響。

會產生這樣的羽流結構，我們推測成因如下：

- (1) 當低密度淡水進入高密度鹽水時，界面擴散效應強烈，導致外側流體因速度差而水平擴展，形成蘑菇狀結構。當密度差較小時，上升流速減緩，擴散後的流體再受到高密度鹽水的向下壓力，產生下沉旋渦。
- (2) 反之當高濃度鹽水進入較低密度的水時，其浮力較大，上升速度較快，水平擴散作用相對較弱，使得流體更接近「尖頂傘狀」結構。

五、實驗五：模擬多組羽流之形成

(一)鹽度 4 psu 的 2x2 陣列、四支注射筒流動情形，其結果如圖 21。

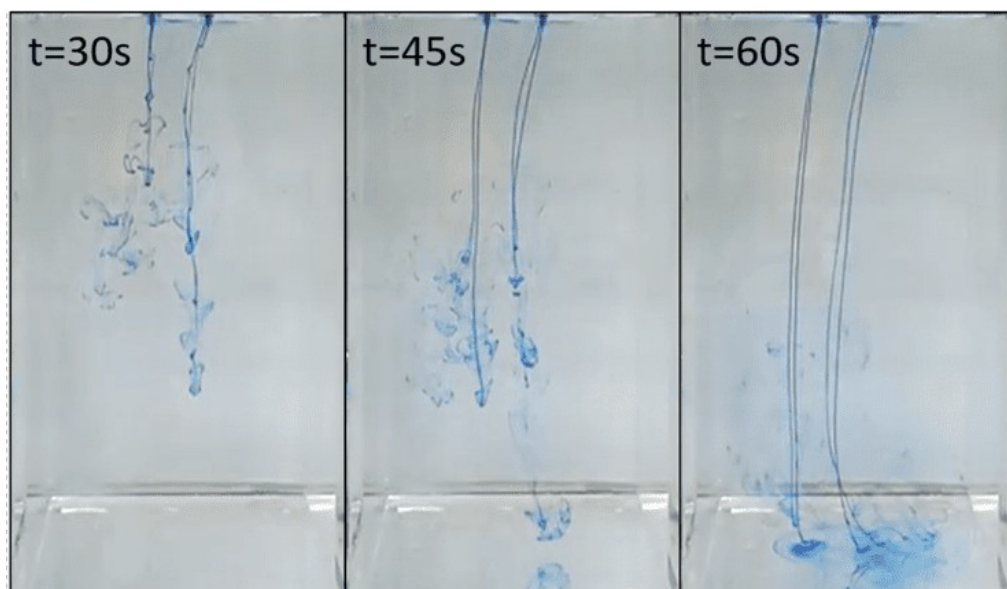


圖 21 其中，在 $t=30\text{ s}$ 時，鹽水的流線因為密度差的影響開始彎曲，水流還不穩定，蘑菇狀結構還看不清楚，不同流線之間也沒有明顯的影響。到了 $t=45\text{ s}$ ，流線變得比較直，蘑菇頭開始形成，但彼此之間還是各自流動，沒有明顯互相干擾。到了 $t=60\text{ s}$ ，流線變得筆直而穩定，蘑菇狀結構完全形成，水流進入穩定狀態，之後的變化就不大了。這說明鹽水的對流一開始比較亂，後來逐漸變得穩定，最後形成固定的流動模式。另外，比較 $t=30\text{ s}$ 、 45 s 、 60 s 的藍色流線前端的直線移動距離發現， 30 s 到 45 s 時的流速較快， 45 s 到 60 s 時的流速則慢。(作者拍攝)

(二)鹽度 4 psu 3x3 陣列、九支注射筒的流動情形，如圖 22。

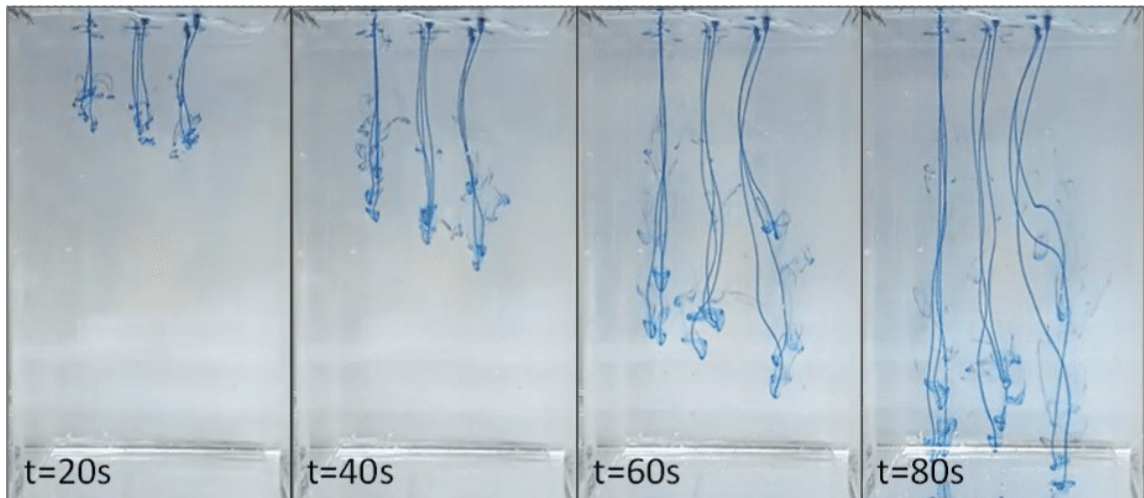


圖 22 鹽度 4 psu 3x3 陣列的流動情形(作者拍攝)

以上四張圖片中， $t=20\text{ s}$ 時，鹽水的流線筆直下降，與清水的交界清晰可見。由於鹽水內外層的下降速度不同（因擴散作用影響濃度），蘑菇狀結構還不明顯，流線之間的相互影響也不明顯，各自穩定下降。到了 $t=40\text{ s}$ ，原本只有垂直方向的鹽水流線開始慢慢擴散到水平方向，這表示鹽水的運動趨於穩定，蘑菇狀結構開始逐漸形成，但流線之間仍然沒有太明顯的交互作用。

在 $t=60\text{ s}$ ，蘑菇狀結構在流線頂端變得更明顯，雖然九條流線之間還是沒有明顯的影響，但流線的形狀已經趨於穩定，之後並沒有太大的變化，顯示對流進入穩定階段。到了 $t=80\text{ s}$ ，九條流線幾乎全部抵達容器底部，同時水平擴散加大，蘑菇狀結構更加明顯。值得注意的是，即使流線有些彎曲，它們的下降速度並沒有變快，顯示這些流線雖然有各自的流動路徑，但仍然受到相同的密度驅動力影響，並沒有因為流線間的擾動而影響整體的下降速度。以上的觀察說明，鹽水在水中的對流一開始是筆直下降的，隨著時間推移，水平擴散開始影響流線，最終形成穩定的蘑菇狀結構，而九條流線之間雖然接近，但並沒有明顯的相互干擾，顯示出密度對流的穩定性。



流線雖相距不遠，且密度差皆相同，但推測因為接觸時的角度不同，使流線、流速有些許的差異。但是，由於對流流速不快，流線間沒有互相影響，也沒有結合的趨勢，因此在單一位置的對流現象與其他位置並不會有太大的關係，各個點的流速、流線也不會結合，各流各的。所以在北極才會拍到不斷升的現象，這種現象可能與局部鹽度差和羽流的穩定度有關，使得湧升現象能連續不斷，長時間維持，且不會因對流之間的交互作用而迅速衰減或擾動。

▲圖 23 對流時由底部拍攝(作者拍攝)

六、實驗六：探討外加動力的羽流型態

為了更加貼近真實河道中流動的河水，本實驗透過轉速 10 RPM 的轉盤轉動實驗五的多組自然對流裝置，實驗結果顯示隨著轉盤轉動，底部所拍攝的流線與在北極地區現場觀察到的流線非常相似。

(一)底部拍攝的影像分析：

依據底部拍攝所得影像可知，當羽流進行時，受到外力的作用，流線漸漸地演變成類似北極河口所觀察到的流線，如圖 24 及圖 25。

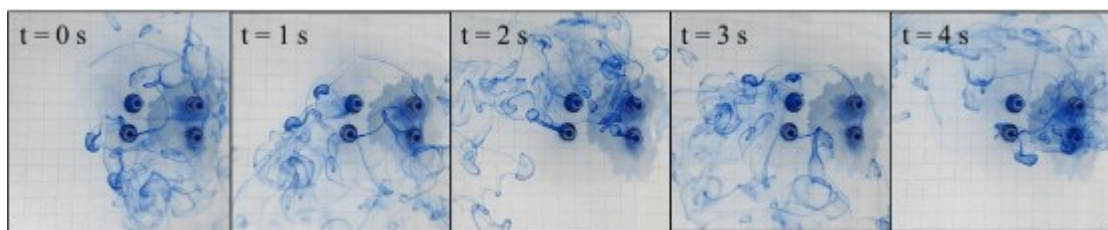


圖 24 $t=0$ s 到 $t=4$ s 的實驗影片截圖。 $t=0$ s 時，轉盤開始轉動，帶動四組流線隨之旋轉， $t=1$ s 之後底部觀察轉動所產生的流線十分接近地調時現場實際觀察到的流線。(作者拍攝)

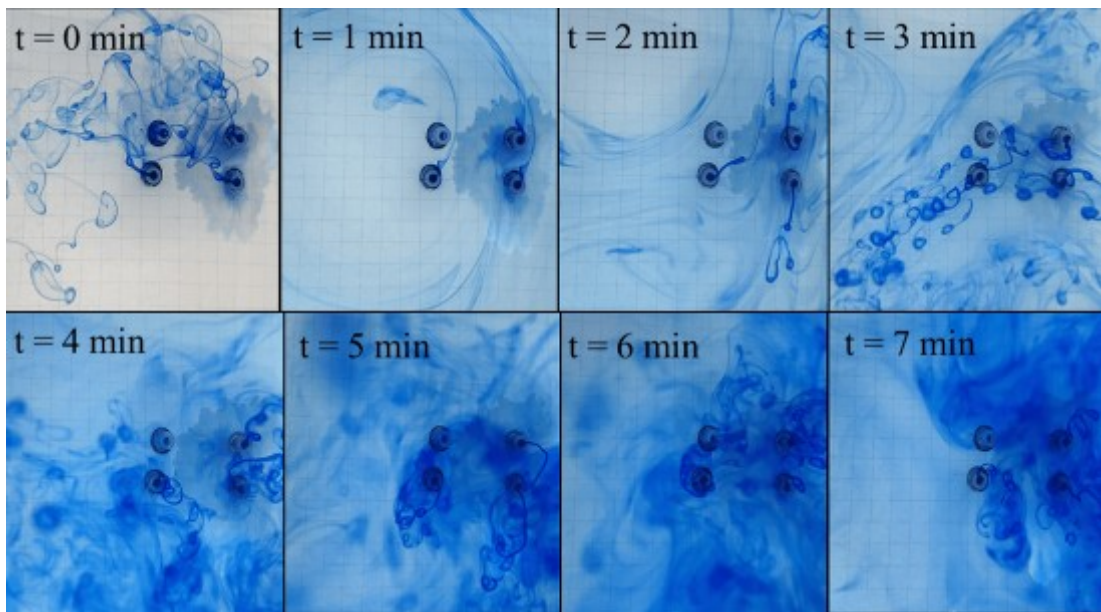


圖 25 多點同時進行的羽流受到外力的作用，陸續產生在北極現場所觀察到的流線。
(作者拍攝)

分析圖 25 可發現：

$t=1\text{ min}$ 時，羽流的流線隨著轉盤的旋轉形成圓弧形。

$t=2\text{ min}$ 時，羽流的蘑菇結構持續生成，受到外力的影響，逐漸產生多樣的線條。

$t=3\text{ min}$ 時，羽流產生的蘑菇結構陸續被外力破壞，惟一旦形成便會繼續演變，產生更多的小蘑菇。

$t=4\text{ min}$ 之後，羽流持續進行，所產生的蘑菇狀結構隨著移動、旋轉的流體漸漸演化成了圖片中的流線，並且與地調現場拍攝的流線十分接近。

(二)側面拍攝的影像分析：

依據側面拍攝的影像可獲得羽流演變的過程，如圖 26 及圖 27：

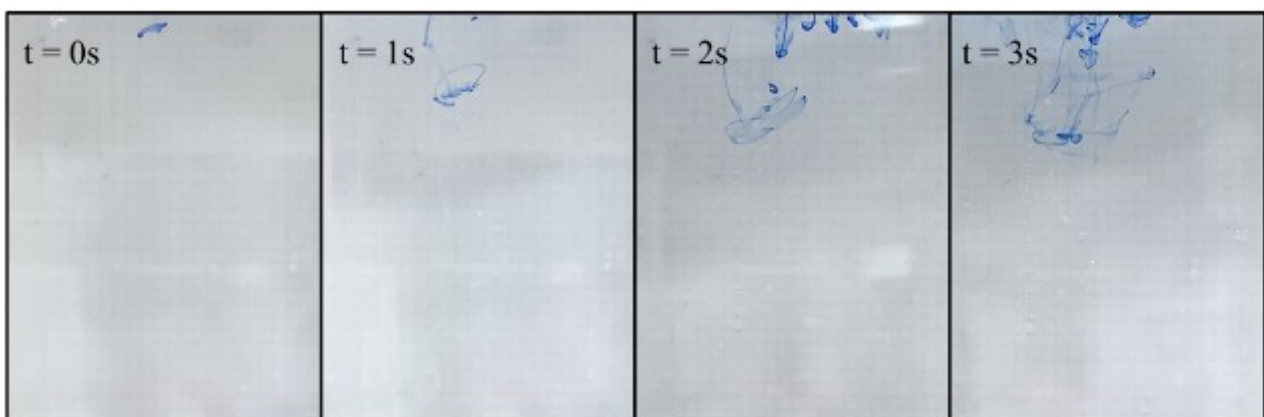


圖 26 4 psu 鹽水對流受到外力作用的影響而產生變化， $t=2\text{ s}$ 之後，蘑菇開始有分裂現象。(作者拍攝)

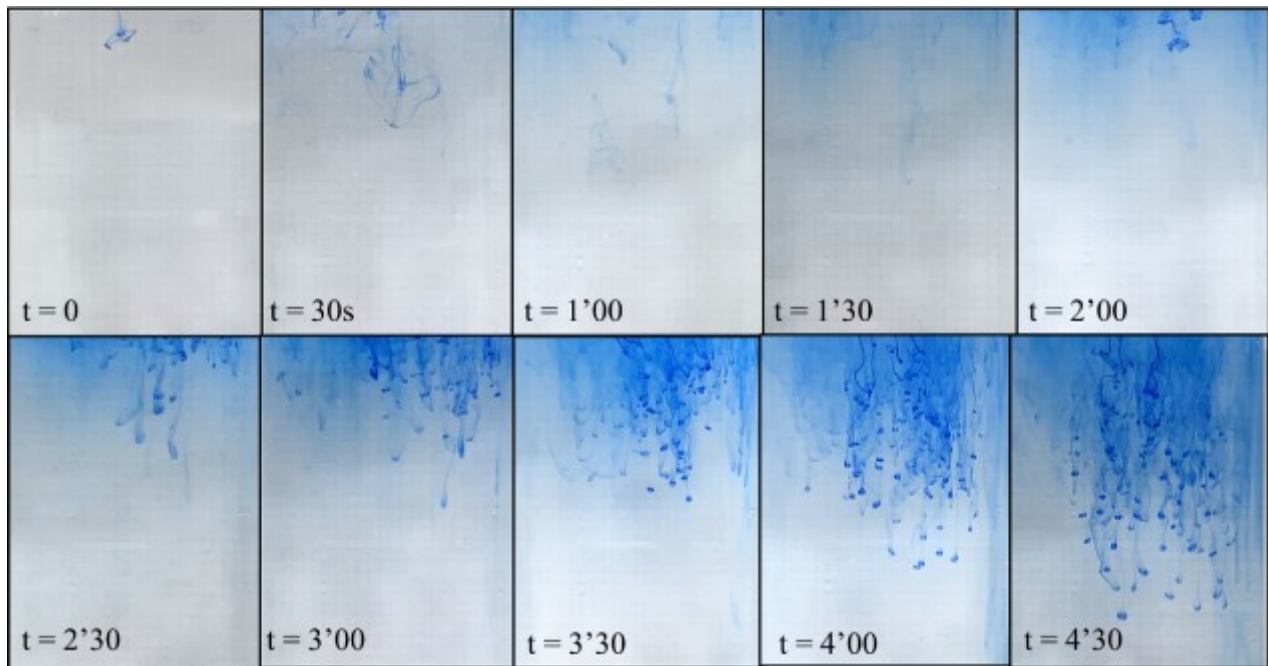


圖 27 4 psu 鹽水對流過程受到外力作用的型態變化。由每隔 30 秒的截圖影像可發現，當時時間超過 3 分鐘時，蘑菇狀結構即遭到破壞，但繼續演化後形成了斷斷續續的蘑菇結構。(作者拍攝)

(三)側面(正視圖)與底部(仰視圖)影像之比較：

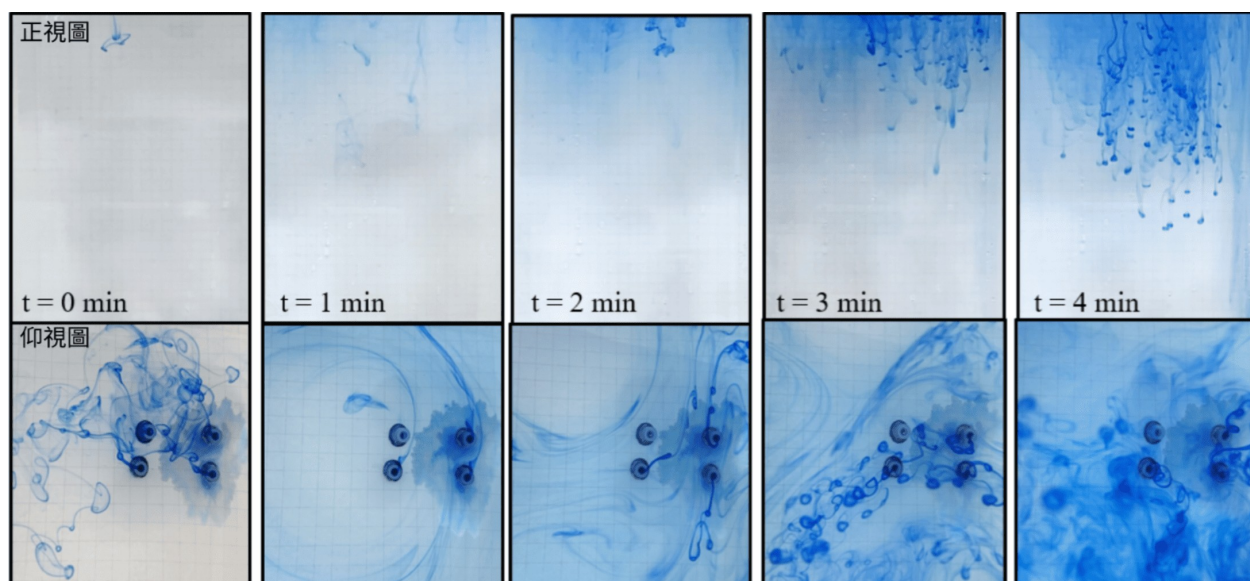


圖 28 羽流正視圖及仰視圖(作者拍攝)

分析實驗影像可發現： $t=0 \text{ min}$ 時，四個點的對流開始，經由底部仰視觀察混亂無章，但從側面觀察仍是蘑菇結構。

$t=1 \text{ min}$ 時，四個點的對流受到外力作用，底部呈現的流線較為清晰，而從側面正視觀察羽流在旋轉作用之下，水平擴散較為劇烈，蘑菇狀結構不明顯。

$t=2 \text{ min}$ 時，四個點的對流過程逐漸產生蘑菇狀結構，經由底部可觀察到較為清晰的流線，上部呈現斷斷續續的蘑菇狀結構，而從側面觀察雖然水平擴散劇烈，但仍可出現蘑菇狀結構且較 $t=1 \text{ min}$ 時清晰。

$t=3 \text{ min}$ 時，從底部仰視可看到四組蘑菇結構被旋轉的動力破壞，同時產生特殊的流線，而從側邊來看，在水平擴散與垂直擴散的同時，形成許多分散的蘑菇結構。

在 $t=4 \text{ min}$ 時，底部仰視觀察到較複雜的流線即為側面正視看到受外力破壞而分散出來的數個獨立蘑菇結構之投影。

伍、討論

一、可能造成北極地區河口水面產生特殊流線的原因

由於在自然環境下，河道的地形、背景流、水溫、泥砂顆粒大小及數量多寡等因素皆可能造成河水面生成特殊的流線。我們推測其形成的可能因素並分析說明如下：

(一)卡門渦街現象：當流體在運動過程中，遇到障礙物將在兩側形成漩渦。

我們認為有可能是因為河道的流水與水底的礫石接觸，在水平運動時也同時進行垂直運動，進而產生河水面的特殊流線。然而，透過實際實驗(圖 29)，我們發現當流體流經障礙物後，產生不穩定的邊界層分離，形成兩列交錯排列的渦旋(圖 30)，其流線與實地觀察到的並不相似。



圖 29 卡門渦街實驗裝置(作者拍攝)

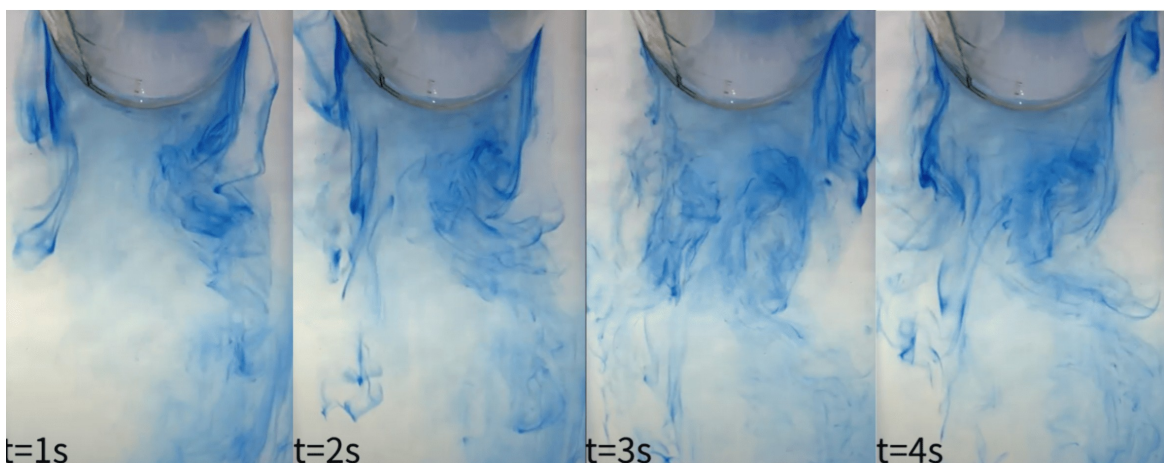


圖 30 流體流經障礙物時的卡門渦街現象。觀察 $t=1\text{ s}$ 到 $t=4\text{ s}$ 時的流線可以發現不穩定的邊界層分離，形成兩列交錯排列的渦旋。(作者拍攝)

(二)河水溫度差異：

考慮到此現象可能為溫度差所導致，因此我們設計溫度差的對流實驗，考量當時河水溫度約為攝氏 2.5 度(圖 31)，因此使用攝氏 6 度和攝氏 4 度的水進行實驗，觀察溫度差異造成的水體對流現象。實驗結果發現： $t=20\text{ s}$ 時，單組流線水平擴散，垂直運動不明顯，流線前端有類似蘑菇狀的結構，且相較於密度差，溫度差形成的蘑菇頭比較小， $t=40\text{ s}$ 時，流線由單點向外分散，雖然垂直對流增加，但增加數量有限， $t=50\text{ s}$ 時，水平擴散多導致流線分布範圍擴大，流線的分布情形與現地觀察到的現象不符。

綜合上述可知，相較於密度差對流，溫度差對流較多水平擴散，垂直擴散較少，且流速緩慢，此與現地觀察到的現象差異頗大，因此我們認為河水面生成特殊的流線不是溫度差所造成的。



圖 31 採樣點當時溫度約攝氏 2.5 度(作者拍攝)

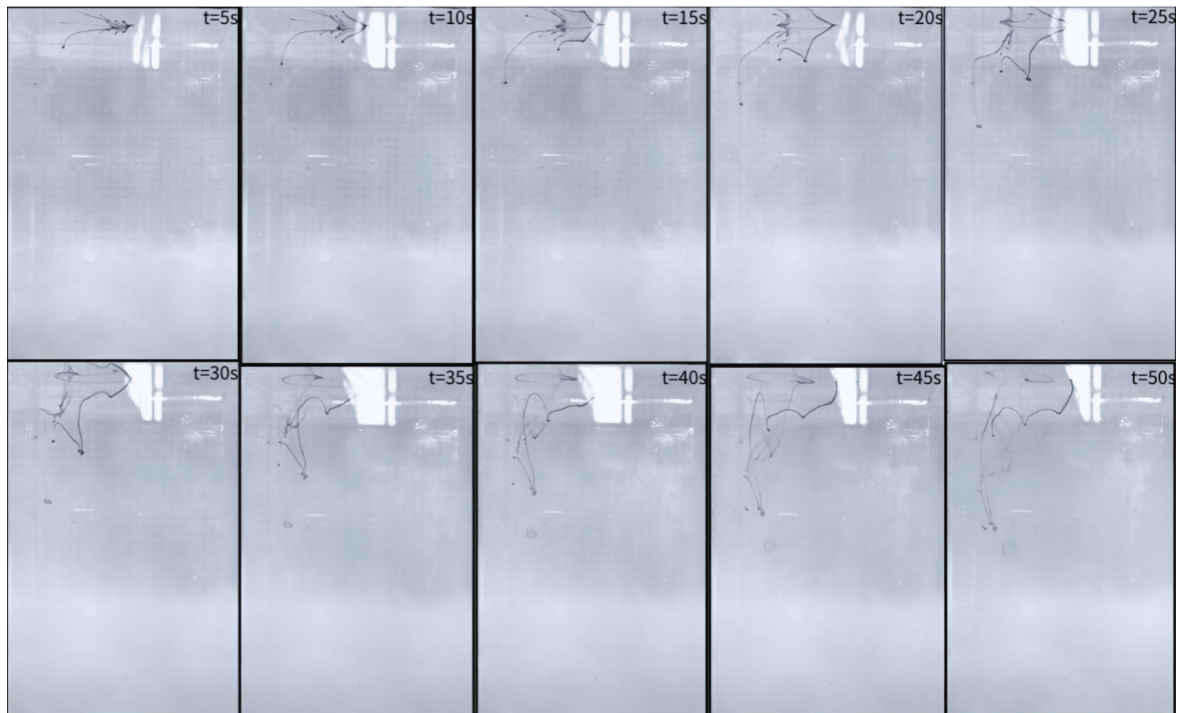


圖 32 溫度差異導致的羽流 (作者拍攝)

(三)流水衝擊河道底泥使其揚升：

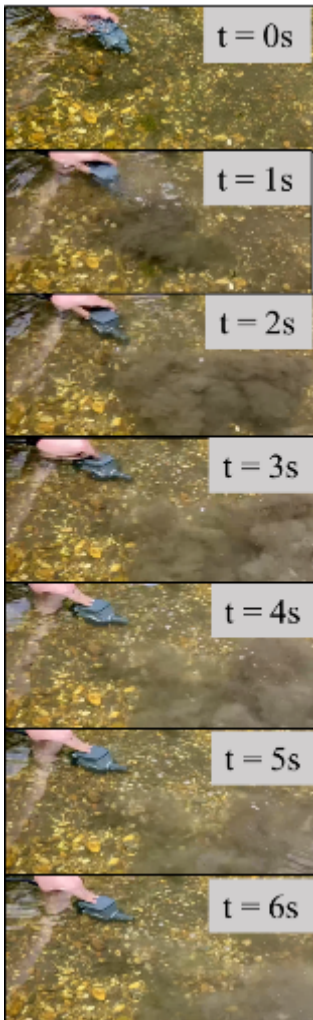
考慮到河水流速如果較快，將衝擊河道底部使底泥揚起，因此使用沉水馬達(圖 33)噴水衝擊生態池(圖 34)底部，使泥揚起，模擬流水衝擊河道的過程，並觀察其表面流線構造，如圖 35。我們將實驗結果與北極河口拍攝的影片比對後發現，揚起的泥須經一段時間沉降後才能再次抬升，此與現地觀察到的現象不符。



圖 33 沉水馬達(作者拍攝)



圖 34 人工生態池(作者拍攝)



t = 0 s 時，泥沉澱在底部

t = 1 s 時，泥開始被沉水馬達的水柱沖起，產生了揚起的現象

t = 2 s 時，更多的底泥被馬達沖起

t = 3 s 時，底泥同樣的被馬達沖起，但是可以從圖片發現，底泥已經開始隨著水流移動

t = 4 s 時，揚起的底泥漸漸變少，原本揚起的底泥在緩慢沉澱的同時，也隨著水流向右移動。

t = 5 s 時，揚起的底泥逐漸擴散，並隨著水流離開了觀察區，同時，部分底泥重新沉澱到了底部。

t = 6 s 時，揚起的底泥基本擴散完畢，水又恢復了實驗前的清澈。

在 t = 6 s 之後便不再有底泥揚起，由於北極現地所觀察到的河水表面特殊流線持續生成，並非間歇性，因此可以排除此一因素。

由於冰川融水隨著河流向下流，會衝擊部分底部。然而在實驗後，我們發現這一推想與現實觀察到的情況不合，因此我們推測出了其他的原因。

圖 35 流水衝擊河道
(作者拍攝)

(四)各種可能成因與實際流線比較：



圖 36 實地觀察的流線和衝擊底部造成的泥砂流線之比較(作者拍攝)

經由圖 36 可以發現，兩者的型態非常不同，左側(自然觀察)的流線比較有規律，而右側(實驗圖片)的比較沒有規律，而且非常具有層次感，但僅為"

沖起"底泥，但沒有湧起來的現象，且不具重複性。

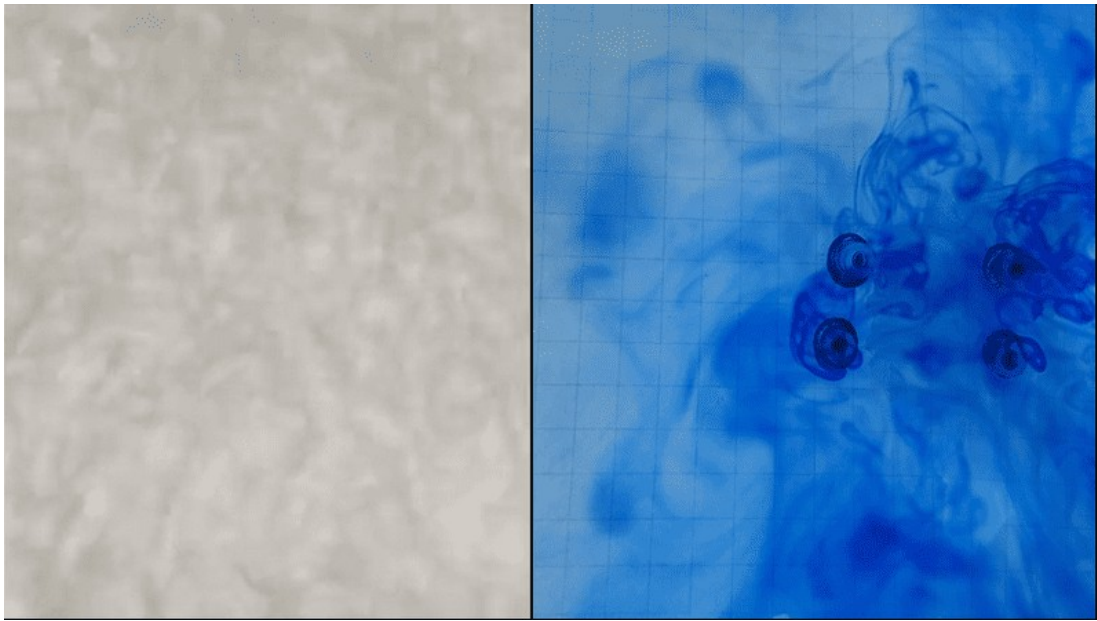


圖 37 實地觀察的流線和實驗五的結果之比較(作者拍攝)

經由圖 37 可以發現，北極河口現地觀察與實驗五的結果比較，兩者的流線十分相似，並且皆有上湧的現象。

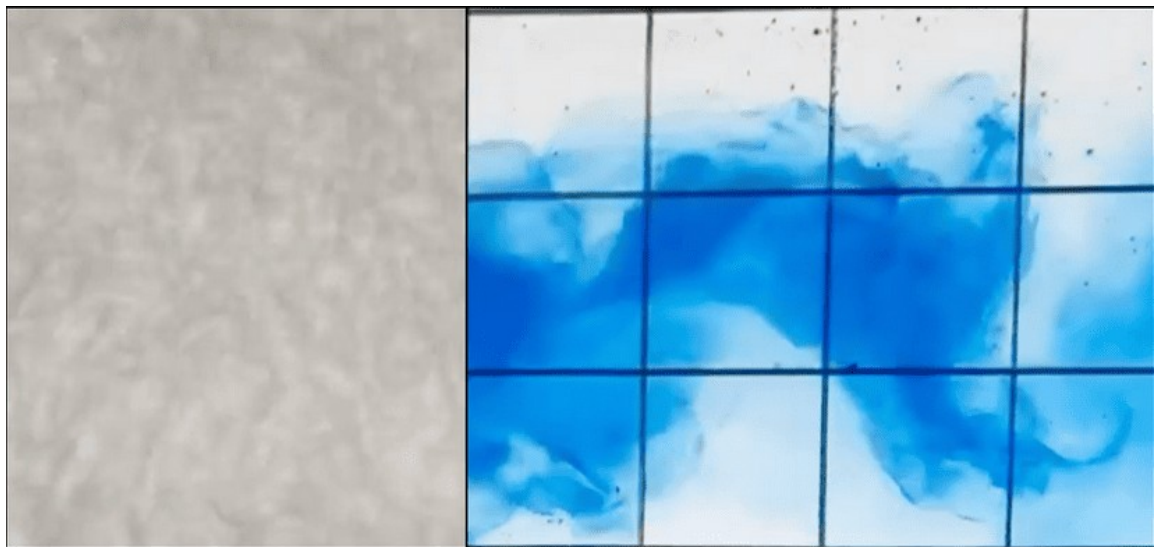


圖 38 實地觀察的流線和卡門渦街實驗結果之比較(作者拍攝)

經由圖 38 可以發現，實地觀察的流線與卡門渦街並不相同，卡門渦街在遇到障礙物後形成對稱漩渦，此與北極河口現地觀察到的現象不符。

二、本研究採集水樣所含泥砂之粒徑分析

經過實際採樣，我們將河水中的泥砂請專家協助進行粒徑分析，並進一步做實驗。



圖 39 本研究採集的河水樣本(作者拍攝)

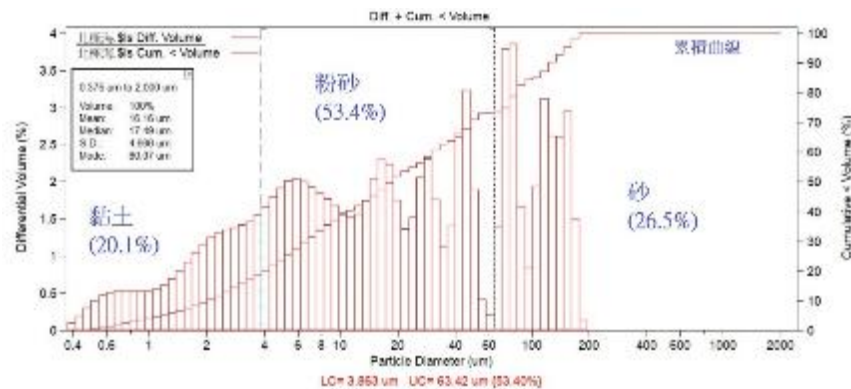


圖 40 水樣所含泥砂之粒徑分析(作者繪製)

北極海.51s	
Particle Diameter μm	Volume % <
3.9	20.3
7.8	34.5
15.6	47.2
31.3	61.6
62.5	73.5
125	90.9
250	100
500	100
1,000	100

圖 41 水樣中泥砂粒徑分布(作者繪製)

經由圖 40 及圖 41 水樣中泥砂粒徑分析與分布圖可以發現：

1. 黏土佔 20.1%，粒徑介於 $0.4\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$
2. 粉砂佔 53.4%，粒徑介於 $4\ \mu\text{m} \sim 60\ \mu\text{m}$
3. 砂佔 26.5%，粒徑介於 $60\ \mu\text{m} \sim 200\ \mu\text{m}$

分布最多的粉砂粒徑與蘭陽溪下游採集的泥砂為相同範圍的粒徑。因此我們使用在蘭陽溪下游所採的砂粒進行泥砂揚起的實驗。由於這些泥砂粒徑很小，非常容易被流水攜帶。而我們透過實驗一的河海交界泥砂羽流的實驗證實，這種粒徑的泥砂可以被流水帶動，因此也能確認羽流可以造成在極地所觀察到的流線。

三、鹽度與羽流加速度的關係

我們將不同鹽度的對流影片進行分析並利用 Tracker 計算出其加速度，加速度的計算只考慮垂直變化量，而並非合力加速度。

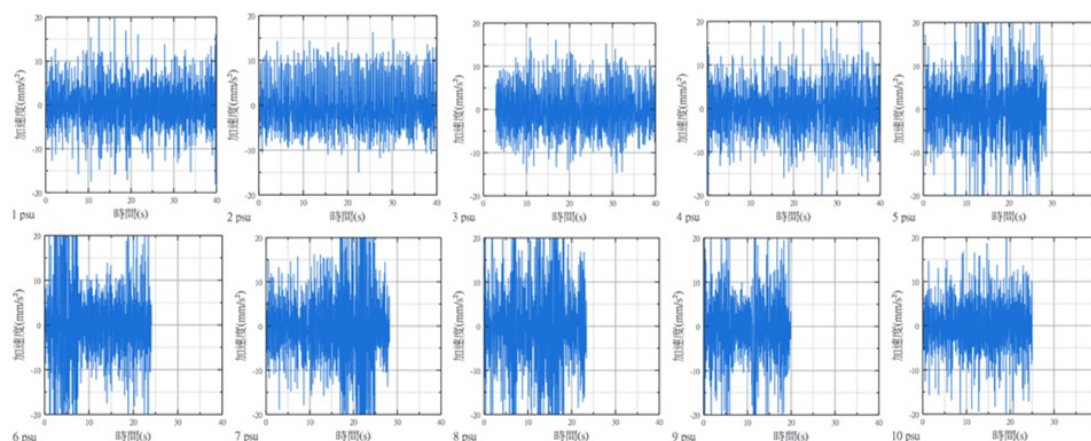


圖 42 鹽度與對流加速度的關係(作者繪製)

觀察圖 42 不同鹽度之對流加速度可發現，各鹽度的加速度趨勢不是持續增加，也不為零，這說明此對流並不是等加速度運動，也不是等速度運動。鹽度為 1~4 psu 時，加速度多介於 $\pm 20 \text{ mm/s}^2$ ，而 5~10 psu 時加速度多超過 $\pm 20 \text{ mm/s}^2$ 。

同時由於對流並非直線運動，而我們追蹤的僅為對流頂部的 y 軸(垂直)運動，如果有水平運動，那麼將不會列入加速度的計算。

四、形成特殊流線、羽流結構的原因及機制

我們藉由實驗中的流線視覺化、蘑菇狀的結構、鹽度與流速之關係、以及比較向上與向下對流觀察之差異等四方面來探討羽流的現象。

(一)河道水面的特殊流線：

根據實驗四的實驗結果，在 $t = 4 \text{ s}$ 、 $t = 13 \text{ s}$ 、 $t = 20 \text{ s}$ 、 $t = 29 \text{ s}$ 及 $t = 33 \text{ s}$ 時有揚起的現象，在進一步的實驗後，羽流在移動中所呈現的特殊流線與在北極地區實地觀察到的流線極為相似。

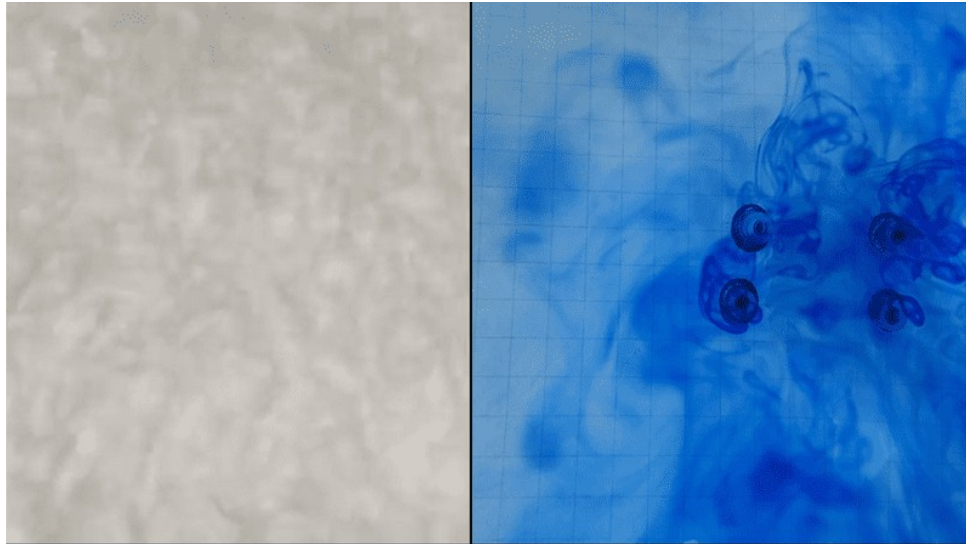


圖 43 實地觀察的與羽流移動中的實驗結果比較(作者拍攝)

(二) 蘑菇狀結構：

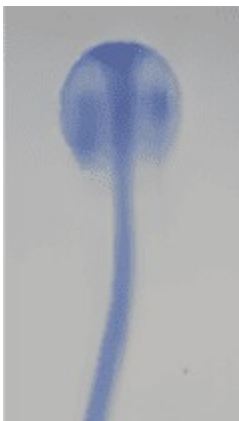


圖 44 鹽度 3 psu

(作者拍攝)

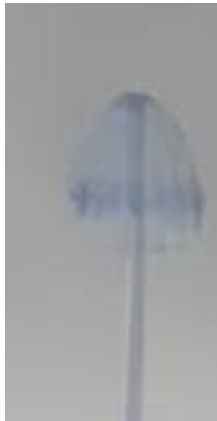


圖 45 鹽度 4 psu

(作者拍攝)

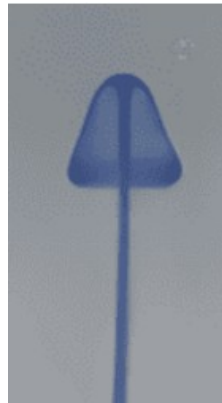


圖 46 鹽度 10 psu

(作者拍攝)

不同鹽度鹽水交匯時，流線中心的流速最快，邊緣則會受到擴散及其他因素的影響流速較慢，進而形成蘑菇狀的結構。觀察不同鹽度流線頂端產生的蘑菇狀結構，並將其進行比對。鹽度為 1~3 psu 時，因密度差較小，流速較慢，導致蘑菇狀頂部較圓，垂直擴散較少。反之，鹽度為 4~10 psu 時，因密度差較大，流速快，使蘑菇狀頂部較尖，垂直擴散也較多。

五、實驗設計原理及考慮因素

在本研究的實驗設計中，我們考慮了當地的地理位置、地形因素、海水與河水鹽度、觀察的潮汐現象。

(一) 地理位置及地形



圖 47 採樣點周圍環境 (作者友人拍攝)



圖 48 採樣點一帶之地形圖(擷取自網路)



圖 49 地調現場實景 (作者拍攝)

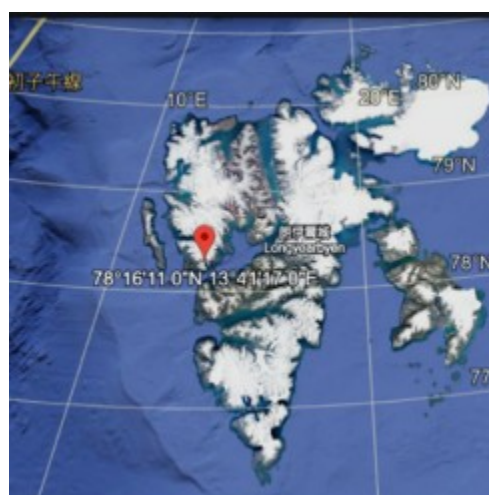


圖 50 樣本採樣點於挪威 Isfjorden 海灣

$78^{\circ}16'11.0''\text{N}, 13^{\circ}41'17.0''\text{E}$

(紅色地標處；地圖擷取自 Google Earth)

(二) 當地海水鹽度：

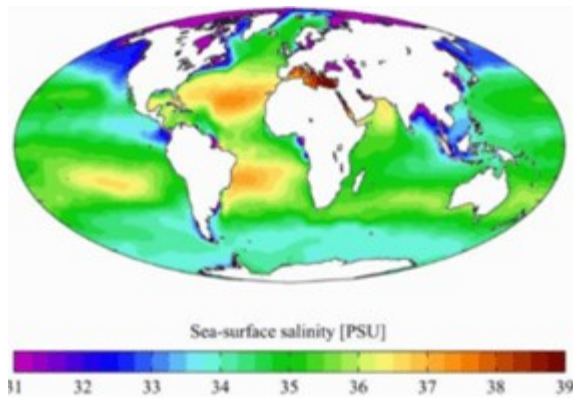


圖 51 全球海水平均鹽度(擷取自網路)

圖 51 為目前全球海洋鹽度的分布情形,平均鹽度為 35 psu，但北極地區夏季的海水因為海冰融化，全球海水的平均鹽度低,北極海平均鹽度 30 psu。本研究河水採樣地點靠近上游是冰川的河流下游，混合後的河水鹽度經實際量測後是 3 psu，中游河水鹽度為 0 psu。據此推測湧入河道的稀釋海水約為 4 psu，因此本研究使用食鹽(NaCl)調製鹽水模擬 4 psu 的海水。

(三)觀察現象的時間：

我們拍攝河水面特殊流線的時間是 13:43。考慮潮汐週期,經過推算當時的潮位約為 0.43 m 且為漲潮時段，海水正湧入河道內。

根據上述因素，由採樣地點的地形特徵顯示，位於兩條冰川交會後形成的河流與海洋交界處，並且靠近主要河道。冰川融水流入海洋，與較高鹽度的海水相遇，形成鹽度梯度驅動的密度對流現象。

(四)觀察點的河水深度：

觀察點位於河海交界處，河道的坡度相對說較於平緩。而當時的水深大約到腳踝，深度不深，深度與實驗裝置的相近，大約 20 公分左右。

六、極地觀察到此現象的意義

隨著人類的工業汙染，全球的平均溫度漸漸上升，北極的冰川、海冰融化情形日益加劇，在夏季氣溫最高可以達到攝氏 38 度。這個現象使得北極海、極區的海水鹽度被稀釋。本研究觀察到的現象只存在於密度差異較低，對流速度較慢的情況。冰川及海冰融化導致的鹽度下降，恰好提供形成機制中的密度差低、流速慢的條件。

在極地觀察到此現象，代表著海冰融化導致的海水鹽度下降，已經使得海水與河水之間的密度差降低，對流速度減慢，進而促成我們觀察到的特殊流線與蘑菇狀結構的形成。這顯示全球暖化對北極海流體動力學產生了可見的影響，並可能進一步影響極區的海洋循環、營養鹽輸運及生態系統的穩定性。

陸、結論

一、造成河道水面特殊流線的原因

密度差引發的羽流為造成河道水面特殊流線的主要成因，經過實驗比較分析，運動中的羽流形成的流線與實地觀察實況相同。同時，造成此流線的原因並非快速的水流攜帶河床底泥形成的泥流及河水流經河床上的阻流體所產生的卡門渦街效應。

北極海河口自然湧升現象主要是由於河水與海水密度不同產生的壓力差所造成。當密度較低的河水與密度較高的海水接觸時，海水因重力作用向下擴散而河水則向上移動，形成自然對流。在特定條件下，河水與海水交互作用，界面產生瑞利泰勒不穩定性。此外，潮汐推動與地形影響可能進一步增強此現象。北極地區冰川融水降低海水鹽度，使密度梯度改變，更容易促成底泥湧起的現象與具有蘑菇狀構造的羽流形成。

二、羽流蘑菇狀結構的成因及影響因素

- (一)蘑菇狀結構的成因：當密度不同的流體交匯並進行對流時，因流線頂端流速較快，邊緣則會受到擴散等因素影響，流速較慢，進而形成蘑菇狀。
- (二)蘑菇狀外形結構：水與鹽水密度差較小時，流體較容易水平擴散，形成圓圓的蘑菇狀結構；水與鹽水密度差較大時，流體上升速度較快，蘑菇結構較為細長。
- (三)流體運動速率：流速影響蘑菇狀結構的穩定性與形態。較快的流速可能產生不穩定渦旋，而較慢的流速則有助於形成對稱、穩定的蘑菇狀結構。

柒、參考文獻資料

陳柏言、陳亮萱、李祥(2007) 液體交流道

李佩庭、陳又瑄(2009) 滾滾濁水入海流－河川入海濁流之實驗模擬

歐柏昇、李佩庭(2008) 海洋密度流之探討

許峰翌、林軒毅(2022) 「鹽」上雙擴散－雙擴散對流及鹽手指現象

Piriz, A. & Cortázar, Osvaldo & López cela, Juan José & Tahir, Naem. (2006). The Rayleigh Taylor instability. American Journal of Physics. 74. 1095-1098. 10.1119/1.2358158.

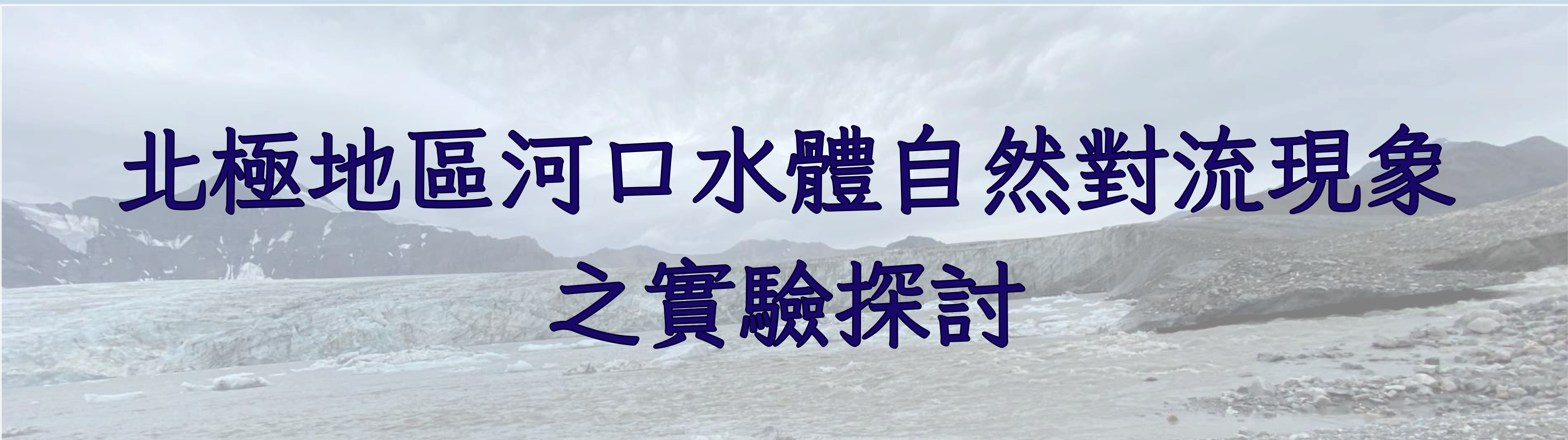
Rogers, Michael & Morris, Stephen. (2009). Natural versus forced convection in laminar starting plumes. Phys Fluids. 21. 10.1063/1.3207837.

【評語】 030505

由於氣候暖化與相關融冰現象，北極河海交會處有海水鹽度差異小與沉積物細的特徵。而本研究的成員因緣際會，有機會到北極野外調查，看到了極為罕見的對流現象。也因此決定在室內進行模擬，探究北極之野外觀察結果(河海交會處之對流現象)與其機制。團隊對不同密度、不同溫度的流體進行染色。可以視覺化的對流現象，讓該團隊進一步的討論相關對流行為，並且說明羽流現象只有在北極這樣特殊的環境下才能觀察。此研究主題清楚且聚焦，而且相關成果具原創性。不僅如此，在呈現海報時，該團隊成員皆能瞭解結論與相關實驗的限制，也能有系統地回答評審各種問題。因此，有趣的研究議題，適切的科學手法，以及詳實的討論，讓該作品成為本次推薦之第一名。

作品海報

北極地區河口水體自然對流現象 之實驗探討



摘要

本研究旨在探討北極海河口河水之自然對流現象，並解析其特殊羽流形態與形成機制。透過調配不同鹽度的食鹽水模擬海水與河水進行實驗，採用壓克力水槽建置鹽水與淡水的對流環境，以模擬河海交界處河水與海水的交互作用情形。此外，利用注射筒與水槽模擬河水局部對流形成羽流(Plumes)之情形，並測定不同鹽度的羽流之流速。實驗結果顯示，當鹽水與水密度差較小時(鹽水鹽度小於20 psu)，對流速度較慢且較易形成穩定羽流；反之，鹽水與水密度差較大時，對流速度較快，容易產生不穩定羽流。

壹、前言

一、研究動機

本研究團隊成員於暑假時，在挪威 Isfjorden 海灣觀察到河海交界處的流體湧升現象。返臺後調查發現，此現象源於密度差異流體的交互作用，並可透過懸浮顆粒特徵觀察。我們設計實驗模擬與探討其形成機制及特性。隨著全球暖化加劇，極地環境快速變遷，此研究有助於解析海河垂直交換、熱對流與海氣交互作用。

二、研究目的

- (一)探討北極地區河口水體的自然對流現象以及其形成之物理過程
- (二)分析淡水與海水密度差形成之羽流的流速及其頭部形態之特徵

三、文獻回顧

- (一)密度流：海洋密度流受密度差異驅動，不同鹽度或溫度水層交互作用產生密度對流。研究顯示，鹽度梯度較大時，密度流速率增加，並可能形成渦旋或層流結構（李佩庭、歐柏昇2008），此與本研究中具蘑菇頭結構之羽流相似。
- (二)羽流：指流體垂直進入另一流體時所形成的流動結構，受動量、擴散與浮力影響。若流體密度較低且上升，則浮力為正；若密度較高但因動量驅動上升，則為負浮力。羽流常因邊界夾帶效應擴散，可能從浮力主導轉為動量主導，遠離源頭後常由層流過渡至湍流。（Wikipedia）
- (三)流速定義：本研究將流體流速定義為羽流頭部頂點的移動速度。

貳、研究設備及器材

食鹽、水、水性染料、電子秤、鹽度計、滴管、刮勺、塑膠注射筒、壓克力水槽、量筒、升降台(腳架)、滴定管、廣用夾、鐵架、智慧型手機、手機架、Tracker 軟體、LabPlot軟體、電動轉盤、沉水馬達。

參、研究過程

實驗一 漲潮時河床底泥的運動

泥砂厚度約0.2 cm
↓
調製鹽水
↓
架設實驗裝置
↓
開啟滴定管



圖1 實驗一裝置

實驗二 河水與海水的交互作用

調製鹽水並染色 → 放下閘門，加水至與鹽水同高 → 開啟閘門 → 全程錄影



圖2 開啟實驗水槽的活動閘門

實驗三 海水入侵河道之現象

調製鹽水並染色
↓
鹽水高度0.3cm
↓
開啟滴定管
↓
全程錄影

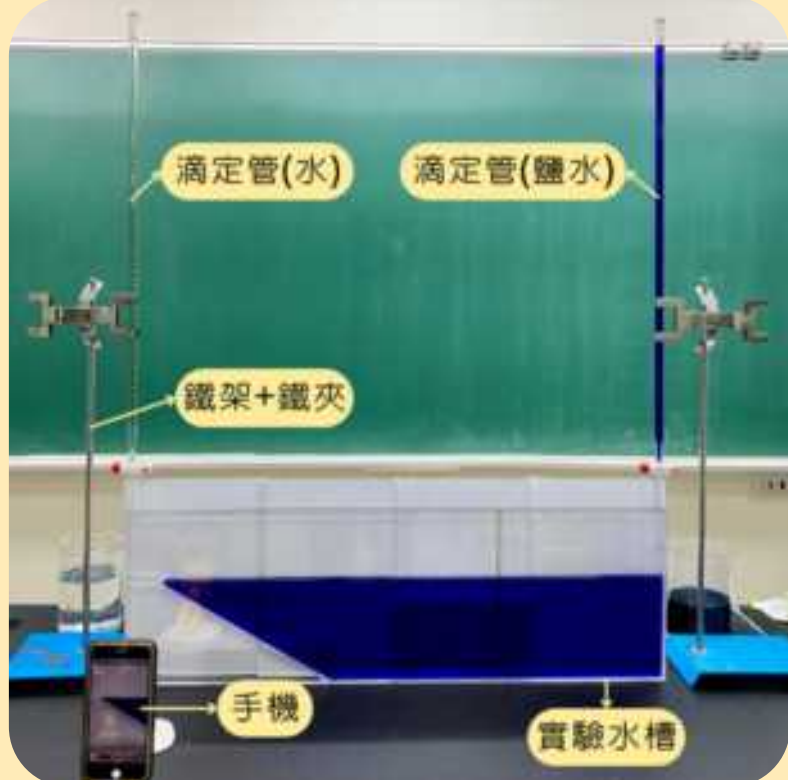


圖3 實驗三裝置

實驗四 河、海水對流形成羽流

調製鹽水並染色
↓
注射筒盛滿鹽水
↓
實驗水槽上移
↓
全程錄影



圖4 實驗四裝置

實驗五 多組羽流同時形成

調製鹽水並染色
↓
多支注射筒盛滿鹽水
↓
全程錄影



圖5 實驗五裝置

實驗六 外加動力的羽流型態

調製鹽水並染色
↓
開啟實驗轉盤
↓
全程錄影



圖6 實驗轉盤

肆、研究結果

實驗一 模擬漲潮時河口河床底泥的運動情形

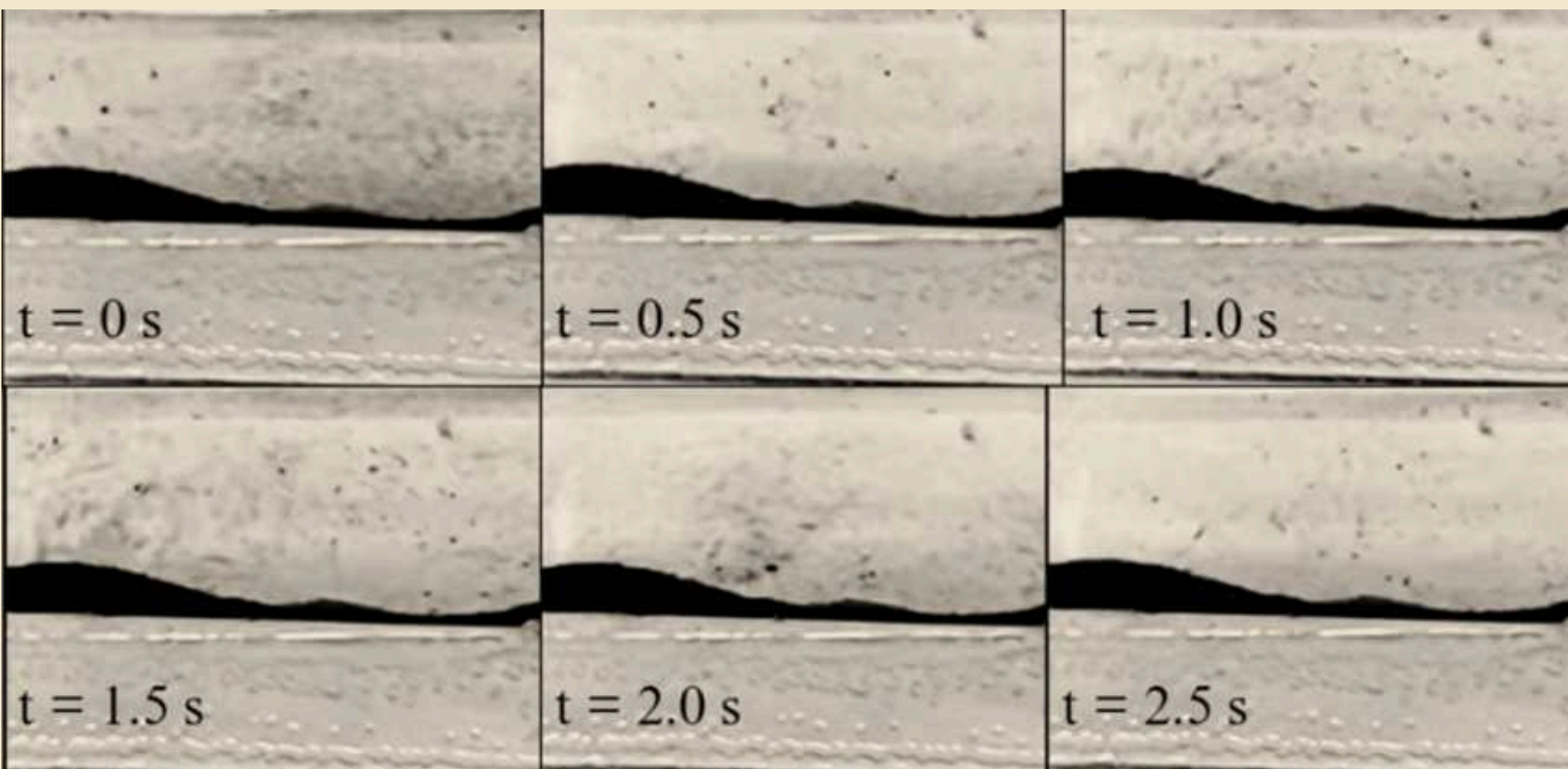


圖7 不同時刻底部泥砂向上運動之情形

底泥在河水與海水的交界處因羽流產生而湧起(圖7)

實驗二 模擬河水與海水的交互作用

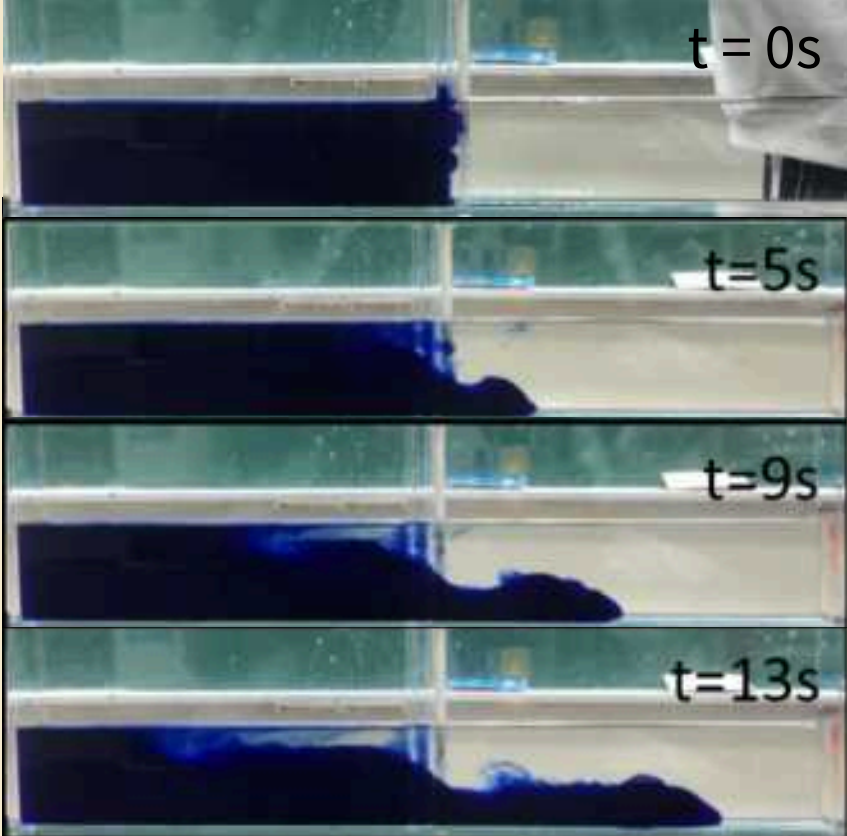


圖8 鹽度4 psu交會情形

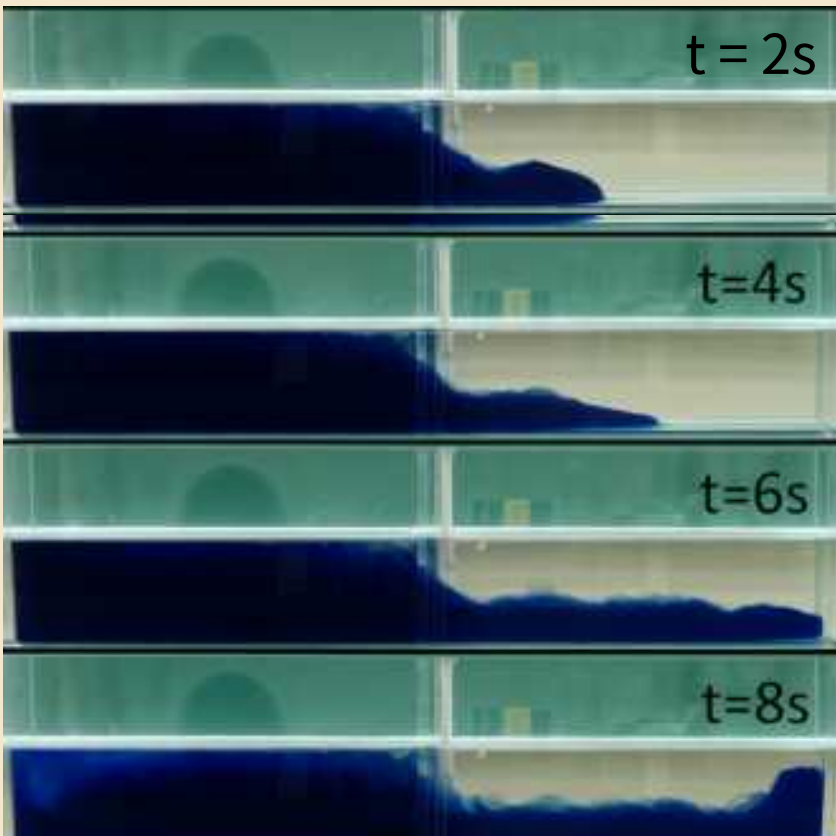


圖9 鹽度30 psu交會情形

水與鹽水交會時，形成明顯的頭部(圖8，圖9)，並產生捲揚現象(圖10，圖11)。




圖10 藍色鹽水與水對流時，交界處產生揚起的現象

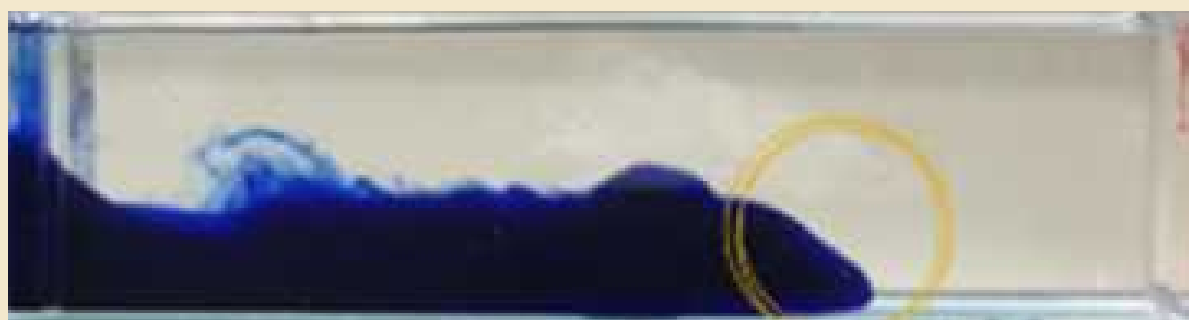


圖11 鹽水擴散時，前方的水體受壓，形成明顯的頭部

實驗三 模擬海水入侵河道之現象

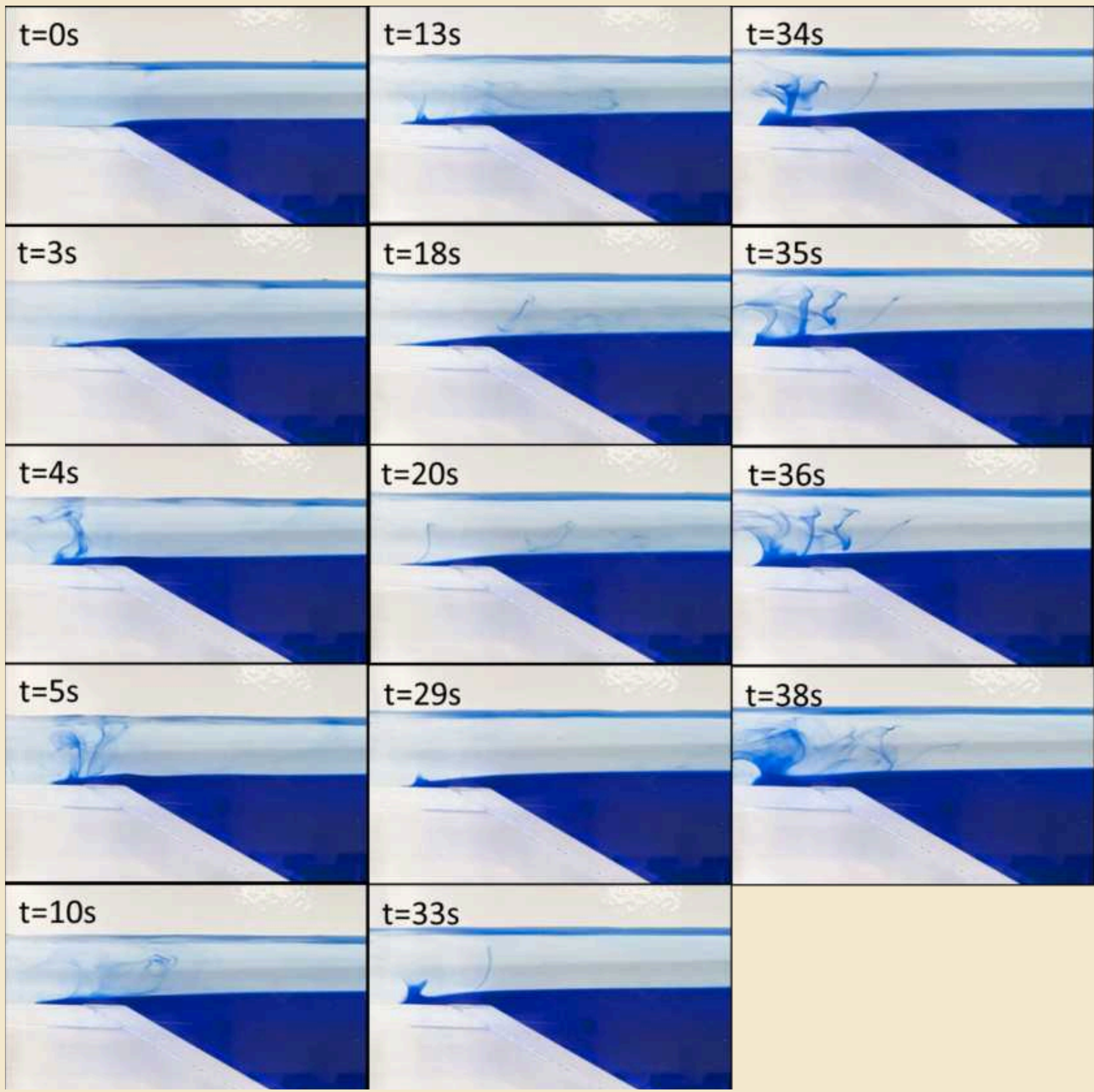


圖12 鹽度4 psu 鹽水與水交會情形(鹽水藍色，淡水無色透明)
鹽水與水交會之結果，說明海水進入河道與河水發生密度差對流，進而產生湧起現象(圖12)。

實驗四 模擬河水與海水自然對流形成羽流

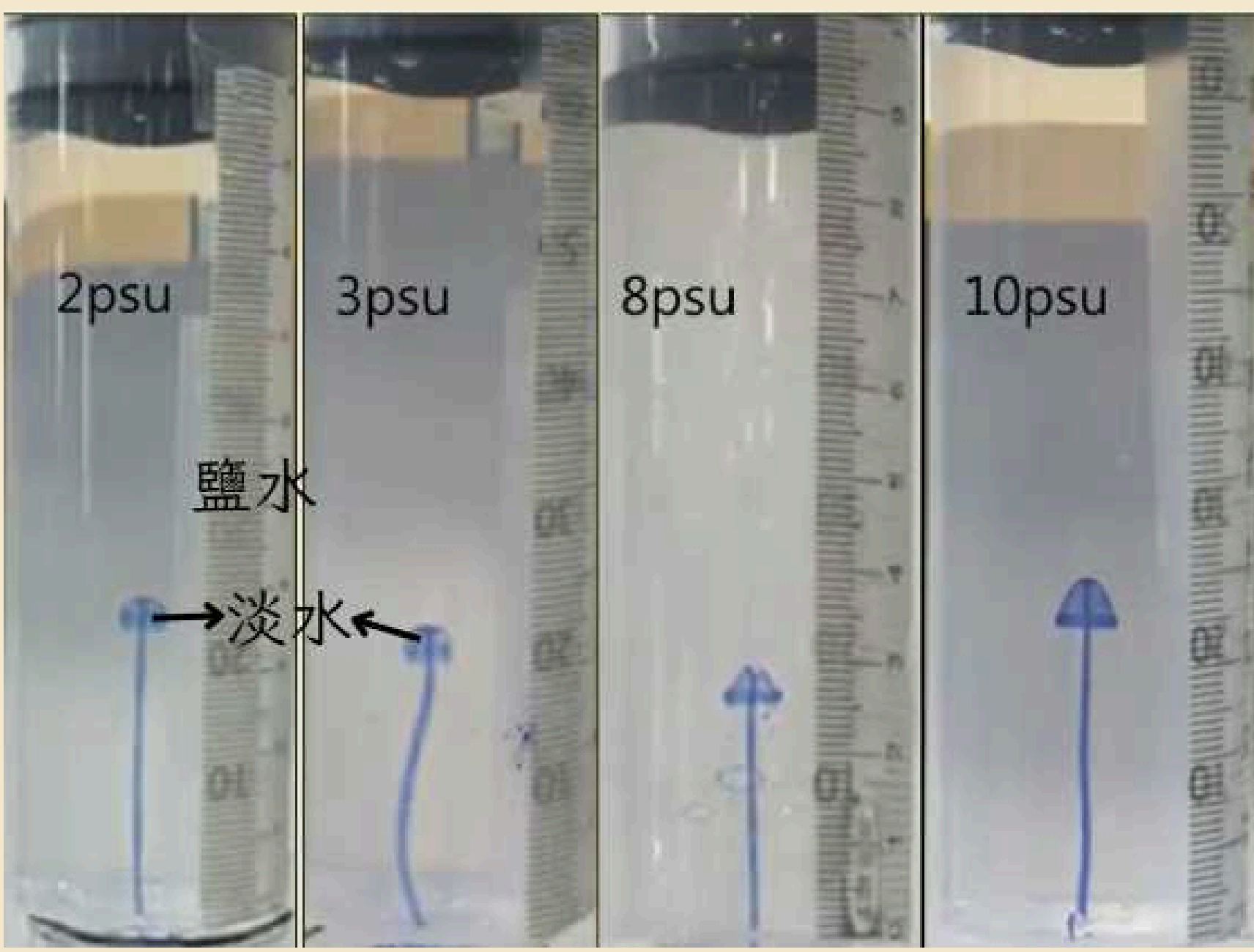


圖13 不同鹽度單組羽流

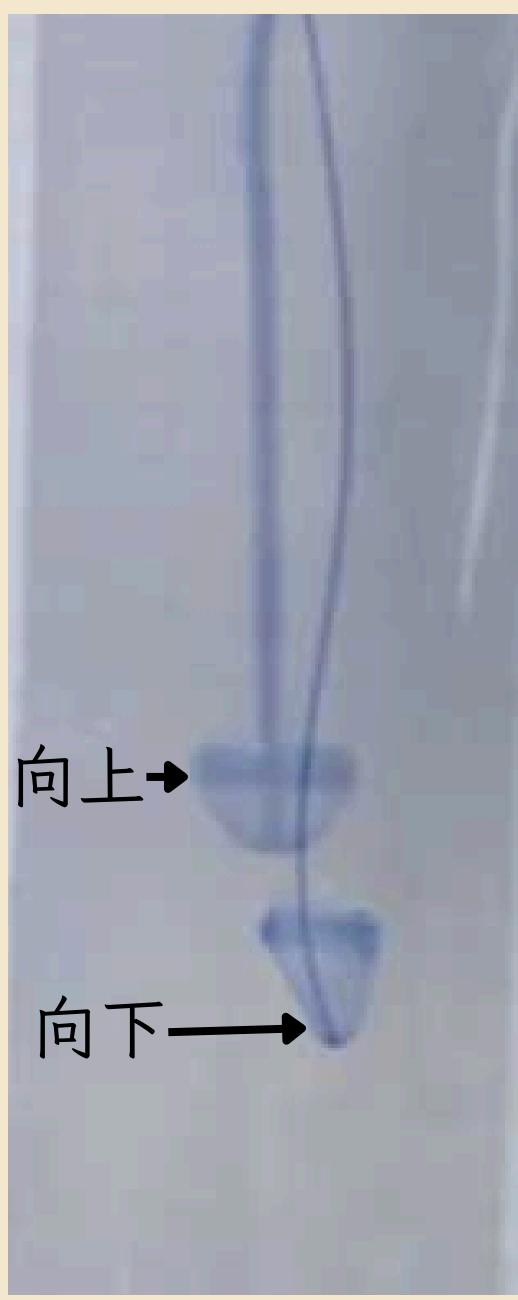


圖14 對流影像重疊

鹽度低(2~3 psu)的羽流因擴散作用顯著，頭部結構較為圓潤；而鹽度 4~10 psu的羽流頭部較為穩定而清楚，近似三角尖頂傘狀(圖13)。將向上、向下擴散的對流影像重疊，下沉羽流呈現細長、集中、流速較快；上升羽流則移動較慢、擴散且形狀圓潤(圖14)。

實驗五 模擬多組羽流之形成

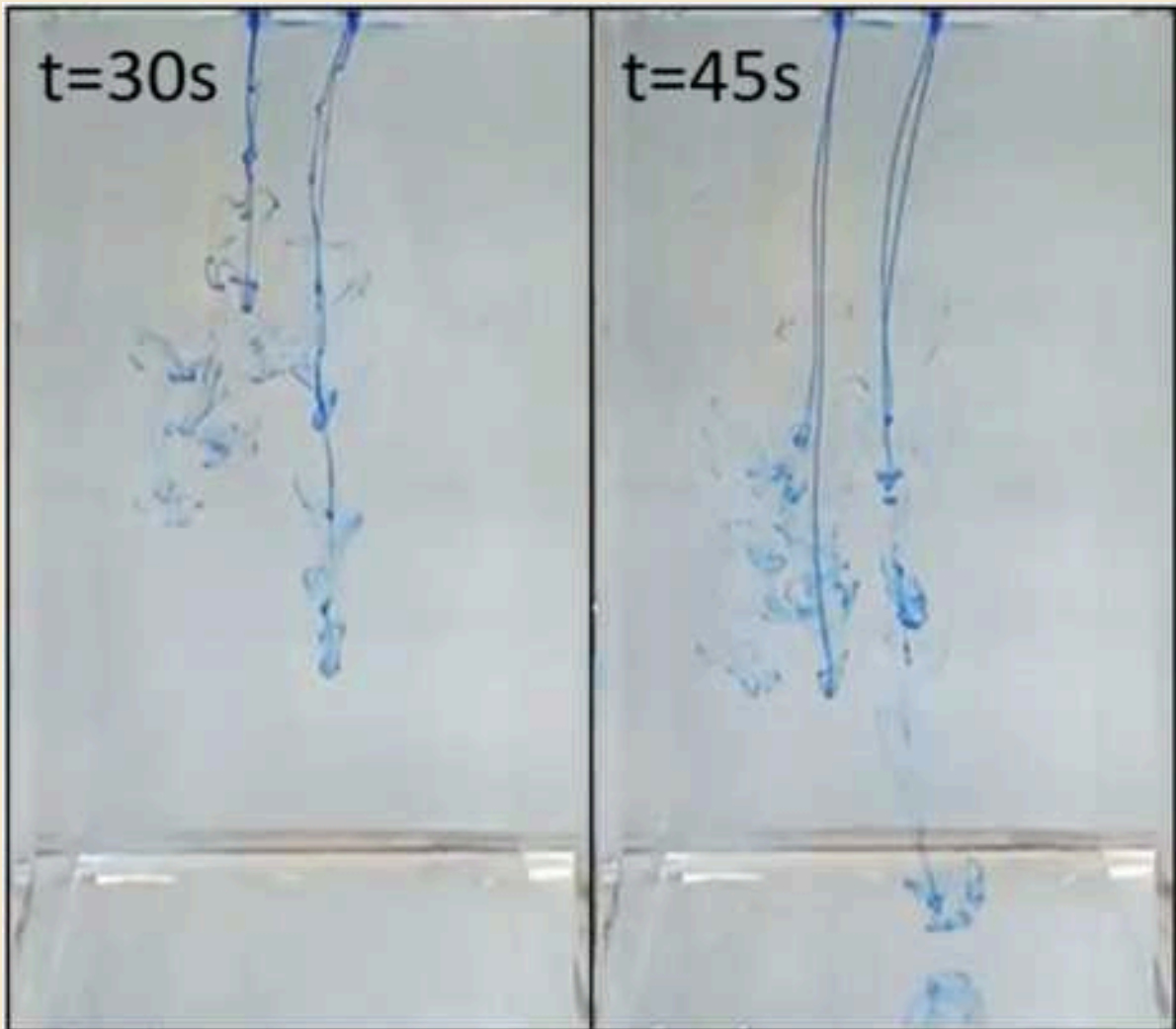


圖15 2x2陣列正視圖(藍色為鹽水)

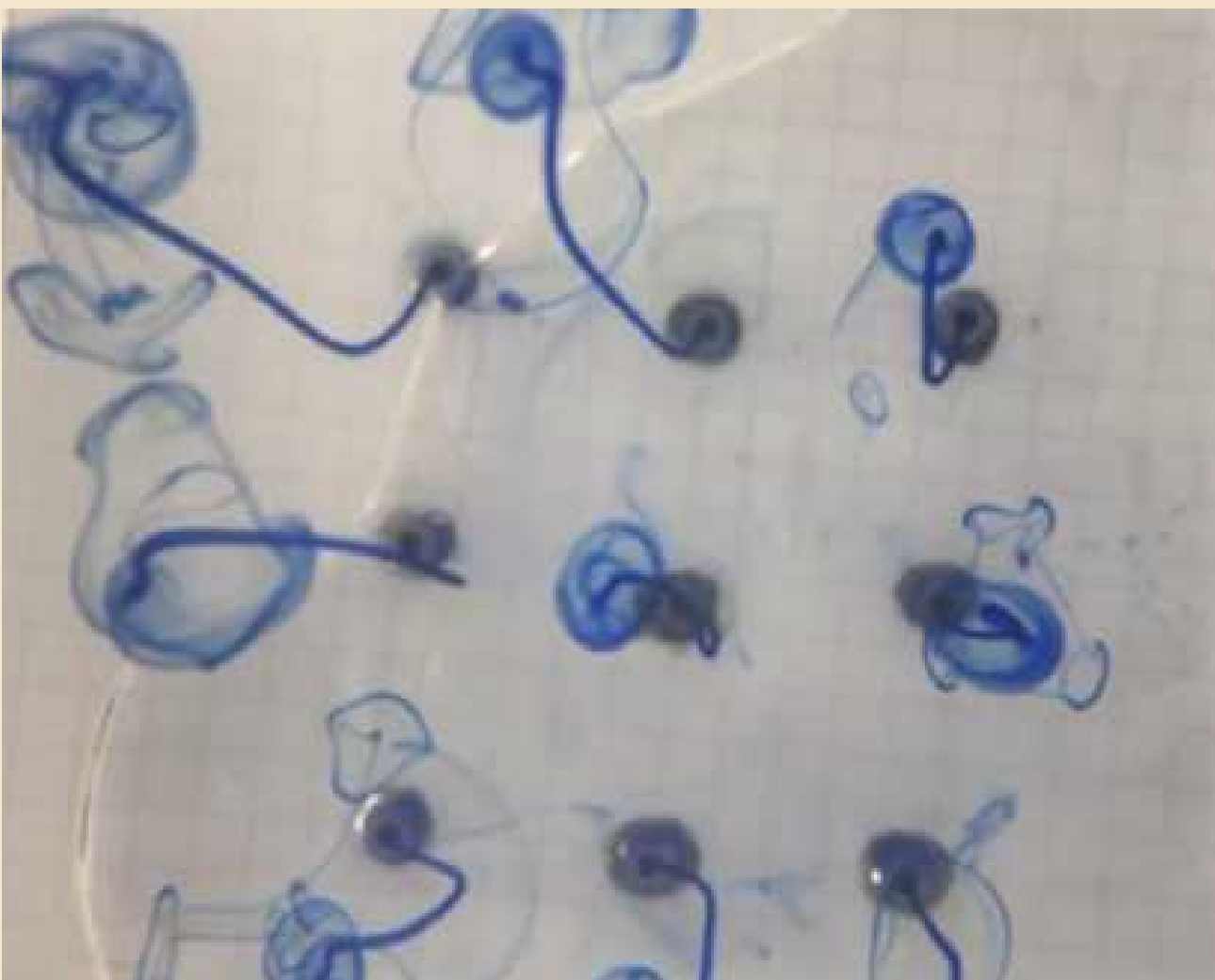


圖17 3x3陣列仰視圖(圓孔為鹽水出口)

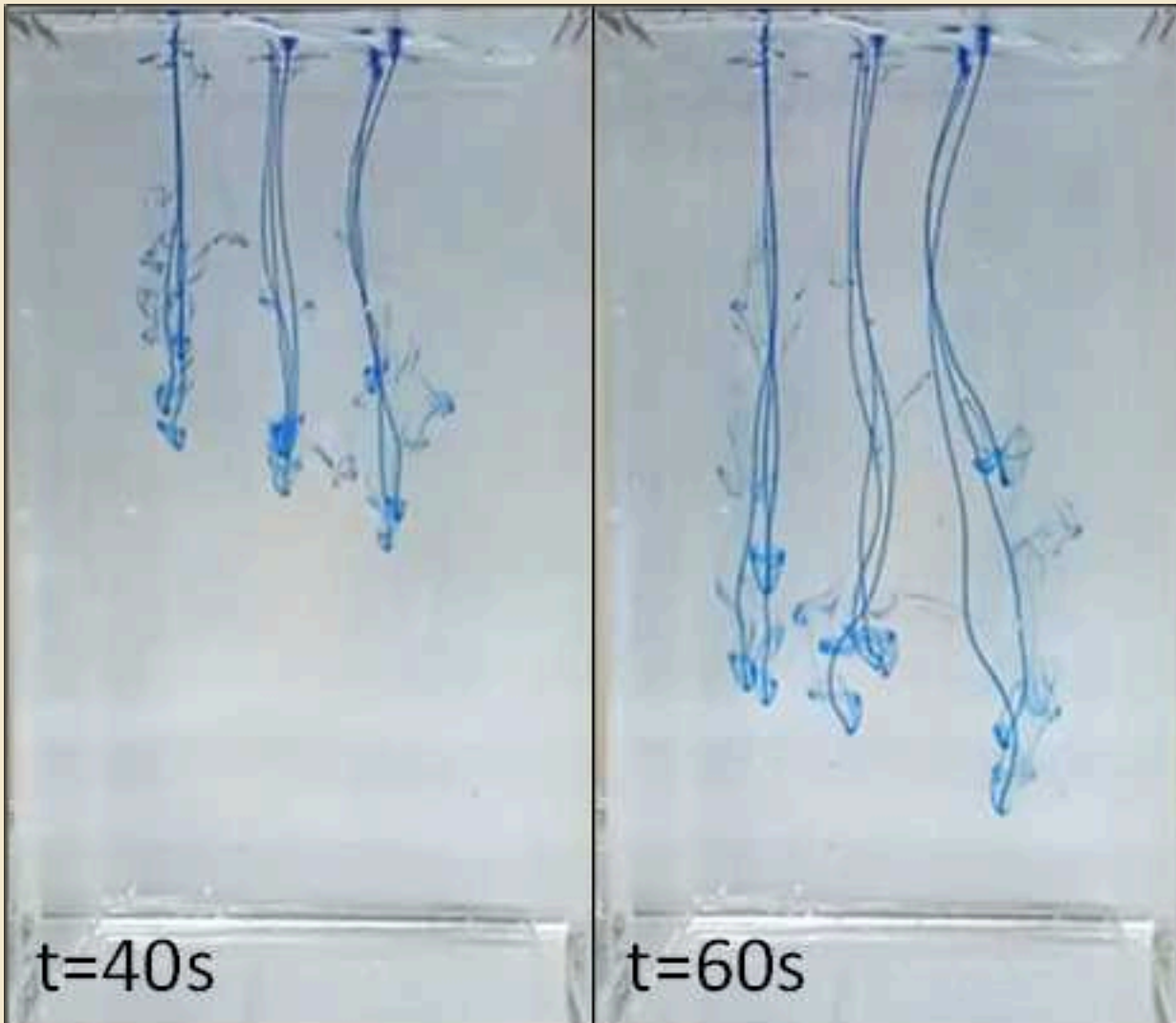


圖16 3x3陣列正視圖(藍色為鹽水)

多組羽流獨立而且穩定運動，各組流線彼此間互不干擾且無交會結合的現象(圖15，圖16及圖17)。

實驗六 探討外加動力的羽流型態

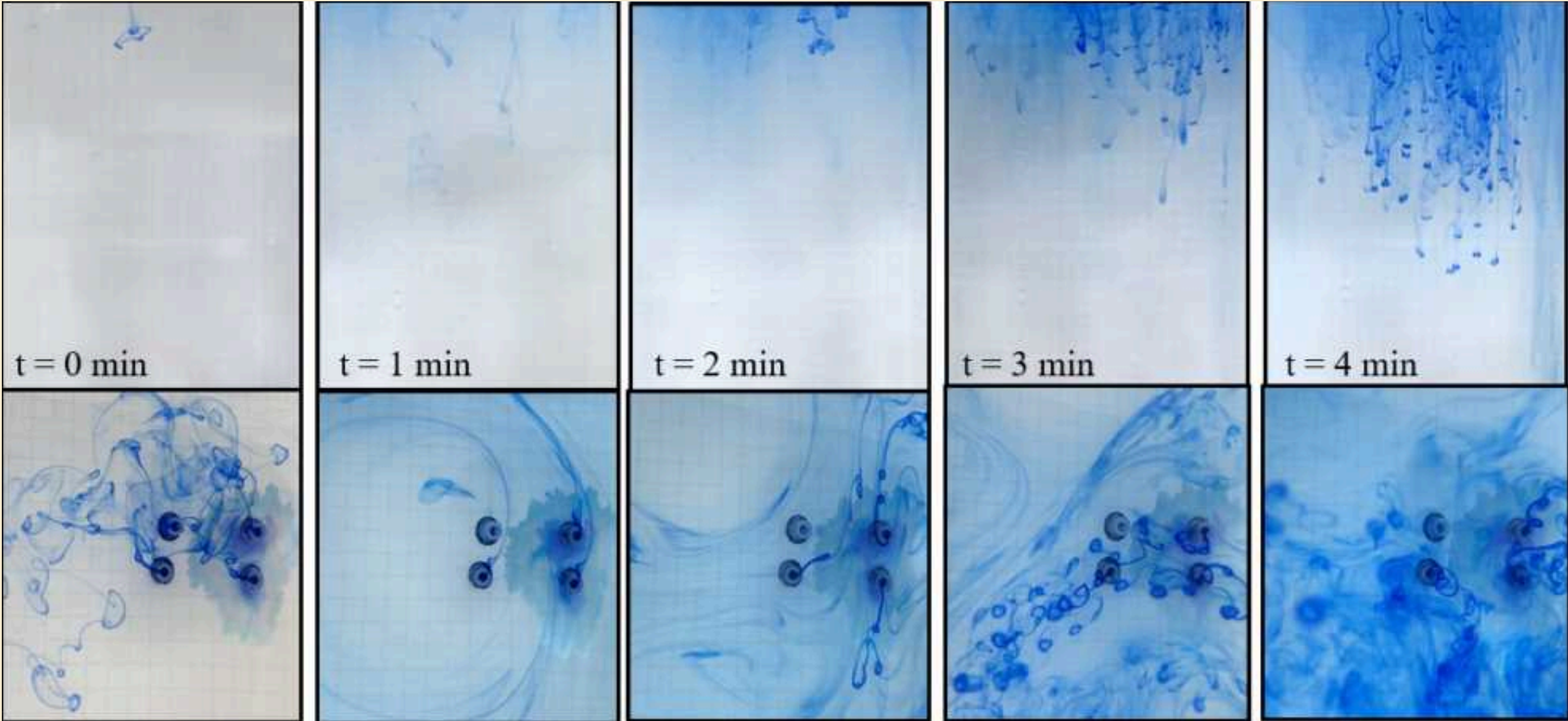


圖18 外力作用下的多組羽流 (圖中四組圓孔為鹽水出口，上排為正視圖，下排為仰視圖)

外加旋轉動力的對流形態與現場實地觀察的現象十分相似。對流初始略顯混亂，而後逐漸形成蘑菇頭結構的流線；當受外力作用影響，羽流加速旋轉擴散，t= 3 min 後蘑菇狀頭部結構變化明顯(圖18)。

伍、討論

一、造成特殊流線的可能因素

(一)卡門渦街

卡門渦街為流體流經障礙物後，產生不穩定的邊界層分離，形成兩列交錯排列的渦旋(圖19右)，其流線與實地觀察的結果並不相似(圖19左)。

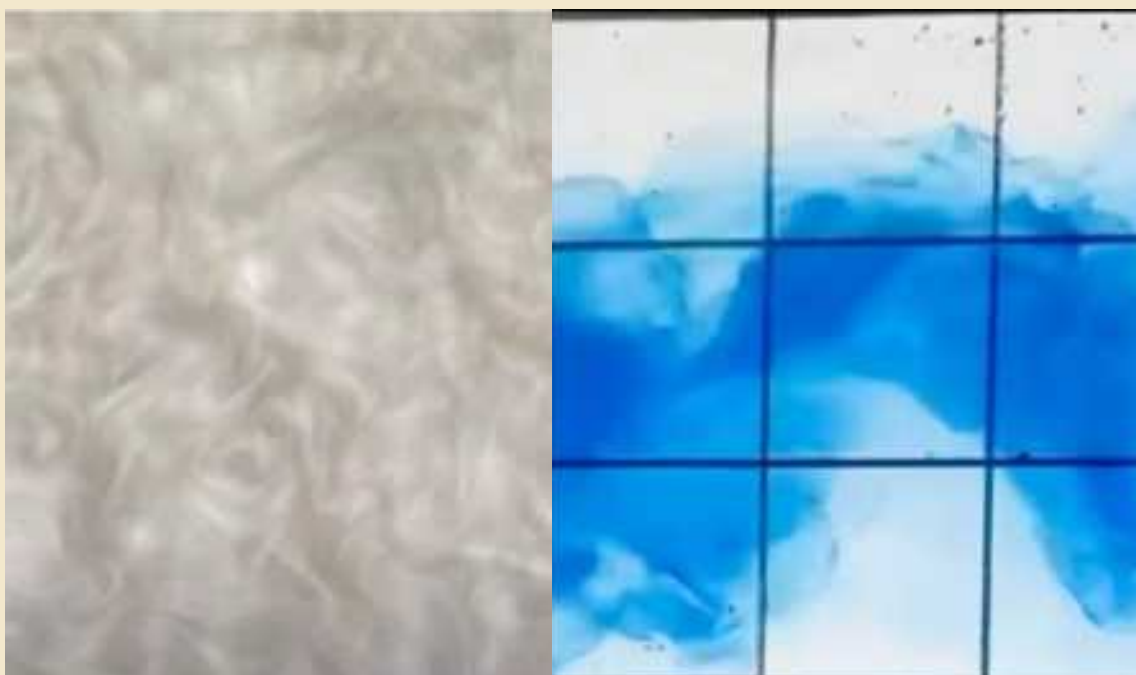


圖19 實地觀察的流線與卡門渦街之比較

(二)溫度差異

相較於密度差對流，溫度差對流主要為水平擴散，垂直擴散較緩慢，流線無明顯蘑菇狀頭部，且平均流速較密度差對流慢，此與實地觀察的現象差異大(圖20)。

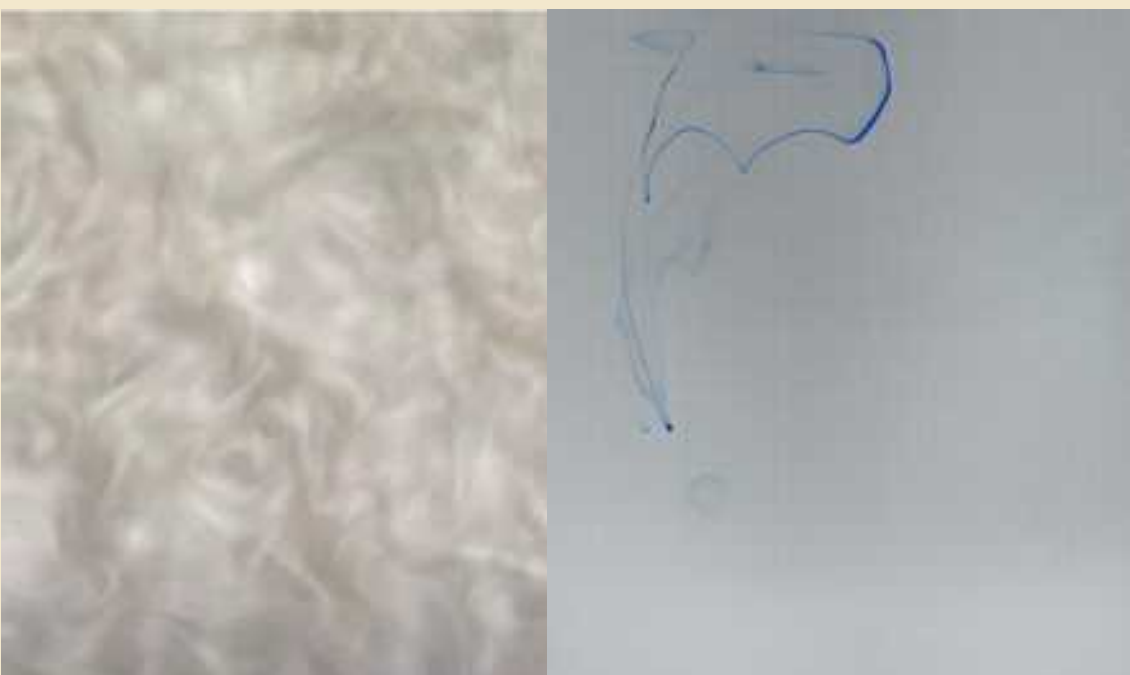


圖20 實地觀察的流線與溫度對流之比較

(三)河道泥流

實驗模擬漲潮時海水進入河道衝擊其底部泥砂，導致泥砂揚起，結果發現揚起的泥需經一段時間沉降後才能再次抬升，此與現地觀察到的現象不符(圖21)。



圖21 實地觀察的流線與河水泥流之比較

(四)多重羽流

羽流為一種流體的特殊對流結構，自然對流的過程可出現不同型態。北極河口實地觀察與實驗六的結果比較，兩者的流線十分相似，且液面皆有湧起的現象(圖22)。

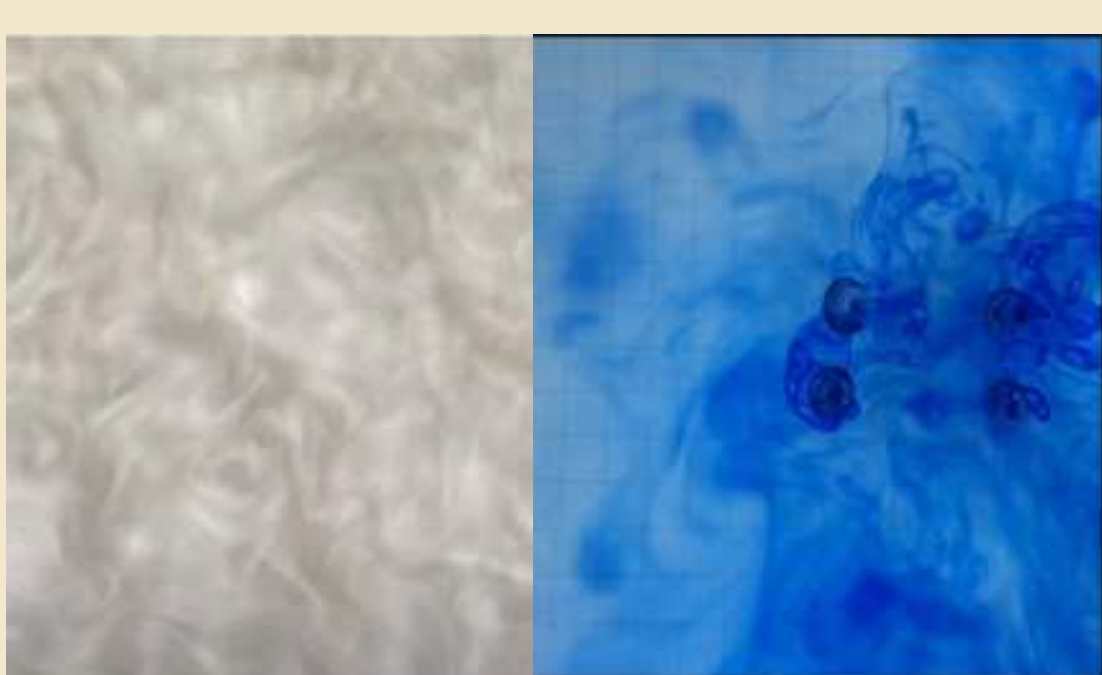


圖22 實地觀察的流線與旋轉羽流之比較

二、水樣中泥砂的粒徑分析



圖23 北極現場採集的河水樣本

水樣(圖23)泥砂粒徑分析(圖24)結果顯示，含量最高的粉砂與我們在蘭陽溪下游所採集的泥砂粒徑範圍相同，因此本研究模擬漲潮時河口河床底泥的運動，是使用蘭陽溪所採的泥砂進行實驗。

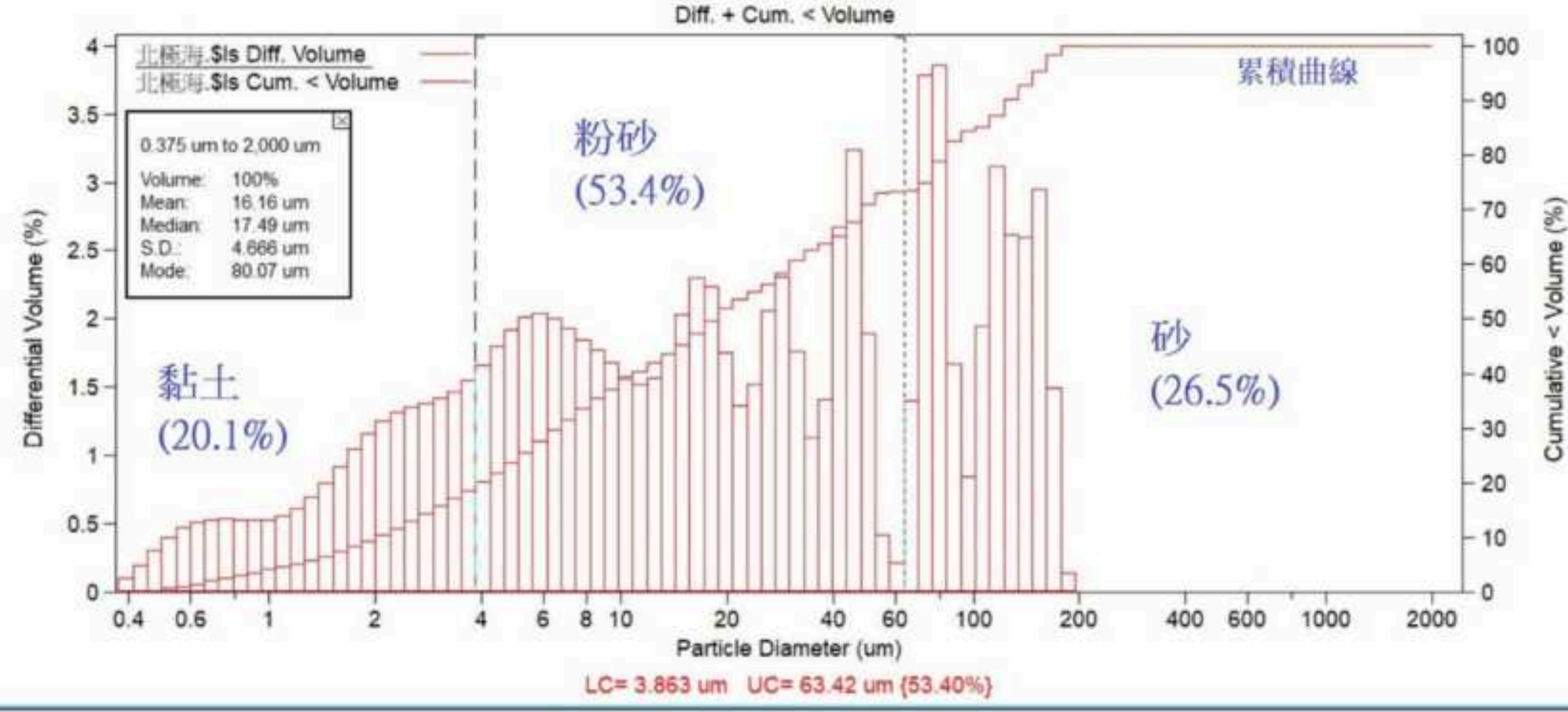


圖24 水樣泥砂粒徑分析圖

三、鹽度與流體對流加速度的關係

將不同鹽度的對流影片進行分析，並利用 Tracker計算其垂直運動加速度(圖25)，分析不同鹽度的加速度大小發現，各種鹽度的羽流平均加速度不同，也不為零，說明形成自然對流的流體並非等加速度運動，也不是等速度運動。

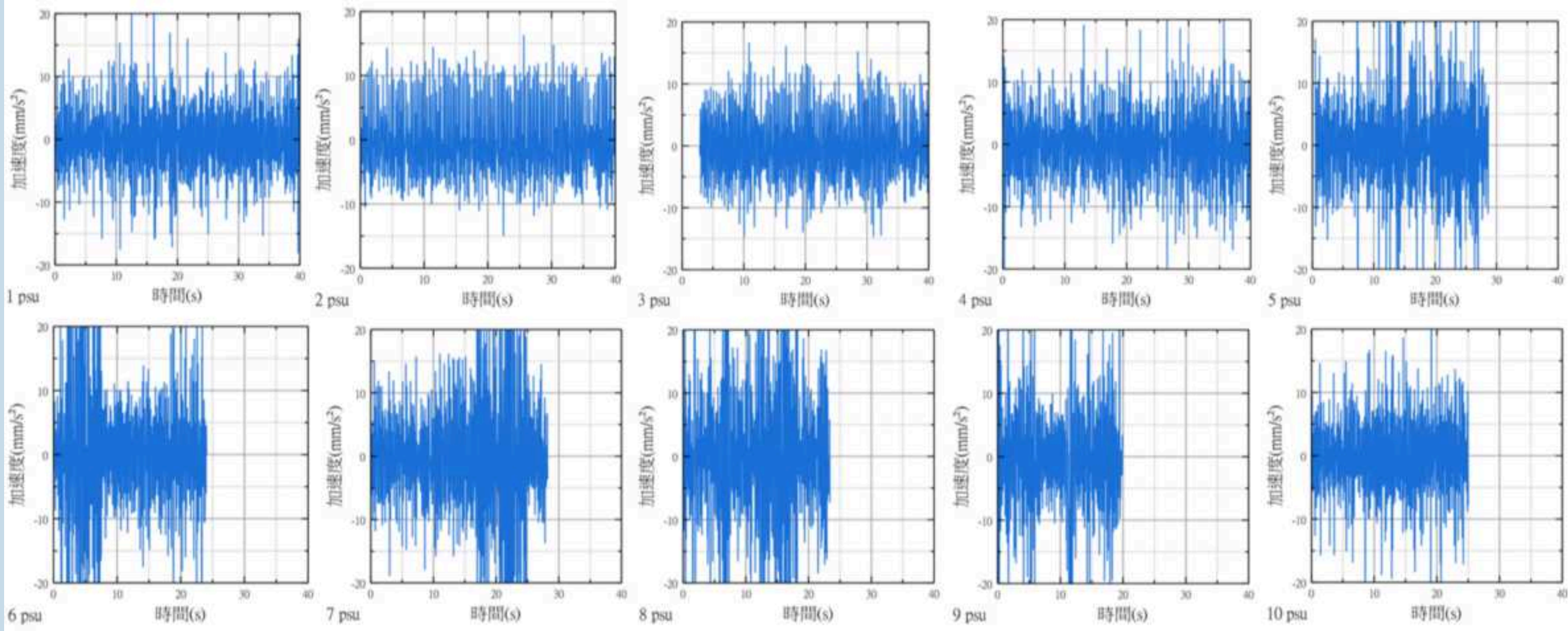


圖25 不同鹽度羽流的加速度與時間關係圖

四、形成特殊流線、羽流結構的原因及機制

藉由實驗分析流體的流線、蘑菇狀結構、鹽度、流速以及上下運動等之差異，探討其自然對流的特殊現象。結果顯示：不同鹽度鹽水與水交會形成羽流時，其頂端的流速最快，邊緣因受擴散及其他因素的影響流速較慢，進而形成蘑菇狀的結構。不同鹽度所形成的羽流頂端之蘑菇狀結構，如圖26及圖27。



圖26 鹽度3 psu：密度差小流速慢，頭部較圓

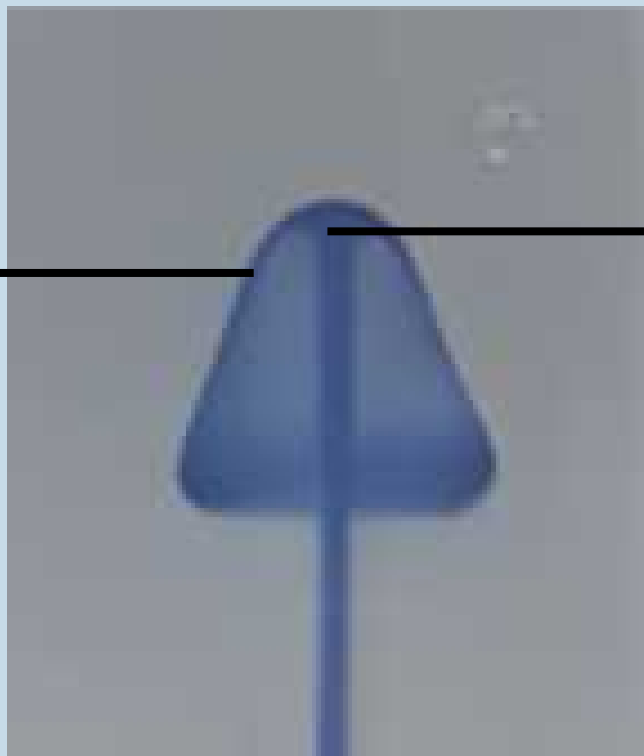


圖27 鹽度10 psu：密度差大流速快，頭部較尖

五、實驗設計原理及考慮因素

本研究除考慮北極當地的地理位置及地形外，現場採樣時的河水溫度與鹽度也一併納入實驗設計之中。



圖28 採樣點環境(作者本人穿著紅色外套)



圖29 研究區地形圖(擷取自網路)

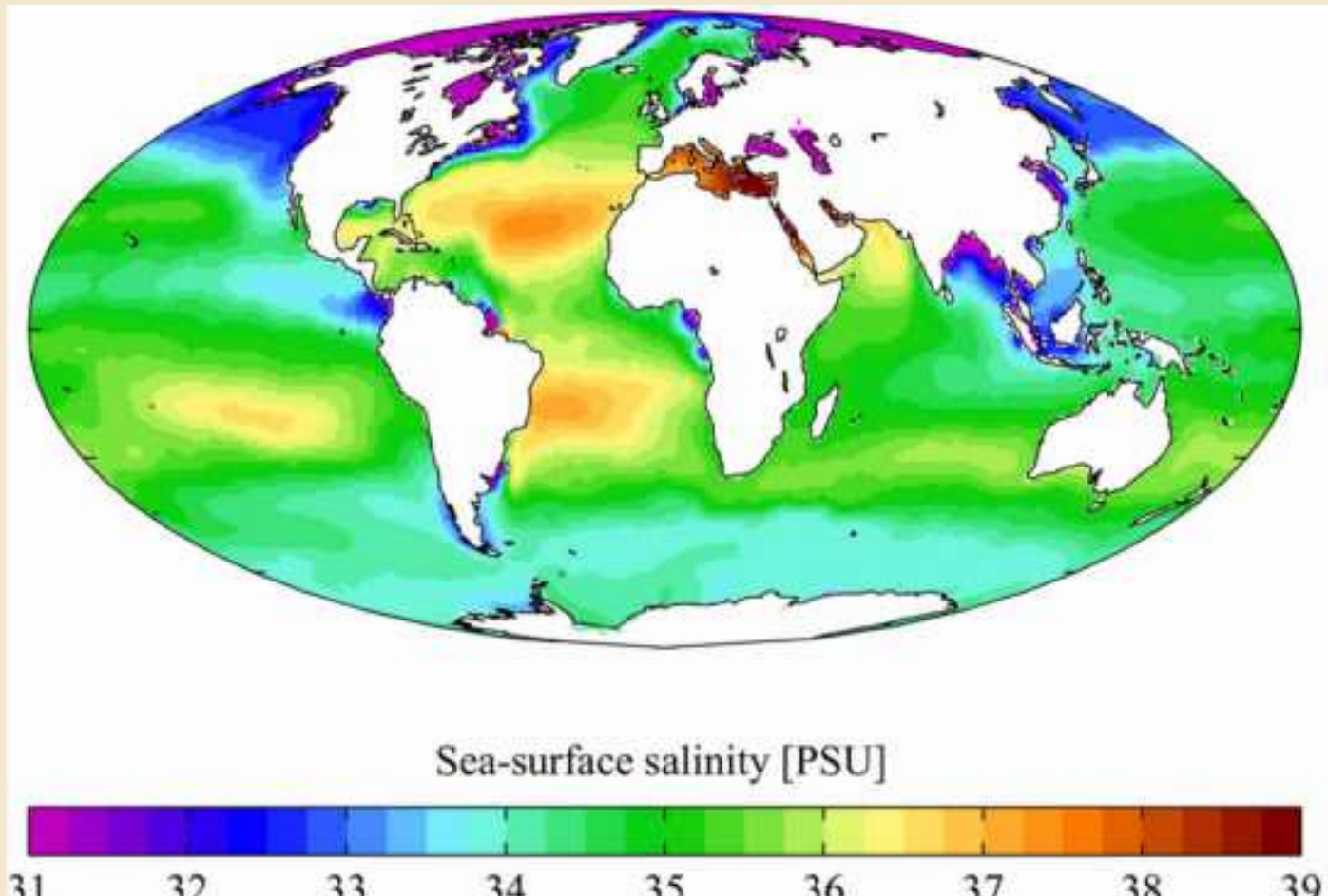


圖30 全球海洋鹽度分布(擷取自網路)

拍攝河水面特殊流線的時間為13:43，依據潮汐週期推算當時的潮位約為 0.43 m 且為漲潮時段，此時海水正湧入河道內(圖28)。此外，採樣點位於兩條冰川交會後形成的河流與海洋交界處，靠近主要河道(圖29)。冰川融水流入海洋的過程中與較高鹽度的海水相遇，形成鹽度梯度驅動的羽流現象。全球暖化造成北極的冰川、海冰融化情形日益加劇，這個現象使得北極海、極區的海水鹽度被稀釋(圖30)。本研究觀察到的現象僅存在於流體密度差較小，對流速度較慢的情況，而大量冰川及海冰融化導致海水鹽度下降，恰好提供羽流形成機制中，低密度差的良好條件。

陸、結論

一、造成河道水面特殊流線的原因

密度差引發的羽流為造成河道水面特殊流線的主要成因，運動中的羽流所形成的流線與實地觀察相似。河水面的流線非快速的水流攜帶河床底泥所形成的泥流，亦非河水流經河床上的阻流體所產生的卡門渦街效應。同時，在當地觀察到的特殊流線主要是由於河水與海水密度不同產生的壓力差所導致。密度較低的河水與密度較高的海水接觸時，海水因重力作用向下擴散而河水則向上移動形成自然對流。在特定條件下，河水與海水交互作用，界面產生瑞利泰勒不穩定性。此外，潮汐推動與地形影響可能增強此現象。北極地區冰川融水降低海水鹽度，使密度梯度改變，更容易促成底泥湧起的現象與具有蘑菇狀構造的羽流形成。

二、羽流蘑菇狀結構的成因及影響因素

(一)蘑菇狀結構成因：

當密度不同的流體交會並進行對流形成羽流時，中心流速較快，邊緣受擴散等因素影響，流速較慢，進而形成蘑菇狀頭部。

(二)蘑菇狀結構外形：

水與鹽水密度差較小時，流體較易水平擴散，形成近似圓球的頭部結構；水與鹽水密度差較大時，流體上升速度較快，蘑菇狀頭部結構較為細長。

(三)流體的運動速率：

流體的流速影響蘑菇狀頭部結構的穩定性與形態，較快的流速可能產生不穩定渦旋，蘑菇狀頭部結構鬆散；而較慢的流速則有助於形成對稱、穩定的蘑菇狀頭部。

柒、參考文獻資料

歐柏昇、李佩庭(2008)。海洋密度流之探討。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會優勝作品。取自臺灣網路科教館。
陳柏言、陳亮瑄、李祥(2007)。液體交流道。中華民國第 47 屆中小學科學展覽會優勝作品。取自臺灣網路科教館。