

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

佳作

051902

你的『海水拿鐵』要分層還是漸層？-表層海水  
變化對密度流的影響

學校名稱：南山學校財團法人新北市南山高級中學

作者：  高二 陳思綺  高二 徐睿岑  高二 趙家樂	指導老師：  丁維鈞
---	------------------

關鍵詞：溫鹽環流、鹽指、北大西洋洋流

## 摘要

在不同緯度與深度的海水，會因為溫度與鹽度不均產生密度差異，形成密度流。在北大西洋，因為低溫、高鹽、高密度的特性而產生下沉流，並發展成全球尺度的循環系統，稱為『溫鹽環流』。在近代氣候歷史中，溫鹽環流曾因北大西洋海水受融冰沖淡發生異常減弱，使洋流形式發生改變，全球氣候也短暫回冷，為『新仙女木事件』。

本實驗藉 NOAA 網站收集北大西洋的海水溫度與鹽度異常資料，轉換成密度異常資料後，與溫鹽環流源頭的表層溫度、鹽度與密度異常資料分析，並透過自製裝置模擬溫鹽環流，發現當上層海水密度下降時，會使下沉深度變淺，並在較淺的深度產生平流，使中層海水有較顯著的溫度和鹽度異常，同時表層海水異常，也影響了『鹽指』的發展形式。

## 壹、研究動機

在高一的一次地球科學課堂中，我們學到海洋垂直結構與大西洋海洋剖面圖。我們覺得這邊的課程概念，與我們喜愛在咖啡廳點的分層咖啡拿鐵類似，因為一般來說上層海水密度相比下層海水較小，所以無法對流而形成穩定的水平『分層』。但是在洋流的課程中，我們又學到了在北大西洋格陵蘭地區，因為表層海水密度在結冰後大幅增加，而產生下沉的密度流，並發展成能調節全球氣候的『溫鹽環流』，下沉時所產生的水滴狀分層，稱為『鹽指』。

我們對於『鹽指』的發展方式相當感興趣，並想深度了解溫鹽環流發源處在不同的溫度與鹽度條件下，鹽指的發展型式是否有差異，就像在不同情況下咖啡拿鐵在側邊會產生不同的紋路。我們希望能藉由 NOAA 在全球現場觀測的資料與自製實驗模型的資料做分析，來將溫鹽環流發源處的海水溫度、鹽度異常，對於鹽指發展的，以及其溫鹽變化對於中層海水與深層海水的影響，最後探討其對於洋流型態的影響。

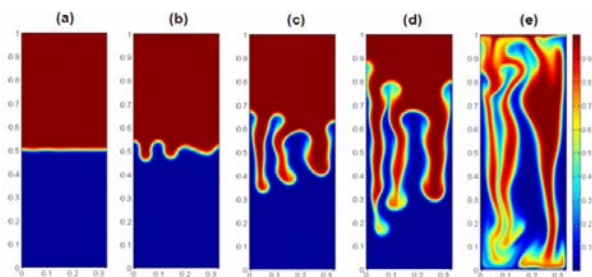


圖 1-1 鹽指的發展過程(由左至右)

## 貳、研究目的

本實驗欲透過 NOAA 實際觀測數據的分析和模擬實驗探討表層海水密度的改變對於密度流以及中下層海水的影響。我們假設，若表層海水密度因為鹽度或是溫度發生異常，則會使鹽指垂直下沉與水平擴散的趨勢，即為密度流的趨勢發生改變，並且表層海水對下層海水的影響範圍，也就是中層與深層的溫度鹽度異常同樣會發生改變。

- 一、探討當表層海水密度下降時對密度流的垂直、水平趨勢與擴散速度影響。
- 二、探討表層海水密度變化與中層、深層海水溫鹽性質之關係。
- 三、探討在密度相同而溫鹽度不同時，對產生的鹽指影響。

實驗假設示意圖：

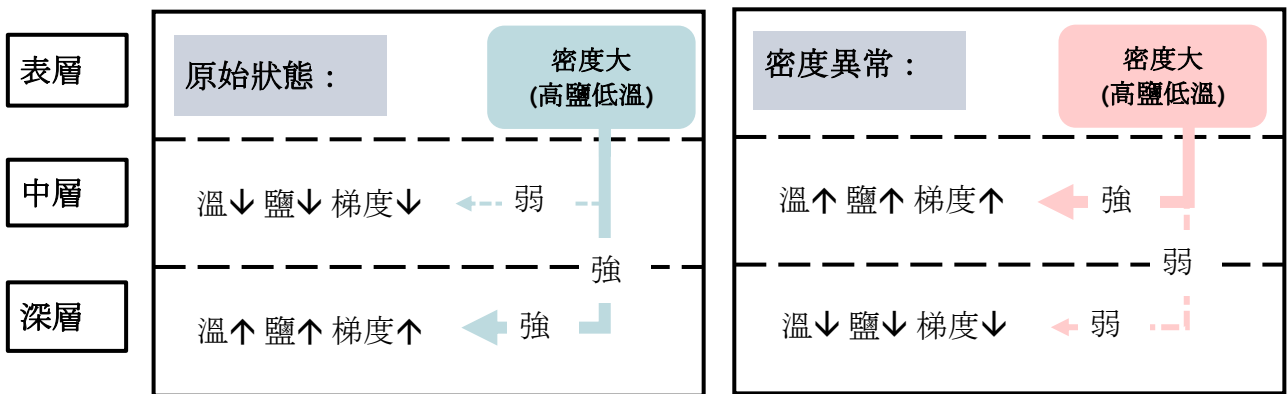


圖 1-2：下沉的速度會減慢、中層鹽度與溫度增加

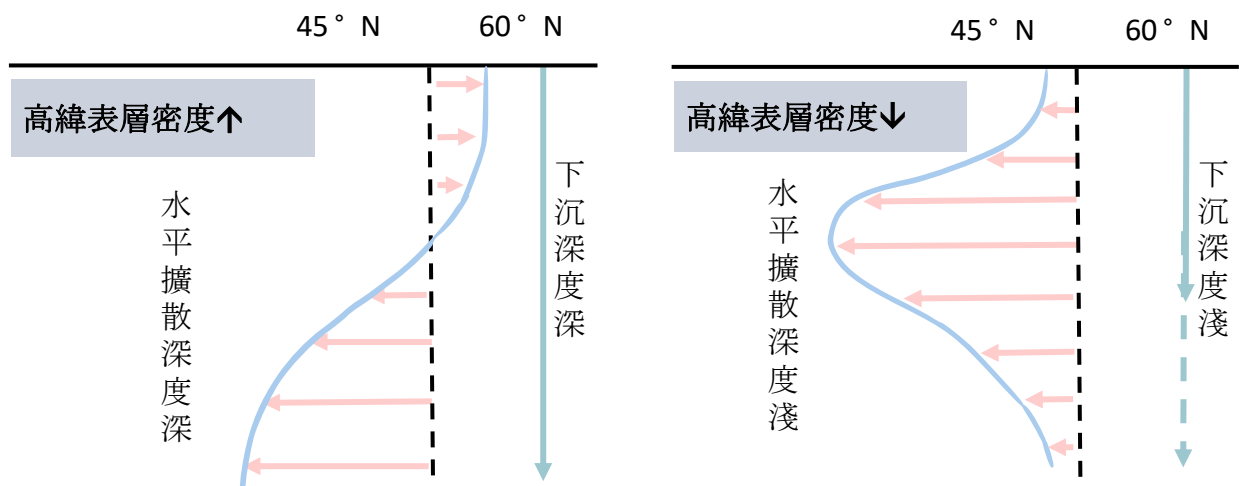


圖 1-3：垂直下沉所達深度變淺，水平擴散發生深度變淺

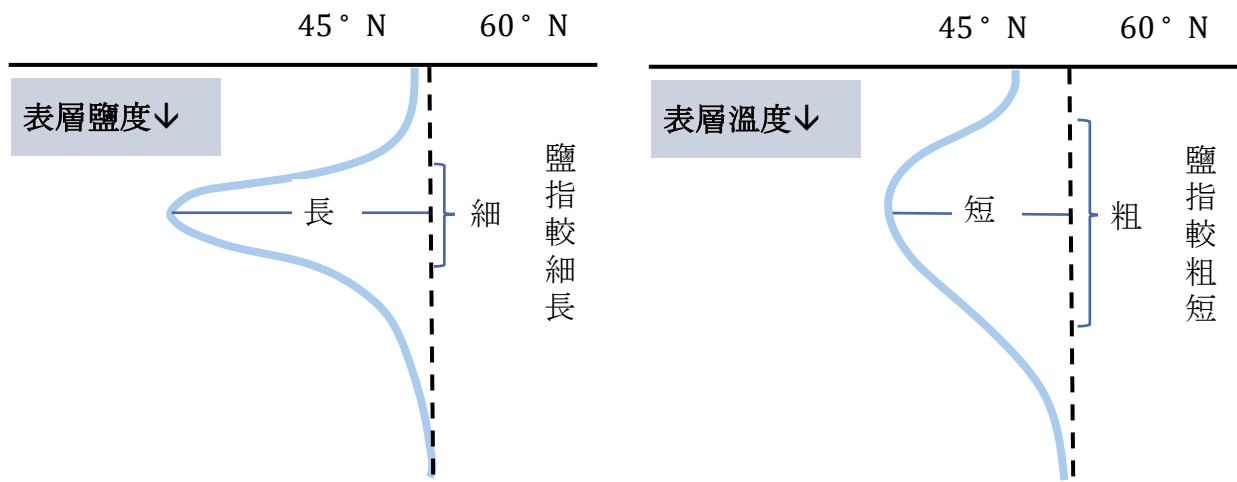


圖 1-4：若為『溫度上升』，鹽指會較粗短；若為『鹽度下降』，鹽指會較細長

## 參、研究設備及器材

### 一、NOAA 現場觀測數據收集

#### (一) NOAA

美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration) 網站，提供溫度、雨量、二氧化碳、海平面等氣候相關圖資，關於海洋資訊包括各地各年溫鹽異常圖、熱含量等海洋探勘監測所得數據資料。

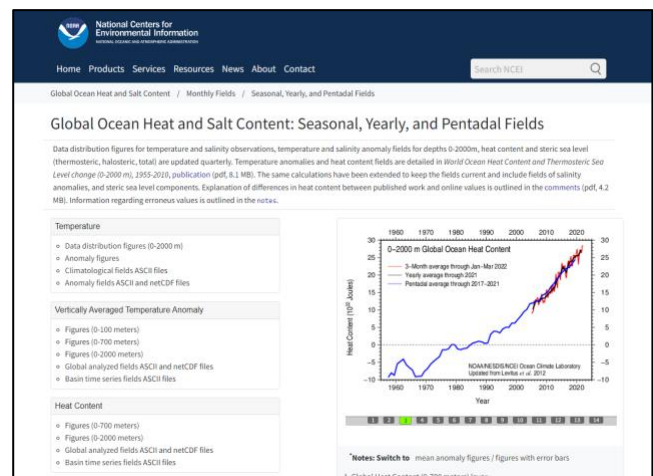


圖 2-1：NOAA 全球海洋熱量和鹽分含量資料

#### (二) 平板電腦

#### (三) 筆記型電腦

#### (四) 15cm 直尺

#### (五) 手機

## 二、自製模型模擬實驗

- (一) 550m 寶特瓶 (3 瓶)
- (二) 直徑 1.2cm 粗吸管 (5 根)
- (三) 防水膠帶
- (四) 熱熔膠
- (五) 加熱板
- (六) 溫度計
- (七) 食鹽
- (八) 燒杯
- (九) 水閥開關
- (十) 拍照紀錄用手機
- (十一) 碼表
- (十二) 墨汁

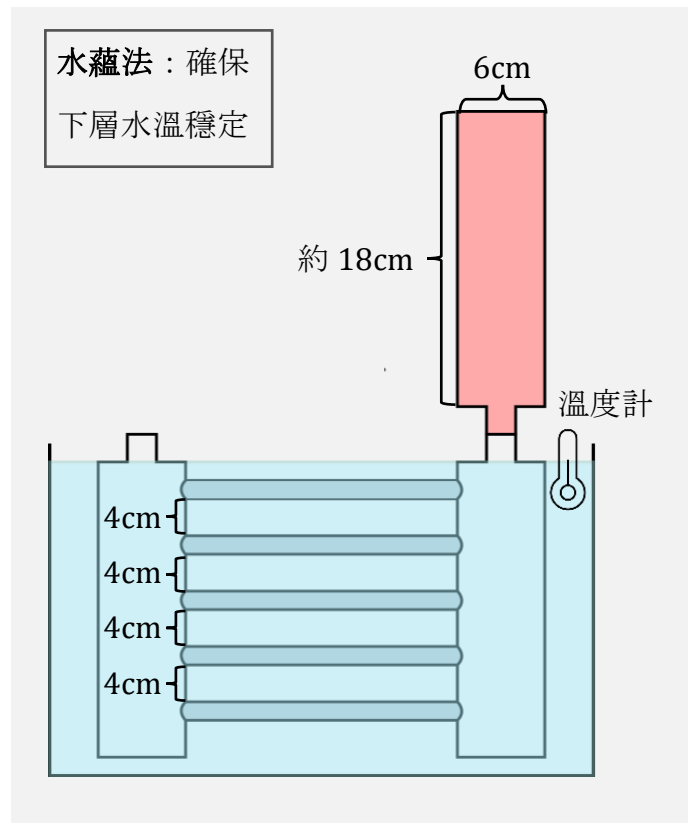


圖 2-2：實驗裝置設計圖

## 肆、研究過程或方法

### 一、文獻探討

#### (一) 混合增密

在『氣候文明史』這本書中第 47 頁中有提到，除了表層密度大會產生下沉密度流外，當密度相同，但溫度與鹽度都不同的兩個海水體相遇並混合時，混合後的海水會產生密度增加的現象，稱為『混合增密』。

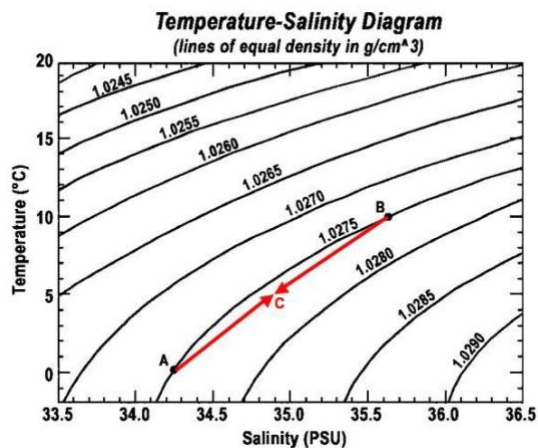


圖 4-1：兩個溫鹽不同、密度相同的水體，混合後的水體密度會增加

## (二) 淡水強制力

距今約 13000 年前，全球氣候因為有逐漸回暖的趨勢，北半球陸地的冰帽逐漸融化，並注入到北大西洋，使北大西洋的海水被沖淡而表層海水密度下降，垂直下沉趨勢讓溫鹽環流減弱，調節氣候的機制減弱，讓北半球陸地的冰帽復生，全球因為地表的反照率增加，太陽輻射吸收降低，發生了短期回冷的新仙女木事件，此時的溫鹽環流稱為『淡水強制力』。

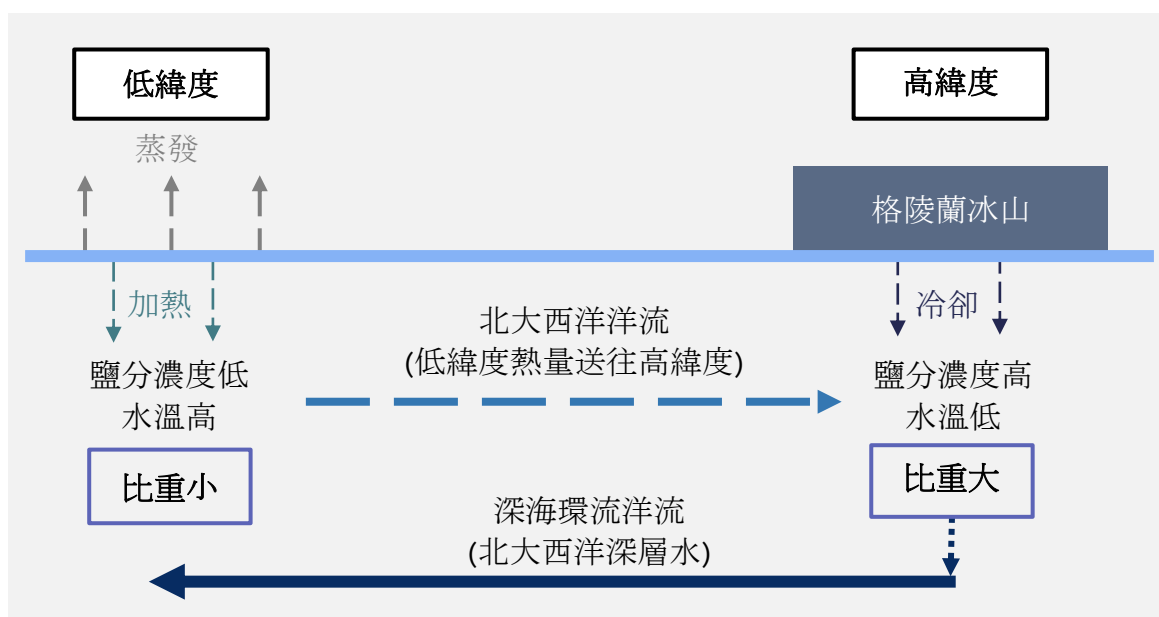


圖 4-2：溫鹽環流示意圖

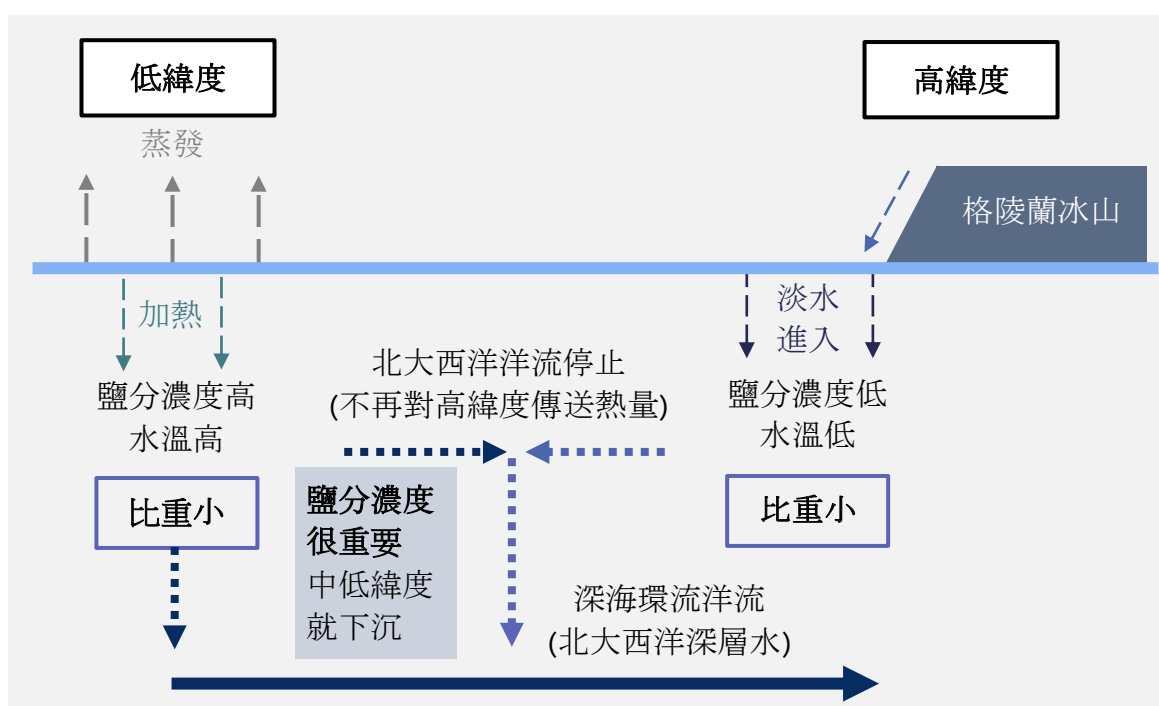


圖 4-3：淡水強制力示意圖

### (三) 雙擴散對流

當上層水體密度大於下層時，上層水體會下沉形成『鹽指』，下層水體也會受擠壓上升形成雙擴散對流。雙擴散對流所形成的鹽指，在上下層密度差異來源為溫度時，鹽指會較為短胖；在上下層密度差異來源為鹽度時，所產生的鹽指會較瘦長。

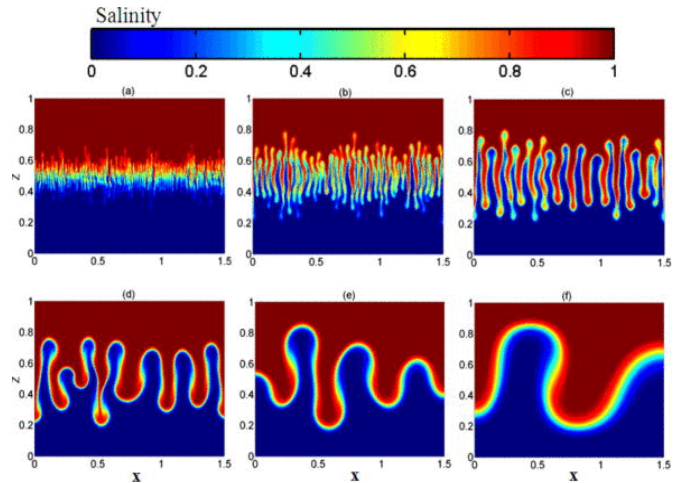
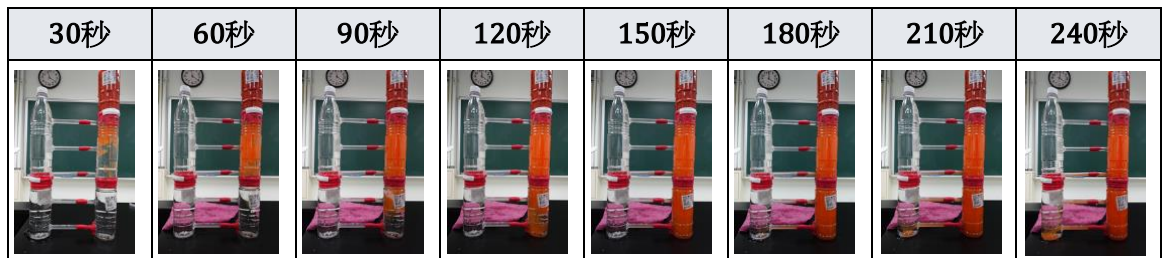


圖 4-4：雙擴散對流在不同溫度鹽度狀態下產生的鹽指差異

## 二、示性實驗

為確定模擬實驗的結果是否能合乎預期，是否具備效度，在未定量的情況下，調整上下層的溫度與鹽度，確認縮小尺度後的模型得以呈現出足夠大的結果差異。結果為有效，在調整上下層海水的溫度差與鹽度差時，能產出與假設相同的結果。

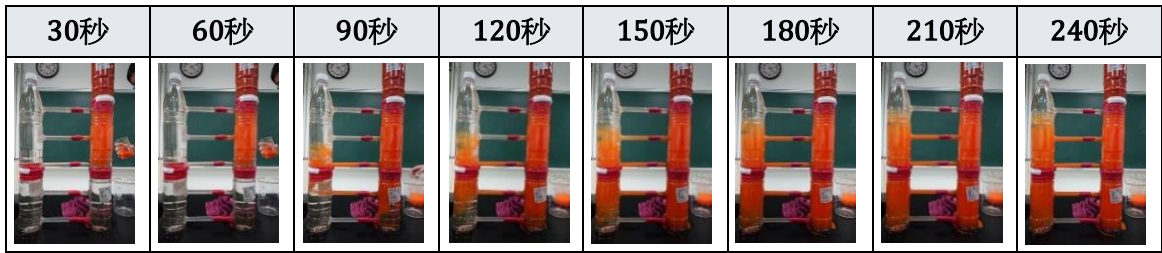
### (一) 上層鹽度正異常、溫度負異常（上層密度正異常二單位）



1. 垂直擴散到底時間：110 秒
2. 水平擴散至隔壁瓶時間：200 秒
3. 水平擴散深度：主要是第五管，三四管也有
4. 擴散至隔壁瓶後發展：不會向上擴散

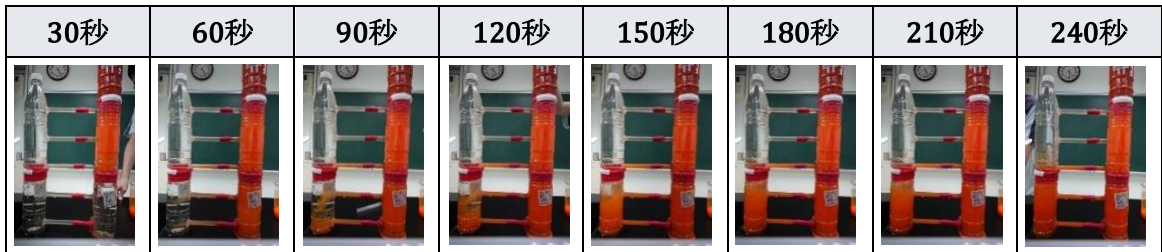


(二) 上層鹽度正異常、溫度無異常 (上層密度正異常一單位)



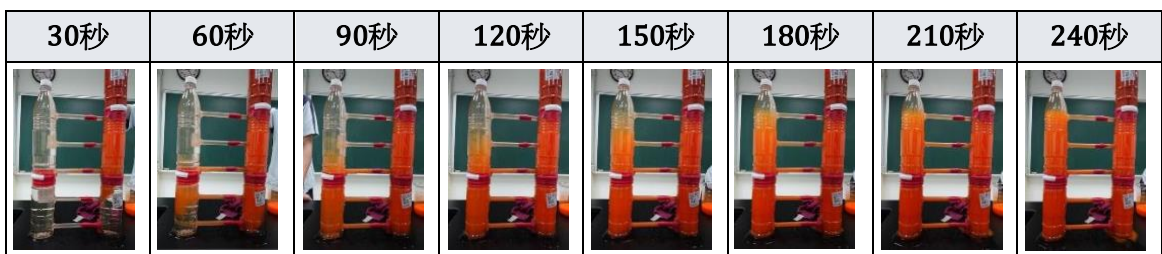
1. 垂直擴散到底時間：45 秒
2. 水平擴散至隔壁瓶時間：45 秒
3. 水平擴散深度：主要是第三四管，第五管也有
4. 擴散至隔壁瓶後發展：不會向上擴散

(三) 上層鹽度正異常、溫度正異常 (上層密度略大於下層)



1. 垂直擴散到底時間：240 秒後也未擴散至底部
2. 水平擴散至隔壁瓶時間：50 秒
3. 水平擴散深度：主要是第二三管，第一管也有
4. 擴散至隔壁瓶後發展：不會向下擴散

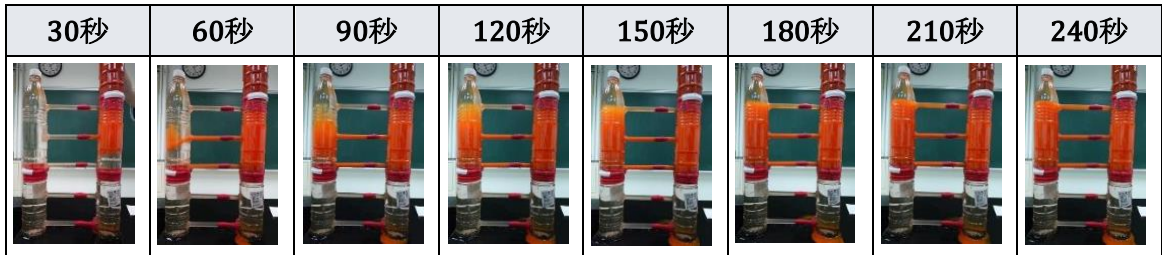
(四) 上層鹽度無異常、溫度負異常 (上層密度正異常一單位)



1. 垂直擴散到底時間：50 秒
2. 水平擴散至隔壁瓶時間：50 秒
3. 水平擴散深度：主要是第四管，三、五管也有
4. 擴散至隔壁瓶後發展：從第四管向下擴散



(五) 上層鹽度負異常、溫度負異常（上層密度略大於下層）



1. 垂直擴散到底時間：110 秒
2. 水平擴散至隔壁瓶時間：60 秒
3. 水平擴散深度：主要是第三、四管，第二管也有
4. 擴散至隔壁瓶後發展：從第三四管向上下擴散

三、NOAA 現場觀測數據收集

(一) 至 NOAA 觀測網站，收集在北大西洋的海水其溫度異常與鹽度異常值。採樣點的經度皆為 30°W，採樣點的緯度分別為 60°N、45°N、30°N、15°N、0°N，採樣深度分別為 0m、250m、500m、800m、1000m、1250m、1500m、1750m、2000m，採樣時間為 2005 年至 2020 年，以三個月為單位的平均值。

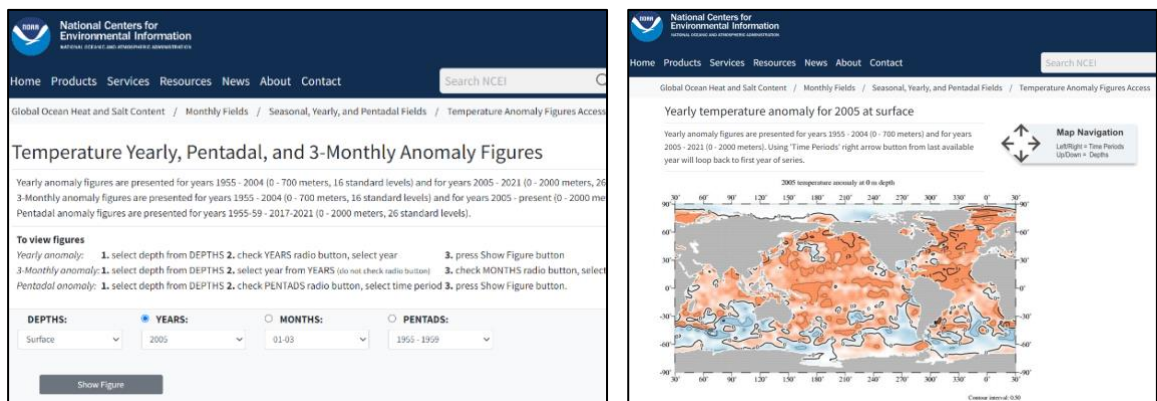


圖 4-5：NOAA 網站的海洋現場觀測資料與查詢選單

(二) 將溫度異常資料與鹽度異常資料，參考海水狀態方程式後，將兩份資料合併轉換成密度異常資料。再將各季度 60°N 各深度的海水密度異常資料，與 45°N 各深度的海水密度異常資料相減，計算出各季度各深度的密度梯度，將各層密度梯度在各季度的變化，依照 60°N 表層海水密度正負異常狀況，分成表層密度正異常與表層密度負異常兩組資料，並將其資料製作成盒鬚圖加以分析討論。溫度異常資料與鹽度異常資料，則利用相同步驟做數據處理。

(三) 將各季度 60°N 各深度的海水密度異常資料，製作成盒鬚圖並加以分析討論。溫度異常資料與鹽度異常資料，則利用相同步驟做數據處理。

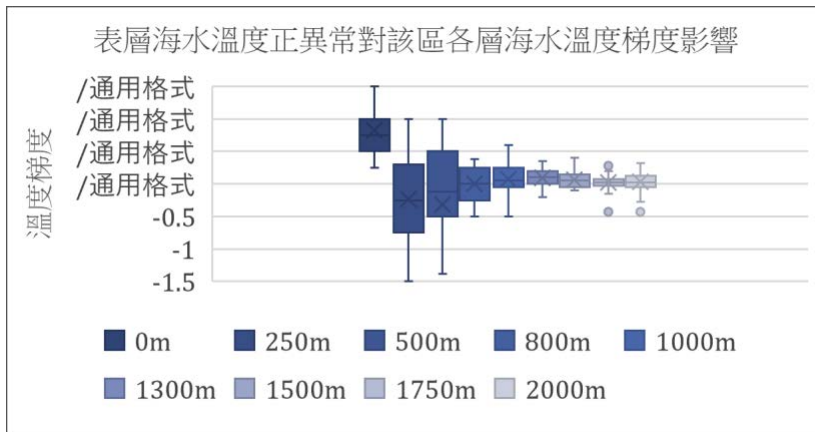


圖 4-6：盒鬚圖範例

#### 四、自製模型模擬實驗

(一) 將寶特瓶、吸管、流水閥開關等材料，依照裝置設計圖組合。五支吸管分別對應海洋深度 0m、500m、1000m、1500m、2000m 的海水通道，在示意圖右側，上方有注水裝置的寶特瓶，代表位於 60°N 的高緯度地區，示意圖左側的寶特瓶，則是代表低緯度地區。

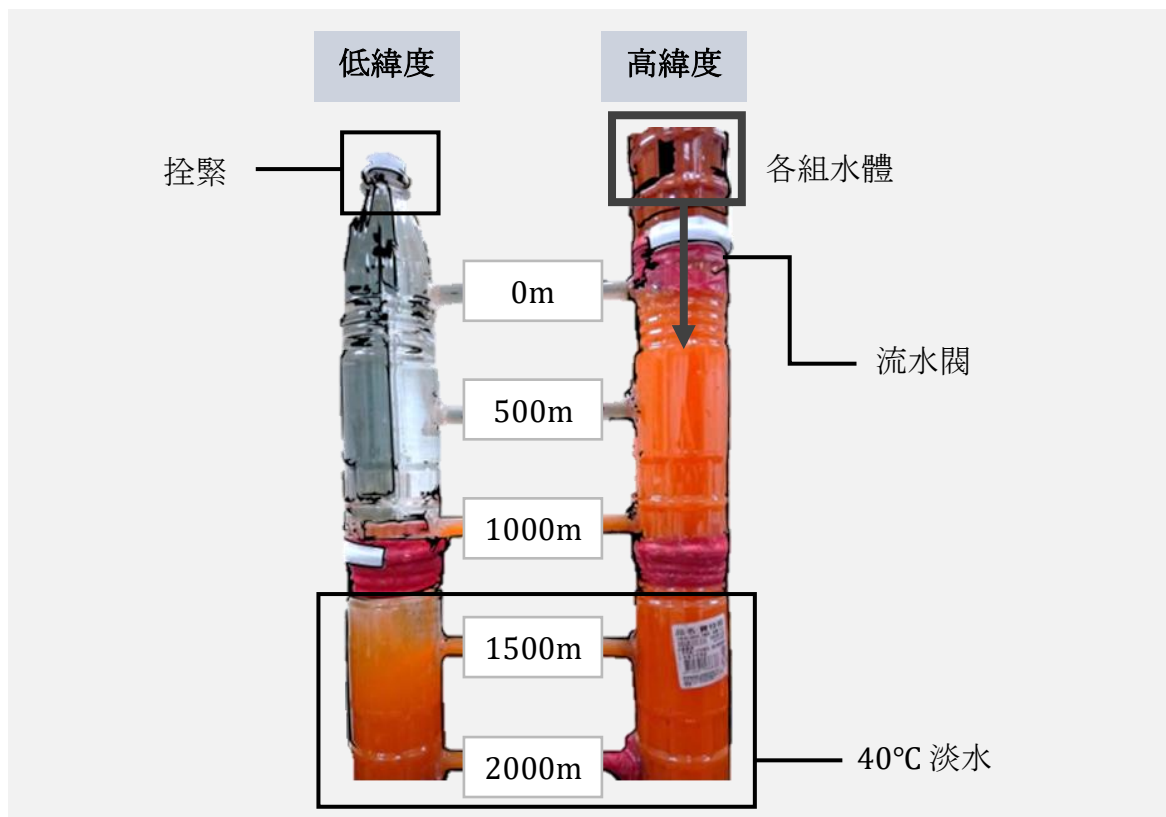


圖 4-7：模擬實驗實際操作圖

(二)在各組的實驗組別中，下層水體的配置皆為 40°C，密度為 994 kg/m<sup>3</sup> 的淡水，調整上層水體的溫度與鹽度，使得上層水體的密度分別為 996、998、1000、1002、1004、1006 kg/m<sup>3</sup>。水體的溫度、鹽度與密度的關係表如下：

水體密度表		水體鹽度										
		0.00%	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.60%	0.70%	0.80%	0.90%	1.00%
水體溫度	0°C	1000.60	1001.38	1002.16	1002.94	1003.72	1004.50	1005.28	1006.06	1006.84	1007.62	1008.40
	1°C	1000.45	1001.23	1002.01	1002.79	1003.57	1004.35	1005.13	1005.91	1006.69	1007.47	1008.25
	2°C	1000.30	1001.08	1001.86	1002.64	1003.42	1004.20	1004.98	1005.76	1006.54	1007.32	1008.10
	3°C	1000.15	1000.93	1001.71	1002.49	1003.27	1004.05	1004.83	1005.61	1006.39	1007.17	1007.95
	4°C	1000.00	1000.78	1001.56	1002.34	1003.12	1003.90	1004.68	1005.46	1006.24	1007.02	1007.80
	5°C	999.85	1000.63	1001.41	1002.19	1002.97	1003.75	1004.53	1005.31	1006.09	1006.87	1007.65
	6°C	999.70	1000.48	1001.26	1002.04	1002.82	1003.60	1004.38	1005.16	1005.94	1006.72	1007.50
	7°C	999.55	1000.33	1001.11	1001.89	1002.67	1003.45	1004.23	1005.01	1005.79	1006.57	1007.35
	8°C	999.40	1000.18	1000.96	1001.74	1002.52	1003.30	1004.08	1004.86	1005.64	1006.42	1007.20
	9°C	999.25	1000.03	1000.81	1001.59	1002.37	1003.15	1003.93	1004.71	1005.49	1006.27	1007.05
	10°C	999.10	999.88	1000.66	1001.44	1002.22	1003.00	1003.78	1004.56	1005.34	1006.12	1006.90
	11°C	998.95	999.73	1000.51	1001.29	1002.07	1002.85	1003.63	1004.41	1005.19	1005.97	1006.75
	12°C	998.80	999.58	1000.36	1001.14	1001.92	1002.70	1003.48	1004.26	1005.04	1005.82	1006.60
	13°C	998.65	999.43	1000.21	1000.99	1001.77	1002.55	1003.33	1004.11	1004.89	1005.67	1006.45
	14°C	998.50	999.28	1000.06	1000.84	1001.62	1002.40	1003.18	1003.96	1004.74	1005.52	1006.30
	15°C	998.35	999.13	999.91	1000.69	1001.47	1002.25	1003.03	1003.81	1004.59	1005.37	1006.15
	16°C	998.20	998.98	999.76	1000.54	1001.32	1002.10	1002.88	1003.66	1004.44	1005.22	1006.00
	17°C	998.05	998.83	999.61	1000.39	1001.17	1001.95	1002.73	1003.51	1004.29	1005.07	1005.85
	18°C	997.90	998.68	999.46	1000.24	1001.02	1001.80	1002.58	1003.36	1004.14	1004.92	1005.70
	19°C	997.75	998.53	999.31	1000.09	1000.87	1001.65	1002.43	1003.21	1003.99	1004.77	1005.55
	20°C	997.60	998.38	999.16	999.94	1000.72	1001.50	1002.28	1003.06	1003.84	1004.62	1005.40
	21°C	997.45	998.23	999.01	999.79	1000.57	1001.35	1002.13	1002.91	1003.69	1004.47	1005.25
	22°C	997.30	998.08	998.86	999.64	1000.42	1001.20	1001.98	1002.76	1003.54	1004.32	1005.10
	23°C	997.15	997.93	998.71	999.49	1000.27	1001.05	1001.83	1002.61	1003.39	1004.17	1004.95
24°C	997.00	997.78	998.56	999.34	1000.12	1000.90	1001.68	1002.46	1003.24	1004.02	1004.80	
25°C	996.85	997.63	998.41	999.19	999.97	1000.75	1001.53	1002.31	1003.09	1003.87	1004.65	
26°C	996.70	997.48	998.26	999.04	999.82	1000.60	1001.38	1002.16	1002.94	1003.72	1004.50	
27°C	996.55	997.33	998.11	998.89	999.67	1000.45	1001.23	1002.01	1002.79	1003.57	1004.35	
28°C	996.40	997.18	997.96	998.74	999.52	1000.30	1001.08	1001.86	1002.64	1003.42	1004.20	
29°C	996.25	997.03	997.81	998.59	999.37	1000.15	1000.93	1001.71	1002.49	1003.27	1004.05	
30°C	996.10	996.88	997.66	998.44	999.22	1000.00	1000.78	1001.56	1002.34	1003.12	1003.90	
31°C	995.95	996.73	997.51	998.29	999.07	999.85	1000.63	1001.41	1002.19	1002.97	1003.75	
32°C	995.80	996.58	997.36	998.14	998.92	999.70	1000.48	1001.26	1002.04	1002.82	1003.60	
33°C	995.65	996.43	997.21	997.99	998.77	999.55	1000.33	1001.11	1001.89	1002.67	1003.45	
34°C	995.50	996.28	997.06	997.84	998.62	999.40	1000.18	1000.96	1001.74	1002.52	1003.30	
35°C	995.35	996.13	996.91	997.69	998.47	999.25	1000.03	1000.81	1001.59	1002.37	1003.15	
36°C	995.20	995.98	996.76	997.54	998.32	999.10	999.88	1000.66	1001.44	1002.22	1003.00	
37°C	995.05	995.83	996.61	997.39	998.17	998.95	999.73	1000.51	1001.29	1002.07	1002.85	
38°C	994.90	995.68	996.46	997.24	998.02	998.80	999.58	1000.36	1001.14	1001.92	1002.70	
39°C	994.75	995.53	996.31	997.09	997.87	998.65	999.43	1000.21	1000.99	1001.77	1002.55	
40°C	994.60	995.38	996.16	996.94	997.72	998.50	999.28	1000.06	1000.84	1001.62	1002.40	

圖 4-8：食鹽水溶液密度表

(三) 上下層水體準備妥當後，將流水閥打開使上層密度較大的染色水體，並紀錄其擴散過程。觀察重點如下：

1. 上層染色水體垂直下沉至下方寶特瓶底部時所需時間( $T_1$ )
2. 上層染色水體水平擴散到下方側邊寶特瓶時所需時間( $T_2$ )
3. 上層染色水體水平擴散到下方側邊寶特瓶時，出現水平擴散的水管編號與數量
4. 上層染色水體水平擴散到下方側邊寶特瓶時，各水管水平擴散的長度

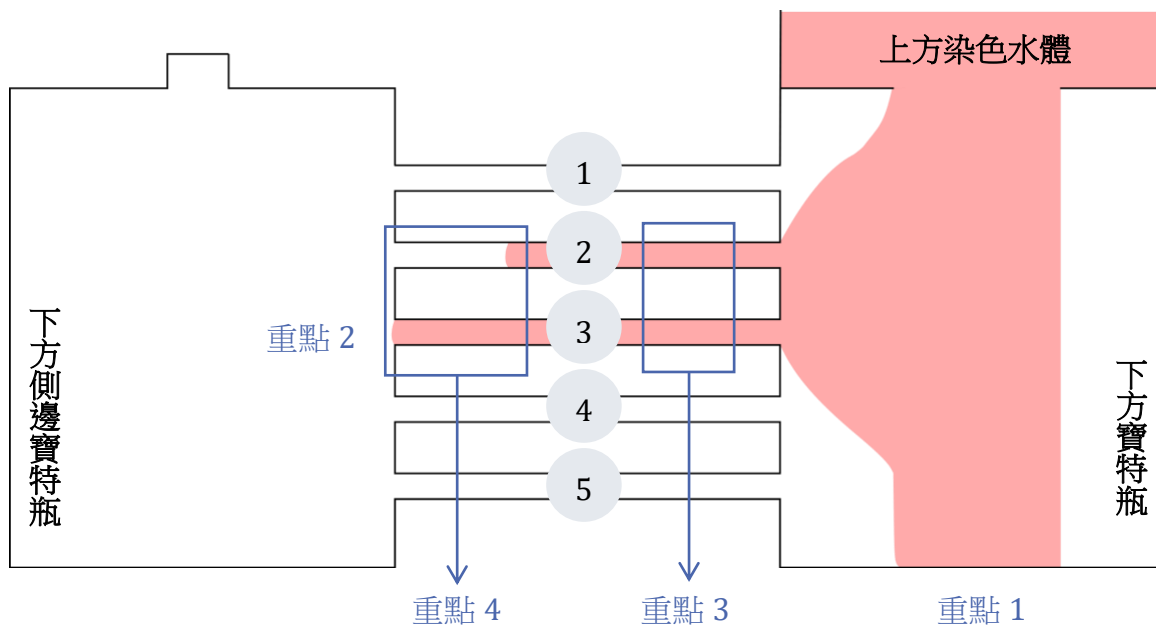


圖 4-9：模擬實驗觀察重點示意圖

密度	996			998					1000							
溫度(°C)	40	36	31	38	33	28	22	17	40	35	30	25	20	14	9	4
鹽度(%)	0.2	0.1	0.0	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
$T_1$ (sec)	132.6	115.0	101.8	105.2	89.6	74.4	61.2	48.2	104.2	94.8	81.4	67.2	54.6	42.2	29.4	15.4
$T_2$ (sec)	107.6	101.3	91.0	101.2	90.6	81.2	70.8	63.0	98.0	87.6	80.4	71.8	62.0	52.8	44.6	35.2

密度	1002								1004					1006				
溫度(°C)	37	32	27	22	17	11	6	1	29	24	19	14	9	3	16	11	6	0
鹽度(%)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	1.0	0.9	0.8	0.7
$T_1$ (sec)	97.2	84.6	73.4	57.6	44.8	28.8	16.0	6.6	77.0	62.0	47.6	35.4	21.4	9.0	38.6	25.6	12.0	5.4
$T_2$ (sec)	88.6	77.2	70.4	60.6	52.0	42.0	33.8	24.6	64.4	52.8	42.8	30.6	23.2	16.4	34.6	25.6	17.2	8.6

圖 4-10：模擬實驗觀察重點記錄表格

# 伍、研究結果

## 一、NOAA 現場觀測數據

### (一) 溫度異常資料

Year	Depth	Season					Season					Season					Season							
		0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
2005	0m	0.5	0.5	1	2	0.5	0m	0.5	0.5	0	0	2	0m	1	1	0.5	1	1	0m	0.5	0.5	0	1	0.5
	250m	0.25	-0.5	0.38	1.25	0	250m	0	-0.63	0.38	1.38	0.5	250m	1	-0.38	0.25	0.88	0.63	250m	0.5	-1	0.38	1.5	0.5
	500m	0.25	-0.13	0	0.25	0.13	500m	0.13	-0.38	0	0	0.13	500m	0.25	-0.13	0.13	0.5	0.38	500m	-0.63	0.13	-0.13	0.38	0.25
	800m	0.13	0	0.25	-0.25	0	800m	0	0.25	0.5	0	0	800m	0	-0.5	0.25	-0.13	0.13	800m	0.25	0.13	0.75	-0.25	0.13
	1000m	0.05	0	0.5	-0.15	-0.05	1000m	0.25	-0.1	0.5	-0.5	0.1	1000m	-0.2	0.05	0.5	-0.15	0.05	1000m	0.05	0.05	0	-0.2	0.15
	1300m	0.15	0.05	0	-0.1	0.05	1300m	0.15	0.05	0.5	-0.1	0.15	1300m	0.05	0	-0.05	-0.15	0.15	1300m	0.05	0.05	0.15	-0.15	0.15
	1500m	0.05	0.05	0	-0.15	0	1500m	0.05	0.05	0.3	-0.15	0.15	1500m	-0.1	0.05	-0.05	-0.15	0.05	1500m	0.15	0.05	0.1	-0.05	0.05
	1750m	0.025	0.025	-0.075	-0.075	-0.5	1750m	0.15	0.125	-0.2	-0.1	0.05	1750m	0	0.025	-0.075	-0.25	0.025	1750m	0.075	0.025	-0.15	-0.05	-0.075
	2000m	0	0	0	0	0	2000m	0	0	0	-0.1	-0.1	2000m	0	0	0	-0.1	-0.05	2000m	0	0	0	-0.025	-0.075
	2006	0m	0.5	0.5	0.5	1	1	0m	0.5	0.5	0	1	1	0m	0.5	0.75	0	1.25	1	0m	0.5	1.25	0	1.25
250m		-0.75	-0.13	0.38	2	0.5	250m	-0.5	0.13	0.38	0	0.75	250m	0.13	-0.5	0.25	0.5	0.63	250m	0.63	-0.13	0.38	1	0.63
500m		0.13	0.13	0.38	0	0.5	500m	0.13	0	0.25	-0.25	0.38	500m	0.5	-0.13	0.5	-0.13	0.38	500m	0.38	0	0	-0.5	0.38
800m		0.13	0.25	-0.5	0.13	0	800m	0.38	0.25	0.25	0.25	0.13	800m	0.25	0.13	0.25	-0.13	0.13	800m	0.13	-0.13	-0.63	-0.25	0.13
1000m		0.05	0.1	0	-0.3	0.05	1000m	0.2	0.35	0	-0.1	0.15	1000m	0.05	0.15	-0.2	-0.2	0.05	1000m	0.15	-0.2	-0.35	-0.25	0.1
1300m		0.15	0.05	-0.1	-0.15	0.15	1300m	-0.05	0.05	-0.1	-0.1	0.25	1300m	0.05	0.05	-0.2	-0.05	0.15	1300m	0.05	0.15	-0.3	0	0.15
1500m		0.15	0.05	0.05	-0.15	0	1500m	-0.1	-0.05	0	0	0.15	1500m	0.05	0.05	-0.05	-0.1	0.05	1500m	0.05	0.05	-0.15	-0.05	0.05
1750m		0.25	0	0.05	-0.1	-0.025	1750m	-0.15	-0.025	-0.1	-0.1	0.1	1750m	-0.025	0	-0.1	-0.075	0	1750m	0.05	0	-0.15	-0.025	-0.05
2000m		0	0	0	0	0	2000m	0	0	0	-0.025	-0.1	2000m	-0.025	0	0	0	-0.075	2000m	0	0	0	-0.025	0
2007		0m	0.5	0.25	1	1	0.5	0m	0.25	0	1	1.25	1	0m	0.13	0	0.5	1	1	0m	0	0.5	0.65	1
	250m	0.38	-0.5	0.38	1.5	0.75	250m	0.38	-0.25	0.38	1	0.63	250m	-0.25	0	0.38	0.5	0.5	250m	0	0.13	0.38	-0.5	-0.2
	500m	0	0	0.5	1	0.5	500m	0	-0.25	0.25	1	0.63	500m	-0.63	0	0.5	-0.13	0.38	500m	-0.13	0.13	0.75	1	0.13
	800m	-0.13	0.38	0.25	-0.13	0.13	800m	0.13	0	0	0.25	0.13	800m	0	0	0.25	-0.13	0.13	800m	0	0.13	0.25	0.25	0.13
	1000m	0.05	0.2	-0.5	0.3	0.15	1000m	0.15	0.1	0.5	0.2	0.25	1000m	0.05	0.15	0.3	0	0.15	1000m	0.05	0.15	0.15	0.1	0.15
	1300m	0	0.15	-0.2	0.1	0.15	1300m	0	0	0.3	0.05	0.25	1300m	0.05	0.05	0.5	0	0.15	1300m	0	0.05	0.35	0.05	0.2
	1500m	0	0.05	-0.05	0	0.05	1500m	0.05	-0.05	0.05	0.05	0.15	1500m	0.05	0.05	0.5	0.05	0.05	1500m	-0.05	0.05	0.2	0.05	0.15
	1750m	0	0	-0.175	-0.025	0	1750m	0.1	0.025	0.025	0	0.05	1750m	0.125	0.025	0.25	0	0.025	1750m	0.05	0.025	0.25	0.05	0.125
	2000m	0	0	0	0	-0.1	2000m	0	0	0	-0.125	0.075	2000m	0	0	0	0	0.15	2000m	-0.075	0.025	0	-0.05	-0.1
	2008	0m	0.5	0	0.5	0	-0.5	0m	0.65	-0.5	0	1	1	0m	0.5	0.65	0.5	1	1	0m	1	0.75	0.4	1.5
250m		0.5	0.5	0.38	1.25	0.13	250m	-0.13	0.25	0.38	1.25	0.25	250m	1	0.5	0.13	-0.25	0.5	250m	1.5	0.5	0.13	-0.13	0.25
500m		-0.13	-0.13	0.5	0	0.13	500m	0	0.25	0.25	1	0.5	500m	1	-0.13	0.75	-0.75	0.25	500m	0.38	0.13	0.25	0.5	0.13
800m		0.25	0.13	0.63	0	0.13	800m	0	-0.13	0.75	0.25	0.13	800m	0.25	0	0.25	0.63	0.13	800m	0.13	-0.13	0.13	0.38	0.13
1000m		0.05	0.15	0.3	0.05	0.15	1000m	0	0.15	0.45	0	0.25	1000m	0.15	0.05	0	0.15	0.15	1000m	0.05	0.1	0.2	0.25	0.15
1300m		0	0.05	0.25	0.1	0.15	1300m	0	0.05	0.3	0.05	0.25	1300m	0.15	0.05	0.25	0.05	0.2	1300m	0.05	0.05	0.2	0.2	0.2
1500m		0	-0.05	0.15	0.05	0.15	1500m	0.05	0	0.4	0	0.15	1500m	0.05	0.05	0.25	0.05	0.15	1500m	-0.05	0	0	0.15	0.15
1750m		0.075	0	0	0.025	0.1	1750m	-0.025	0.075	-0.25	0.05	0.1	1750m	0.025	-0.025	-0.025	0.025	0.1	1750m	-0.025	-0.025	-0.05	0.175	0.025
2000m		0	0	0	0	-0.05	2000m	0	0	0	-0.075	0.15	2000m	0	0	0	0	-0.225	2000m	0	0	0	0	-0.025
2009		0m	0.13	0.5	0.5	0.5	0.5	0m	0.5	0	1	0	0	0m	0	0.25	0.5	-0.5	0.5	0m	0.25	0.75	-0.5	-2
	250m	1	-0.5	0.13	1	0.25	250m	0.75	-0.5	0.13	0.5	0	250m	0	-0.5	0.25	1	0.13	250m	-0.13	0.38	0.13	0.75	-0.13
	500m	-0.5	-0.38	0.25	1	0.25	500m	-0.5	-0.38	0.5	0.5	0.13	500m	0	-0.38	-0.25	0.5	0.13	500m	0.38	0	-0.13	1	0.13
	800m	0.13	0	-0.13	0.5	0.13	800m	0.25	0	0.38	0.13	0.13	800m	0.13	-0.13	0	0	0.13	800m	0.13	-0.13	0	0.63	0.13
	1000m	0.05	0.15	0	0.3	0.15	1000m	0.15	0.1	0.05	0.2	0.15	1000m	0.05	0.05	-0.5	0	0.15	1000m	0.05	0.2	-0.4	0.3	0.15
	1300m	0	0.05	0.15	0.2	0.15	1300m	0	0.05	-0.15	0.2	0.25	1300m	0.05	0.05	-0.25	0.15	0.25	1300m	0.05	0.05	0.05	0.2	0.25
	1500m	0	0.05	0.1	0.2	0.15	1500m	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.25	1500m	0.05	0.05	0.15	0.2	0.15	1500m	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15
	1750m	-0.025	0.075	0.175	0.15	0.15	1750m	-0.025	0.125	0.1	0.025	0.15	1750m	0.125	0.025	-0.125	0.125	0.1	1750m	0	0.075	-0.025	0.125	0.075
	2000m	0	0	0	0.075	0	2000m	0	0.075	0	0.025	-0.1	2000m	0	0	0	0	0	2000m	0	0.025	0	0.05	0
	2010	0m	0.5	1	0.5	0	1	0m	1.25	1.5	0.25	0	2	0m	0.5	1.25	0.5	0	2	0m	1	1	0	0
250m		-1.5	0.25	0.5	0.5	0.13	250m	-0.25	-0.5	-0.38	0.13	0.5	250m	-0.75	0	0.13	0	0.5	250m	-0.25	0.13	0	0.5	0.38
500m		0.75	-0.13	0.38	0.75	0.13	500m	0.13	-0.5	-0.25	0	0.38	500m	0	0.13	0.63	0	0.38	500m	-0.13	0.13	0.13	-0.13	0.38
800m		0.13	0.13	0.25	0.38	0.13	800m	0.13	0	-0.5	0	0.13	800m	0.13	0	0.25	0	0.13	800m	0.13	-0.13	-0.13	0	0.13
1000m		0.15	0.05	-0.15	0.2	0.15	1000m	0.05	0	-0.5	0.2	0.15	1000m	0.05	-0.05	-0.2	0.1	0.25	1000m	0.15	0.05	0.45	-0.1	0.25
1300m		-0.05	0.05	0	0.15	0.25	1300m	0.05	0	-0.3	0.2	0.25	1300m	-0.05	0.05	-0.4	0.1	0.25	1300m	0.05	0.15	-0.1	0.15	0.25
1500m		-0.05	0	0.1	0.05	0.2	1500m	0.05	0.05	-0.15	-0.15	0.25	1500m	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	1500m	0.15	0.15	0.05	0.15	0.2
1750m		-0.025	0.025	0.25	0.1	0.15	1750m	-0.025	0.075	-0.1	0.05	0.15	1750m	-0.05	-0.15	-0.05	0.075	0.05	1750m	-0.075	0	-0.025	0.075	0.15
2000m		0	0.075	0	0	0	2000m	-0.075	0.075	0	0	0.15	2000m	0.025	0	0	0	-0.1	2000m	0	0.075	0	-0.125	-0.125
2011		0m	0.5	0.75	0.25	-1	0.5	0m	0.25	1	0.25	-1	0.25	0m	0.75	0.75	0.25	0	0.5	0m	0.5	0.25	0.2	

	第一季					第二季					第三季					第四季								
	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N				
2013	0m	0.25	0.75	0.5	0.25	0	0m	0.75	0.75	0.25	1	0.25	0m	0.75	0.75	0.5	1	-0.5	0m	0.25	0.5	0.75	0	0.25
	250m	0.5	-0.13	0.13	1	0.13	250m	0.5	-0.88	0.38	0.13	0.25	250m	0	0.38	0.38	-0.5	0.13	250m	-0.38	-0.13	0.38	0.5	0.13
	500m	0.13	-0.13	-0.25	0.5	0.25	500m	0.25	-0.25	0.13	-0.38	0.38	500m	0.25	0.25	0.38	0.13	0.13	500m	-0.13	0.13	0.38	0.5	0.13
	800m	0.13	0.38	0.13	0.25	0.38	800m	0.13	0.13	0.13	-0.13	0.25	800m	0.13	0.25	0.25	0.25	0.25	800m	0.25	0.13	0.38	0.13	0.25
	1000m	0.1	0.15	-0.25	0.5	0.25	1000m	0.05	0.15	-0.15	0.3	0.35	1000m	0.05	0.15	-0.5	0.35	0.25	1000m	0.15	0.05	-0.1	0.45	0.25
	1300m	0.05	0.05	-0.2	0.2	0.35	1300m	0.05	0.05	0	0.05	0.4	1300m	0.15	0.05	-0.2	0.25	0.35	1300m	0.15	0.05	0.05	0.35	0.35
	1500m	0.05	0.05	0	0.2	0.25	1500m	0.05	0.05	-0.1	0.2	0.25	1500m	0.05	0.05	-0.05	0.2	0.35	1500m	0	0.05	0.15	0.3	0.25
	1750m	0.025	0	-0.075	0.15	0.125	1750m	0.15	0.1	-0.1	0.075	0.15	1750m	0.1	0	-0.1	0.125	0.2	1750m	0	0.075	0.05	0.1	0.15
	2000m	0.025	0.125	-0.025	0.075	0.1	2000m	0.025	0.075	0.025	0.025	0.2	2000m	0.025	0.025	0.075	0	0	2000m	-0.025	-0.025	0.2	-0.175	-0.05
	2014	0m	0.25	0	1.25	-1	0	0m	0.25	0	0.75	0	0.5	0m	0.25	0	1.25	0	1	0m	0	0.5	1	0
250m		1	-0.5	0.63	0.75	0	250m	0.13	-0.25	0.38	0.38	0.13	250m	0.5	-0.13	0.63	0.25	0.25	250m	0.13	0.25	0.38	-0.25	-0.13
500m		-0.13	-0.13	0.63	0.63	0.25	500m	0	-0.25	0.25	-0.13	0.13	500m	0.13	0.13	0.38	0.5	0.25	500m	0.38	0.38	0.38	0.5	0
800m		0.13	0.13	0.25	-0.25	0.13	800m	0.13	0.25	0.13	0.38	0.13	800m	0.13	0.13	0.25	0.38	0.13	800m	0.13	0.25	0.5	0.25	0.13
1000m		0.15	0.15	-0.25	0.25	0.25	1000m	0.05	0.15	-0.15	0.35	0.25	1000m	0.15	0.15	0.05	0.3	0.25	1000m	0.05	0.15	0	0.35	0.2
1300m		0.15	0.05	0	0.25	0.35	1300m	0.05	0.05	-0.1	0.25	0.35	1300m	0.15	0.05	0.1	0.25	0.25	1300m	0.15	0.15	0.25	0.25	0.35
1500m		0.15	0.05	0.15	0.25	0.25	1500m	-0.05	-0.05	0.05	0.15	0.25	1500m	0	0.05	0.15	0.25	0.25	1500m	0.05	0.1	0	0.25	0.25
1750m		0	0.05	0.025	0.1	0.075	1750m	0.025	0.1	0.15	0.15	0.2	1750m	0.025	-0.025	0.05	0.225	0.25	1750m	0.05	0.1	0.025	0.25	0.15
2000m		0.025	0.025	-0.025	0.125	-0.1	2000m	0	0.075	0.075	0.025	0	2000m	0	0.1	0.15	0.05	0.175	2000m	0.025	0.1	0.075	0	0.2
2015		0m	0.25	0	0.75	2	-0.25	0m	0.25	-0.25	0.75	0.75	-1	0m	0.75	0.25	1.25	-1.25	-1	0m	0.25	0.75	0.75	-1
	250m	-0.13	0.25	0.38	1	0	250m	-1	0.5	0.63	1	-0.13	250m	-1.25	0.38	0.63	-0.63	0	250m	-0.63	-0.38	0.63	1	-0.25
	500m	0.13	-0.13	0	1	0	500m	0.63	-0.13	0.25	0.88	-0.13	500m	0.13	0.13	0.13	-0.38	-0.13	500m	0.5	-0.13	0.25	1	-0.13
	800m	0.13	0.25	0.25	0.88	0.13	800m	0.25	0.13	0.13	0.25	-0.13	800m	0.38	0.13	0	-0.13	-0.13	800m	0.25	0	0.75	0.75	-0.13
	1000m	0.05	0.25	0	0.5	0.15	1000m	0.1	0.15	-0.3	0.2	0.05	1000m	0.15	0.15	-0.3	0	0.05	1000m	0.1	0.15	0.1	0.1	0
	1300m	0.15	0.15	0	0.5	0.25	1300m	0.1	0.05	0.05	0.1	0.2	1300m	0.15	0.15	-0.05	0.15	0.1	1300m	0.15	0.15	0.05	0.15	0.15
	1500m	-0.05	0.05	0	0.25	0.2	1500m	0.1	0	0.1	0.25	0.25	1500m	0.15	0.05	0.05	0.15	0.15	1500m	0.05	0.05	0	0.1	0.15
	1750m	-0.05	0.025	-0.025	0.25	0.15	1750m	0.1	0.075	0.175	0.225	0.25	1750m	0.125	-0.025	-0.025	0.2	0.225	1750m	-0.075	0.05	0.1	0.25	0.15
	2000m	0	0.025	0.05	0.125	0.15	2000m	0	0.075	-0.075	0.025	0.15	2000m	0.025	0.05	-0.025	0.025	0.075	2000m	0.025	0.05	-0.175	0	0.15
	2016	0m	0.25	0.25	1.25	0	-1	0m	0.75	0.5	1	0	0.5	0m	0.25	0.5	0.25	-0.5	1	0m	0.25	0.75	0.75	1.25
250m		0.25	0.25	0.25	1	-0.5	250m	0.38	0.5	0.63	1	-0.5	250m	0.5	0.25	0.75	0	-0.5	250m	0.5	0	0.25	1	-0.5
500m		0.38	0	0	0	-0.13	500m	0.25	0	0.5	0	-0.13	500m	-0.25	0.13	0.38	-0.5	-0.13	500m	0.12	0.12	0.75	1	-0.13
800m		0.13	0.13	0	1	-0.13	800m	0.13	0	0.13	-0.13	-0.13	800m	0.13	0.13	0.25	0	-0.13	800m	0.25	0.13	0.75	0.5	-0.13
1000m		0.05	0.15	-0.2	0.5	0	1000m	0.05	0	-0.2	0.5	0	1000m	0.05	0.15	0.5	0.1	-0.05	1000m	0.05	0.15	0.5	0.5	-0.05
1300m		0.1	0.1	0	0.3	0.05	1300m	0.05	0	-0.2	0.15	0.05	1300m	0.05	0.1	0	0.15	-0.05	1300m	0.15	0.15	0.5	0.25	-0.05
1500m		0.05	0.05	0.1	0.2	0.15	1500m	0.05	0	-0.1	0.15	0.1	1500m	0	0.05	0.15	0.15	0.05	1500m	0.05	0.15	0.3	0.15	0.05
1750m		0	0.075	0.05	0.1	0	1750m	0	0.125	-0.1	0.125	0.075	1750m	0.025	0	0	0.075	0.025	1750m	0.025	0.1	0.15	0.2	0.15
2000m		0.025	0	-0.125	0	-0.25	2000m	-0.025	0.125	-0.1	-0.25	0.05	2000m	0	0.075	-0.075	0.125	-0.3	2000m	0.025	0.075	0.075	0.15	0.25
2017		0m	0.5	0.25	0.75	1.75	-0.5	0m	0.75	0.75	0.25	0.75	-0.25	0m	0.25	1	0	1	0.5	0m	0.25	0.75	0.25	0.5
	250m	0.25	0.38	0.5	0	-0.5	250m	0.75	0.13	0.63	1	-0.25	250m	0	-0.25	0.63	0.5	-0.25	250m	1	-0.25	0.5	1	-0.37
	500m	0	0	0.25	-1	-0.13	500m	0.25	0	0	1	-0.13	500m	0	0.13	0.25	0	-0.13	500m	0.25	0.13	-0.25	1	-0.13
	800m	0.25	0.13	0.25	-0.38	-0.13	800m	0.13	0.13	0.38	0.13	-0.13	800m	0.38	0.13	0	0.25	-0.13	800m	0.13	0	0.13	0	-0.13
	1000m	0.1	0.15	0.3	-0.3	-0.05	1000m	0.05	0.15	0.5	0.5	0.05	1000m	0.15	0.15	0.5	0.2	-0.05	1000m	0.05	0.15	0.3	0	-0.05
	1300m	0.15	0.05	0.1	0	-0.05	1300m	0.15	0.05	0.3	0.05	0.05	1300m	0.15	0.05	0.4	0.1	0.05	1300m	0.15	0.15	0.2	0.1	0.05
	1500m	0	0.05	0.15	0.15	0.05	1500m	0	0	0.15	0.25	0.15	1500m	0.05	0.05	0.25	0.15	0.05	1500m	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
	1750m	0.025	0.05	0.075	0.05	0.25	1750m	0	0.125	0.05	0.075	0.075	1750m	0	0.025	0.1	0.1	0.075	1750m	0	0.025	0.05	0.2	0.2
	2000m	0.025	0.125	-0.05	0.1	0.15	2000m	0.1	0.1	-0.2	0.125	0.175	2000m	-0.15	0.075	-0.025	0.125	-0.15	2000m	0	-0.025	-0.1	0.2	0.225
	2018	0m	0.25	0.25	1	1.5	-0.5	0m	0.25	-0.25	1.25	-1	-0.5	0m	0.25	-0.25	0.75	2	-1	0m	0.25	0.25	0.25	-1
250m		0.13	-0.38	0.63	1	-0.38	250m	-0.5	0	0.5	2	-0.25	250m	-0.25	0.5	0.88	2	-0.13	250m	0.25	0.13	1	2	-0.38
500m		0.25	-0.13	0	1	-0.13	500m	0.13	-0.13	-1	1	-0.13	500m	0.25	0	0.63	-1	-0.13	500m	0.13	0.13	0	1	-0.13
800m		0.13	0.25	-0.5	0.25	-0.13	800m	0.13	0.13	-0.5	0.5	-0.13	800m	0.38	0	0.38	-0.25	-0.13	800m	0.38	0	0.63	1	-0.13
1000m		0.15	0.15	-0.2	0.5	-0.1	1000m	0.25	0.15	0.2	-0.15	-0.05	1000m	0.15	0.2	0.6	0	-0.1	1000m	0.05	0.15	0.5	0.5	-0.1
1300m		0.1	0.15	0.1	0.25	-0.05	1300m	0.05	0	0.2	-0.05	0.05	1300m	0.										



(二) 鹽度異常資料

	第一季					第二季					第三季					第四季									
	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N					
2005	0m	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	-0.2	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0	0.2			
	250m	0.1	-0.1	0	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0	0	0.1	-0.1	0.1	0	0	0.1	-0.1	0.1	0	0	0.1	0.1		
	500m	0	0	0	-0.2	0	0	0	0.2	0	0	-0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0		
	800m	0	0	-0.1	-0.05	0	0	0	0	-0.05	0	0	-0.05	0.1	-0.05	0	0	0.05	0	-0.05	0	-0.05	0		
	1000m	-0.05	0.05	0	-0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05	0.05	0	0.05	0	0	0	-0.05	0	0	-0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05		
	1300m	0	0	0	0	-0.01	0.01	-0.02	0.02	-0.02	0	0.01	-0.02	0.02	-0.02	0	0.01	-0.02	0.02	-0.02	0	-0.02	-0.02	0.01	
	1500m	0	0	-0.02	-0.01	-0.01	0	0	0.04	-0.02	-0.01	0	0	0.06	-0.02	-0.01	0.01	0	0	0	-0.02	-0.01	-0.02		
	1750m	0	0	-0.04	-0.01	-0.01	0	0	-0.02	-0.02	-0.01	0	0	0.02	0	-0.02	0	0	0	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01		
2000m	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.02	-0.01	0	0	0	-0.01	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.02		
2006	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
	0m	0	-0.2	0.2	0	0.2	0	0.2	-0.2	0	0	0	0	0.2	-0.2	0	-0.4	0.2	0	0	0	0.2	0	0.2	
	250m	-0.1	0	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0	0.1	0	0	
	500m	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	
	800m	0	0.05	0	-0.1	0	0	0.05	0	0	0	0	0	-0.05	0	0	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	
	1000m	0	0.05	0	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0	-0.05	0	0	0	0	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	
	1300m	-0.02	0	0	-0.02	0	0.02	0	-0.02	-0.02	0.01	0.02	0	-0.02	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02	-0.01	
	1500m	0.02	0	0	-0.01	-0.01	0	0	-0.02	-0.01	0	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	-0.02	0.01	-0.01	-0.01	
1750m	0	0	0.02	-0.01	-0.01	0	0	0	0.01	-0.01	-0.01	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01		
2000m	0	0	0	0	0.01	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01		
2007	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
	0m	0.4	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0	0	-0.2	0	0	0.4	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0.4	0.2	-0.2	0.2	
	250m	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	-0.1	0.1	0.1	0	0	0.2	0	0.1	0	0	0	0	0	0.2	-0.1	0	
	500m	0.1	0	-0.1	0.1	0	0	0	0.2	0	0	0	0	-0.1	0.1	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	
	800m	0	0.05	-0.1	0.05	0	0	0	-0.05	0	0	0	0	0	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1000m	0	0	-0.1	0.05	-0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	0	-0.05	
	1300m	0	0.01	-0.02	0.02	0	0	0	0.06	-0.04	0.01	0	0	0	0.02	-0.01	0	0	0.01	0.01	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	
	1500m	0	0.01	-0.02	0.01	-0.01	0	0	0	0.02	-0.01	0	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	
1750m	0	0	-0.04	-0.01	-0.01	0	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0	-0.01	0.02	-0.01	-0.02	0	0	0	0.02	-0.01	-0.01	-0.02		
2000m	0	0	0	0	-0.01	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	0	0	-0.01	0	0	-0.01	0	-0.01	0		
2008	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
	0m	-0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0	-0.2	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0	-0.2	0	0	-0.2	0.2	
	250m	0.1	0	0.1	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1	-0.1	0.1	0.1	0	
	500m	0	0	0	0	0	0	-0.1	0.2	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0	
	800m	0	0	-0.1	-0.05	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	0	0	0	
	1000m	0	0.05	0	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	0.05	-0.1	0	-0.05	
	1300m	0	0.01	0	0	-0.01	0.02	0.02	-0.04	-0.02	0.01	0.02	-0.02	0.04	-0.01	0	0	0.04	0.01	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	
	1500m	-0.01	0	0	0	0	0	0.01	-0.04	-0.02	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0	0	-0.01	0	0	
1750m	0.01	0	-0.02	-0.01	-0.01	0	0	-0.06	-0.02	0.01	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	0	0	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01		
2000m	0	0	0	0	0.01	0	0	0	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.01	-0.01		
2009	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
	0m	0.2	0	0	0.2	0	0	-0.4	0	0	0	0	0	-0.2	-0.2	0.2	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0.2	
	250m	0	-0.2	0.1	0	0	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	
	500m	0	-0.1	0	0.1	0	0	-0.1	0.1	-0.1	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	
	800m	0	0	-0.05	0	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05	
	1000m	0	0	0	0.05	-0.05	0.05	0	-0.05	0	0	0	0	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05
	1300m	0	0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.01	0.01	-0.04	-0.01	0	0	0	-0.04	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0
	1500m	0	0.01	0	-0.01	0	0	0.01	-0.04	-0.02	0.01	0	0	-0.04	0	0	0	-0.04	0	0	0.01	-0.02	0	0	
1750m	0	0.01	0	-0.01	-0.01	0	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0	0	0	-0.02	0	-0.01	0	0	0	-0.02	0	-0.01	-0.01		
2000m	0	0	0	-0.02	0	0	-0.01	0	-0.01	0	0	0	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2010	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
	0m	0.4	-0.2	0	0	0	0	-0.2	-0.2	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0.2	-0.2	0	0.2	0.2	0	0	-0.2	
	250m	0.1	0	0	-0.1	0.1	0.25	0	-0.1	0.1	0.1	0	0	-0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0	
	500m	0	0	-0.1	0	0	0	-0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	
	800m	0	0	-0.05	0	-0.05	0	0	-0.1	0	0	0	-0.05	0	-0.05	-0.05	0	0	0	0	-0.05	-0.1	0	0	
	1000m	0	0.05	-0.05	0	0	0	0.05	-0.05	0	0	0	0.05	0	-0.05	0	0	0	0	0	0	-0.05	0	0	
	1300m	0	0.01	-0.02	0	0	0	0.01	-0.04	-0.02	0.01	0	-0.01	0	-0.06	-0.02	0.01	0	-0.02	0	-0.02	-0.02	0.01	0.01	
	1500m	0	0.01	-0.02	0	0	0	0.01	-0.04	-0.02	0.01	0	0	0	-0.02	-0.01	0.01	0	0.01	0	-0.02	0	0	0.01	
1750m	0	0.01	0	-0.01	0	0	0.01	-0.02	-0.02	0.01	0	0.01	0	-0.01	0	0	0	0	0	0	-0.04	-0.01	0		
2000m	0	0.01	0	0	0	0	-0.01	-0.01	0																

	第一季	0° N					15° N					30° N					45° N					60° N					
		0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	
2013	0m	0.2	-0.4	0	-0.2	0	0m	0.2	-0.2	0	-0.2	0	0m	0	-0.2	0.2	0	0	0m	0.2	0	0.2	-0.2	0.2			
	250m	0.1	-0.1	0.1	0	0	250m	0.1	-0.2	0.1	-0.1	0	250m	0.1	0	0	0	0	250m	0	0.1	0.1	-0.1	0			
	500m	0	-0.1	0.1	0	0	500m	0.1	-0.1	0	0	0	500m	0	0	0	-0.1	0	500m	0	0	0.1	0	0			
	800m	0	0	-0.05	0	0	800m	0.05	0	-0.05	0	0	800m	0	-0.05	0	0	0	800m	0	0	-0.05	0	0			
	1000m	0.05	0	-0.05	0	0	1000m	0.05	0	-0.05	0	0	1000m	0.05	0	-0.05	0	0	1000m	0	0	-0.05	0	0			
	1300m	0.02	0	-0.06	0	0.02	1300m	0	0.02	-0.06	-0.02	0.02	1300m	0.02	0	-0.06	0.02	0.02	1300m	0.02	0	-0.02	0.02	0.02			
	1500m	0	0	-0.04	0	0.02	1500m	0	0	-0.04	0	0.02	1500m	0	0	-0.02	0.02	0.02	1500m	0	0	0	0.02	0.02			
	1750m	0	0	0	0	0	1750m	0	0	-0.02	0.02	0.02	1750m	0	0	-0.02	0	0.02	1750m	0	0	0	-0.02	0	0		
	2000m	-0.01	0	-0.02	0	0	2000m	-0.01	0	0	0	0.01	2000m	0	0	0	0	0	2000m	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	0			
2014	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
	0m	0.4	-0.2	0.4	-0.4	0	0m	0.6	-0.2	0.2	0.4	0.2	0m	0	0	0.2	0.6	0.2	0m	0.2	0.2	0.2	0	0.2			
	250m	0.2	0	0.1	0	0	250m	0	0	0.1	0.2	0	250m	0.1	0	0.1	-0.1	0	250m	0	0.1	0.1	0	0			
	500m	0	0	0	0.1	0	500m	0	0	0	0.1	0	500m	0	0	0	0	0	500m	0	0	0.1	0	0			
	800m	0	0	0	0.05	0	800m	0	0	0	0	0	800m	0	-0.05	0	0	0	800m	0	0	0	0	0	-0.05		
	1000m	0	0	-0.05	0	0	1000m	0.05	0.05	-0.05	0	0	1000m	0.05	0	-0.05	0	0	1000m	0	0	-0.05	0.05	0			
	1300m	0.02	0	-0.02	0.02	0.02	1300m	0.02	0.02	-0.02	0	0.04	1300m	0	0	-0.02	0	0.02	1300m	0	0	0	0	0			
	1500m	0.02	0	0.02	0.02	0.02	1500m	0	0	0	0.02	0.02	1500m	0	0	-0.02	0	0.02	1500m	0.02	0	0	0	0	0.02		
	1750m	0	0	-0.02	0	0	1750m	0	0	-0.02	0	0.02	1750m	0	-0.02	-0.02	0	0	1750m	0.02	0.02	-0.02	0	0.02			
2000m	0	0	-0.01	0	-0.01	2000m	0	-0.01	0	-0.01	0	2000m	0	0	0	-0.01	0	2000m	-0.01	-0.01	0	0	0				
2015	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
	0m	0.4	0	0	0.4	0	0m	0.2	0	0	-0.4	0	0m	0.4	0	0	-0.2	0.2	0m	0.2	0	0	-0.4	0.2			
	250m	-0.1	0	0.1	0.2	0	250m	-0.1	0.1	0.1	0	0	250m	-0.1	0.1	0.1	0	0	250m	-0.2	0.1	0.1	0	0			
	500m	0	-0.1	0	0.1	0	500m	0	0	0.1	0	0	500m	0	0	0.1	-0.1	0	500m	0	0	0.1	0.1	0			
	800m	0	0	0	0.05	-0.05	800m	0	0.05	0	0.05	-0.05	800m	0	0	-0.05	0	0	800m	0.05	-0.05	-0.05	0.05	0			
	1000m	0	0	0	0.05	0	1000m	0	0	0	0	0	1000m	0.05	0	0	0	0	1000m	0	0	-0.05	0.05	-0.05			
	1300m	0.02	0	-0.02	0.04	0	1300m	-0.02	0.02	0	0	-0.02	1300m	0	0.02	-0.02	0	0	1300m	0	0	0	-0.02	-0.02			
	1500m	0.04	0	-0.04	0	0.02	1500m	0	0	-0.02	0	0	1500m	0	0	0.02	0	-0.02	1500m	0	0	-0.02	0	0			
	1750m	0	0	-0.02	0	0.02	1750m	0	0	0	0	0.02	1750m	0	0	-0.02	0	0	1750m	0.02	0	-0.02	0	0			
2000m	0	-0.01	0	-0.01	0	2000m	0	-0.01	0	0	0.01	2000m	0	0	0	-0.01	-0.01	2000m	-0.01	0	-0.01	0	0				
2016	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
	0m	-0.4	-0.2	0	-0.6	0	0m	0.3	0	0	0.4	0	0m	0.4	0.2	0.2	-0.4	0	0m	0.4	0	0.4	-0.4	-0.2			
	250m	0	0.4	0.2	0	0.2	250m	0.2	0	0	0	0.2	250m	0.4	0.4	0.2	-0.4	0	250m	0.2	0.4	0.2	0.6	0			
	500m	0.2	-0.2	0	0.4	0	500m	0	-0.1	0.1	0	0	500m	0.1	0	0	-0.1	0	500m	0.1	0.2	0.2	0	-0.2			
	800m	0	0	0	0.05	-0.05	800m	0	0	-0.05	0	-0.05	800m	0	-0.05	-0.05	0.05	-0.05	800m	0	0	0.05	0.05	-0.05			
	1000m	-0.05	0	0	0.1	-0.05	1000m	-0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.05	1000m	0.05	0	0.1	0	0	1000m	0	0.05	0	0.05	-0.05			
	1300m	0.02	0	-0.04	0.04	-0.04	1300m	0	0.02	0.02	0	0	1300m	0	0.02	0	0	-0.02	1300m	0.02	0	0.08	0	-0.04			
	1500m	0.02	0	0	0.02	0	1500m	0.04	0	0	0.02	-0.02	1500m	0	0	0.02	0	-0.02	1500m	0	0	0.04	0	0			
	1750m	0	0	0	0	0	1750m	0	0	-0.02	0	0.02	1750m	0	0	0	0	0	1750m	0	0	0.02	0	0			
2000m	0.02	0	0	-0.02	0	2000m	-0.02	0	-0.02	-0.02	0	2000m	-0.02	0	-0.02	0	0	2000m	-0.02	0	0.02	0.02	0				
2017	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
	0m	0	0	0.2	0.4	-0.2	0m	0.4	-0.2	0	0.4	0	0m	0	0	0.4	0.2	-0.2	0m	0	0	0.4	0.4	0.2			
	250m	0.4	0.4	0.2	0.4	0	250m	0.4	-0.4	0.2	0	0.2	250m	0.4	0.4	0.2	-0.2	-0.2	250m	0.2	0.2	0.4	0.6	0.2			
	500m	0	0	0.05	-0.05	0	500m	0.1	-0.1	0.1	0	0	500m	0.2	0	0.1	0	0.2	500m	0.1	0	0.2	0	0			
	800m	0	0	0.05	0.05	-0.05	800m	0.05	0	0.1	0	0	800m	0.05	0	0.1	0.05	0	800m	0.05	0	-0.05	0	0			
	1000m	0	0	0.1	0.05	0	1000m	0	-0.05	0.05	0	-0.05	1000m	0	-0.05	0.05	0.05	-0.05	1000m	0	0	0.05	0	-0.05			
	1300m	0.02	0	0.02	0	-0.02	1300m	0.04	0	0.08	0	0	1300m	0	0	0.06	0	0	1300m	0.02	0	0.04	0	-0.02			
	1500m	0.04	0	0.04	0	-0.02	1500m	0	0	0.02	0	0	1500m	0	0	0.04	0	-0.02	1500m	0.02	0	0	0	0	-0.02		
	1750m	0	0	0	-0.02	0	1750m	0	0	0	0	0.04	1750m	0	0	0	0.02	0	1750m	0	0	-0.02	0	0			
2000m	-0.02	0	-0.02	0	0.02	2000m	-0.02	0	-0.02	0	0	2000m	-0.02	0	0	0.02	0	2000m	0	-0.02	0	0.02	0				
2018	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N			
	0m	0.4	0.2	0.2	0.6	0	0m	0	-0.2	0.2	0	-0.2	0m	0	0	0.2	0	0	0m	0.2	0.2	0.2	0.4	0			
	250m	0	0	0.2	0.4	0	250m	-0.2	-0.6	0.2	0	0	250m	-0.2	0	0.2	0	0.2	250m	-0.2	0.2	0.4	0.6	0			
	500m																										



	2013					2014					2015					2016					2017					2018					2019					2020											
	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第二季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第三季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N	第四季	0° N	15° N	30° N	45° N
0m	0.1185	-0.4245	-0.075	-0.1935	0	0.0435	-0.2685	-0.0375	-0.306	-0.0375	0	-0.1125	-0.2685	0.081	-0.15	0.075	0	0.1185	-0.075	0.0435	-0.156	-0.1185	0	0.2745	-0.156	0.1245	-0.162	0	0.4305	-0.156	0.0435	0.312	0.081	0	-0.0375	0	-0.0315	0.468	0.006	0	0.156	0.081	0.006	0	0.156		
250m	0.003	-0.0585	0.0585	-0.15	-0.0195	250m	0.003	-0.024	0.021	-0.0975	-0.0375	250m	0.078	-0.057	-0.057	-0.075	-0.0195	250m	0.057	0.0975	0.021	-0.153	-0.0195	250m	0.0195	0.0195	-0.0945	-0.0165	-0.0375	500m	0	0.0375	-0.0375	0.0975	-0.0195	500m	-0.0195	-0.0195	-0.057	-0.075	-0.0375	500m	-0.057	-0.057	0.021	-0.075	0
500m	-0.0195	-0.0585	-0.1155	-0.075	-0.0375	500m	0.0405	-0.0405	-0.0195	0.057	-0.0375	500m	-0.0375	-0.0375	-0.057	-0.0975	-0.0195	500m	-0.0375	-0.0195	0.021	-0.075	-0.0195	500m	-0.0195	-0.0195	-0.0375	0.0765	-0.0195	800m	-0.0195	-0.0195	-0.057	-0.0195	800m	-0.0195	-0.0585	-0.0375	-0.057	-0.0195	800m	-0.0195	-0.0375	-0.075	-0.0375	-0.0585	
800m	-0.0195	-0.057	-0.0585	-0.0375	-0.057	800m	0.0195	-0.0195	-0.0585	0.0195	-0.0375	800m	-0.0195	-0.0765	-0.0375	-0.0375	-0.0375	800m	-0.0375	-0.0195	-0.096	-0.0195	-0.0375	800m	-0.0375	-0.0195	-0.0375	-0.0375	-0.0375	1000m	-0.0375	-0.0195	-0.0375	-0.0375	1000m	-0.0375	-0.0195	-0.0375	-0.0375	-0.0375	1000m	-0.0375	-0.0195	-0.0375	-0.0375	-0.0375	
1000m	0.024	-0.0225	-0.0015	-0.075	-0.0375	1000m	0.0315	-0.0225	-0.0165	-0.045	-0.0525	1000m	0.0315	-0.0225	0.036	-0.0525	-0.0375	1000m	-0.0225	-0.0075	-0.024	-0.0675	-0.0375	1000m	-0.0225	-0.0075	-0.0375	-0.0375	-0.0375	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0168	-0.0219	-0.0369	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0168	-0.0219	-0.0369	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0231	-0.0369	-0.0369
1300m	0.0081	-0.0075	-0.0168	-0.03	-0.0369	1300m	-0.0075	0.0081	-0.0468	-0.0231	-0.0444	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0168	-0.0219	-0.0369	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0231	-0.0369	-0.0369	1300m	-0.0069	-0.0075	-0.0375	-0.0375	-0.0375	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0162	-0.03	-0.0219	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0081	-0.0144	-0.0369	1500m	0	-0.0075	-0.0225	-0.0294	-0.0219
1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0312	-0.03	-0.0219	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0162	-0.03	-0.0219	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0081	-0.0144	-0.0369	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0081	-0.0144	-0.0369	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0375	-0.0375	-0.0375	1750m	-0.00375	0	0.1125	-0.0225	-0.01875	1750m	-0.00375	0	-0.0006	-0.01875	-0.0144	1750m	-0.00375	0	-0.0006	-0.01875	-0.0144
1750m	-0.00375	0	0.1125	-0.0225	-0.01875	1750m	-0.0225	-0.015	-0.0006	0.00435	-0.0069	1750m	-0.015	0	-0.0006	-0.01875	-0.0144	1750m	-0.015	0	-0.0006	-0.01875	-0.0144	1750m	-0.015	0	-0.0006	-0.01875	-0.0144	2000m	-0.01155	-0.01875	-0.01185	-0.01125	-0.015	2000m	-0.01155	-0.01875	-0.01125	-0.015	2000m	-0.01155	-0.01875	-0.01125	-0.015		
2000m	-0.01155	-0.01875	-0.01185	-0.01125	-0.015	2000m	0.01155	0.01125	0.00375	0.00375	-0.0225	2000m	-0.00375	-0.00375	-0.01125	0	0	2000m	-0.00375	-0.00375	-0.01125	0	0	2000m	-0.00375	-0.00375	-0.01125	-0.01125	-0.01125	2000m	-0.004405	-0.004405	-0.0222	-0.01065	0.0075	2000m	-0.004405	-0.004405	-0.0222	-0.01065	0.0075						

圖 5-3：北大西洋 2005~2020 年密度異常資料









(四) 上層染色水體水平擴散到下方側邊寶特瓶時，各水管水平擴散的長度與編號

密度	溫度(°C)	鹽度(‰)	管 1	管 2	管 3	管 4	管 5
996	40	0.20		15	7		
	36	0.10		15	15		
	31	0.00			15	10	
998	38	0.40		15	10		
	33	0.30		15	14		
	28	0.20			15	4	0
	22	0.10			15	8	0
	17	0.00			15	15	6
1000	40	0.70		15	13		
	35	0.60		0	15		
	30	0.50		1	15	1	
	25	0.40			15	10	
	20	0.30			15	6	1
	14	0.20			15	10	2
	9	0.10			15	14	7
	4	0.00				15	15
1002	37	0.90		15	15		
	32	0.80		3	15	1	
	27	0.70			15	5	
	22	0.60			15	11	
	17	0.50			15	14	5
	11	0.40			14	15	10
	6	0.30				15	12
	1	0.20				15	15
1004	29	1.00		2	15	2	
	24	0.90			15	6	
	19	0.80			15	10	
	14	0.70			15	14	5
	9	0.60			12	15	13
	3	0.50				15	14
1006	16	1.00			15	5	1
	11	0.90			15	10	5
	6	0.80			15	14	11
	0	0.70				13	15

圖 5-7：模擬實驗染色水體水平擴散至下方側邊寶特瓶，各管水平擴散長度紀錄表

## 陸、討論

- 一、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生密度負異常時，是否會使得溫鹽環流停止下沉、發生水平擴散的深度變淺？

答：表層密度發生負異常時，也就是表層密度下降時，在 250m 與 500m 的深度有正梯度，在 800m、1000m 則有些微的負梯度，代表北大西洋下沉流，在垂直下沉至 800m 前就停止下沉，並發展成水平擴散。表層密度發生正異常時，250m、500m、800m 皆有正梯度，在深度 1000m 以下的深度，近乎無密度梯度，代表北大西洋下沉流，在深度 1000m 前就停止下沉，並發展成水平擴散。且當表層密度發生正異常時，在 250m 與 500m 的深度密度梯度較表層密度負異常時大，顯示在下沉流停止垂直下沉前的水平擴散，也會在表層密度正異常時，有較強的趨勢。

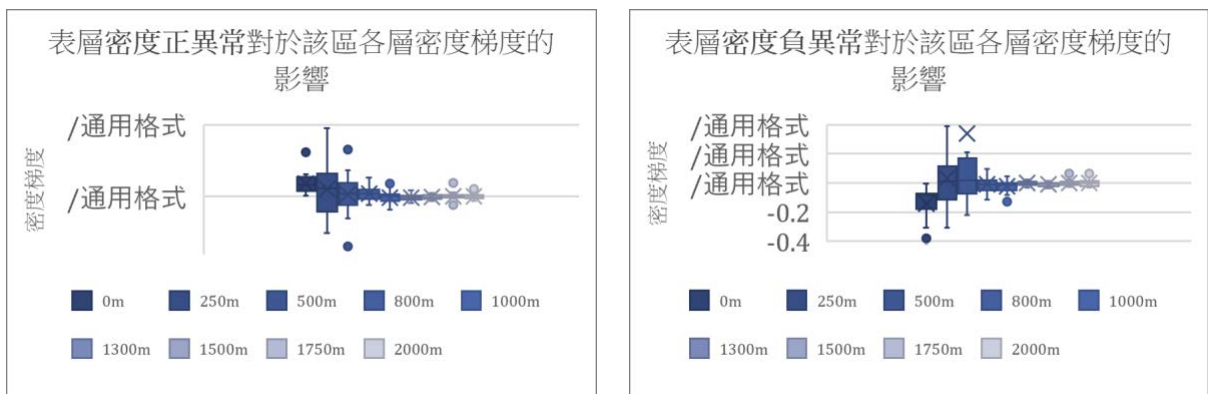


圖 6-1：表層密度異常與該區各層密度梯度的盒鬚圖

二、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生密度負異常時，中層的海水密度是否會發生正異常，而深層的海水密度是否會發生負異常？

答：表層海水的密度變化，確實會影響到下方各層的海水密度，當表層海水密度增加（呈現正異常時），會讓深度在 250m 內的海水密度呈現正異常，而從 500m 開始一直到 2000m 深的海水，密度都呈現負異常，與假設相同。當表層海水密度降低（呈現負異常時），下方各層海水的密度負異常，在 1000m 內隨深度遞減，在 750~1000m 的地方則隨深度增加，1000~2000m 在隨深度遞減，整體而言，當表層海水密度呈現負異常時，下方各層海水的密度均呈現負異常。在深度超過 750m 的海域，不論表層海水密度如何改變，密度皆為負異常。合理的解釋是，北大西洋下沉流的影響僅影響至 750m 深，對於超過 750m 深的海域，其溫度與鹽度的影響可能是受其他洋流影響的程度較大，例如：南極底層流。

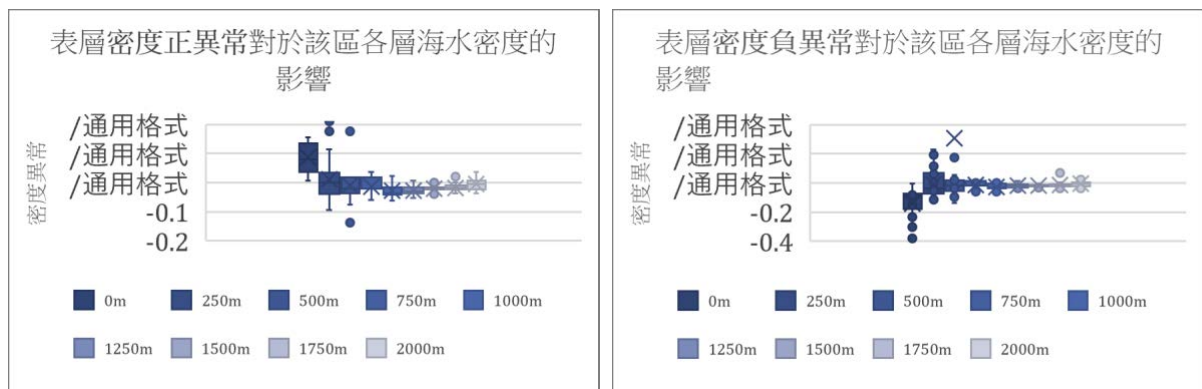


圖 6-2：表層密度異常與該區各層密度異常的盒鬚圖

三、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生鹽度負異常時，是否會使得溫鹽環流停止下沉、發生水平擴散的深度變淺？

答：當表層海水發生鹽度負異常時，在深度 1000m 內的鹽度梯度為負梯度，轉換成密度則為正梯度，在深度 1250m 無鹽度梯度與密度梯度，代表下沉流在深度 1250m 前停止下沉，轉換成水平擴散。當表層海水發生鹽度正異常時，在中層與深層的梯度

趨勢類似表層鹽度負異常的情況，但是梯度較小。我們的解釋為在真實的海洋現場，表層鹽度為正異常時，通常是表層海水溫度負異常，海冰增加而導致。所以可能在溫度負異常且鹽度正異常時，密度流有較強的流動趨勢與混合作用，導致下層的鹽度梯度差異較小。

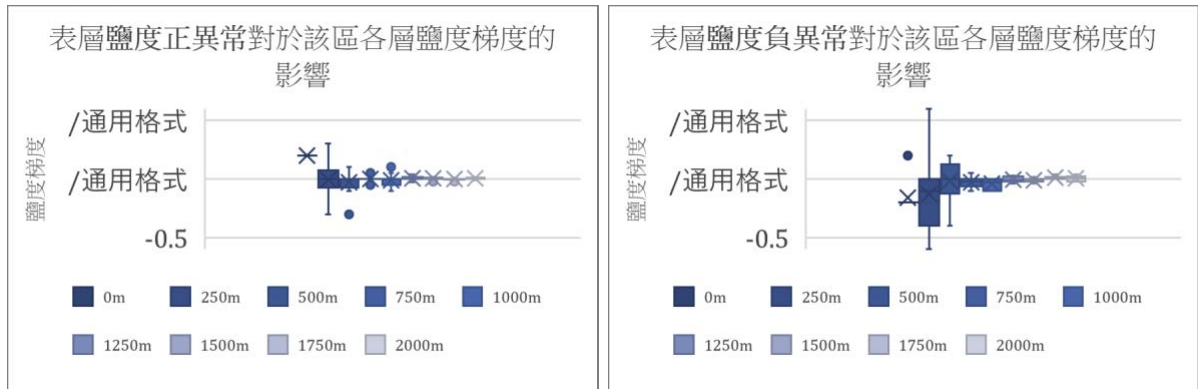


圖 6-3：表層鹽度異常與該區各層鹽度梯度的盒鬚圖

四、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生鹽度負異常時，中層的海水鹽度是否會發生正異常，而深層的鹽度是否會發生負異常？

答：當表層海水發生鹽度負異常時，在深度 250m 的鹽度為負異常，深度 500m 的鹽度為正異常，與假設相同。當表層海水發生鹽度正異常時，在深度 800m 內近乎沒有異常，在深度 1000m 的鹽度為負異常，在深度 1250m 與 1500m 的鹽度為正異常，與假設相同。表層鹽度為正異常時，中層與深層的鹽度異常較小，與討論三的情況類似，所以我們認為原因應該與討論三相同，是此情況的混合作用較強所致。

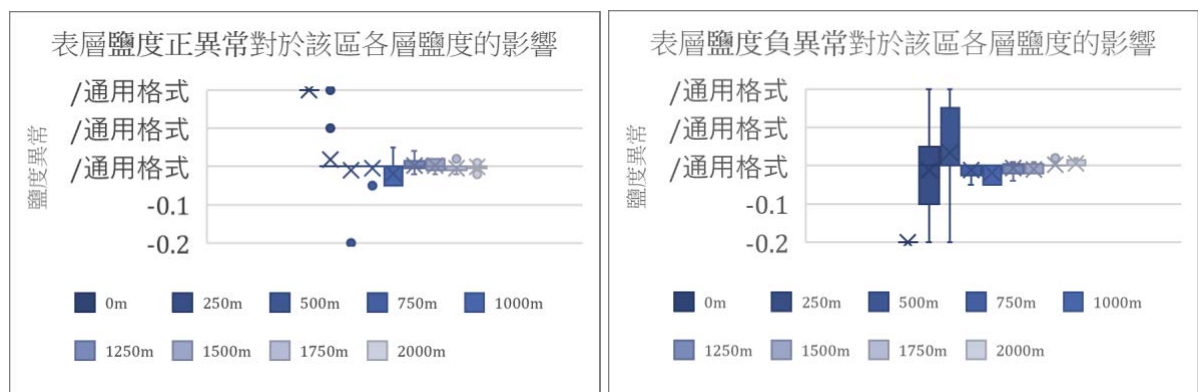


圖 6-4：表層鹽度異常與該區各層鹽度變化的盒鬚圖

五、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生溫度正異常時，是否會使得溫鹽環流停止下沉、發生水平擴散的深度變淺？

答：當表層海水發生溫度正異常時，在深度 250m、500m 的溫度為負異常，轉換成密度後應為正異常。在深度 800m 的溫度異常近為無異常，代表當海水溫度發生正異常時，下沉流垂直下沉的深度應在 800m 前趨緩，轉為水平擴散。當表層海水發生溫

度負異常時，在深度 250m 到 1300m 皆有溫度負異常，轉換成密度後為密度正異常，而密度正異常狀態直到深度 1500m 趨緩，轉為無異常。代表下沉流垂直下沉的深度應在 800m 前趨緩，轉為水平擴散。相較於表層溫度正異常時，除停止垂直下沉的深度較深外，在各層的密度梯度也較大，代表在垂直下沉的同時，也有較強的水平擴散趨勢。

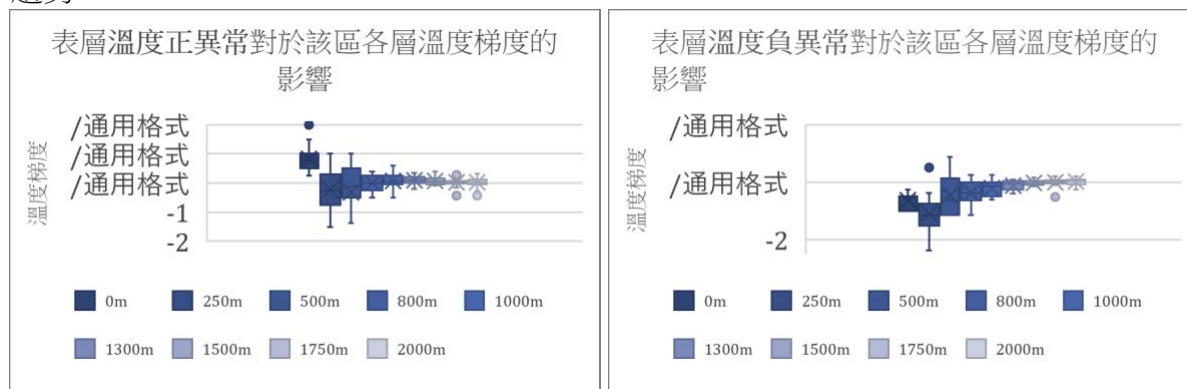


圖 6-5：表層溫度異常與該區各層溫度梯度的盒鬚圖

六、當北大西洋格陵蘭南部海域表層海水(30°W、60°N、0m)發生溫度正異常時，中層的海水溫度是否會發生正異常，而深層的温度是否會發生負異常？

答：當表層海水發生溫度正異常，也就是表層溫度上升時，中層海水的溫度會發生正異常，深層的温度會發生相對微弱正異常。當表層海水發生溫度負異常，也就是表層溫度下降時，中層溫度會發生負異常，而深層溫度會發生正異常。所以除了在表層溫度正異常的中層情形與假設不符外，其他部分皆符合。

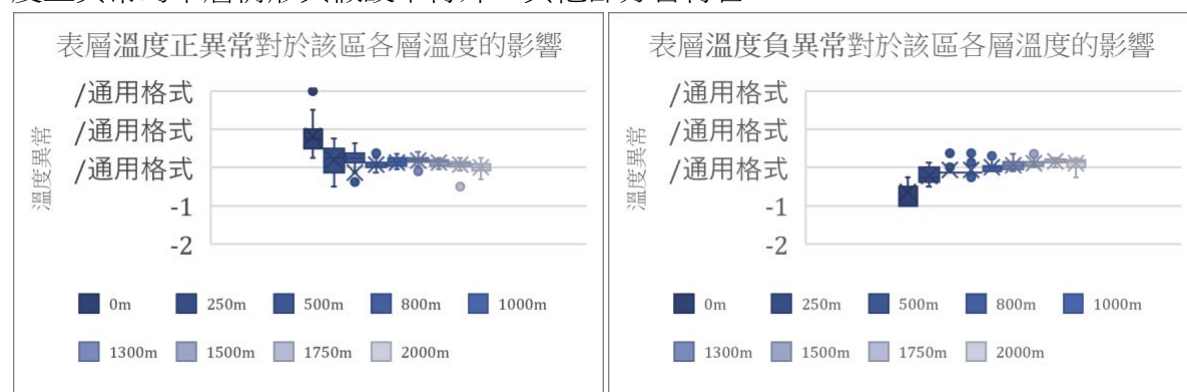


圖 6-6：表層溫度異常與該區各層溫度變化的盒鬚圖

七、若將 NOAA 的溫度資料、鹽度資料各自轉換成密度資料後進行比較，在海洋現場中鹽度異常對於各層海水性質與洋流的形式影響較大，還是溫度異常的影響較大？

答：北大西洋格陵蘭南部海域表層海水的溫度異常範圍 2°C，而鹽度的異常範圍則為 0.4‰。將溫度與鹽度異常範圍參考海水狀態方程式，溫度異常造成的密度異常範圍 0.3 單位，鹽度異常造成的密度異常範圍是 0.312 單位，影響程度略高於溫度 4%，代



表在海洋現場中鹽度的影響較溫度明顯。在新仙女木事件的例子中，我們曾經認為淡水強制力的發生是因為北大西洋格陵蘭南部海域表層海水因為全球回暖使其溫度上升而無法下沉，現在更確定新仙女木事件發生的原因，應該是表層鹽度因為被北半球陸地融冰產生的淡水而下降。

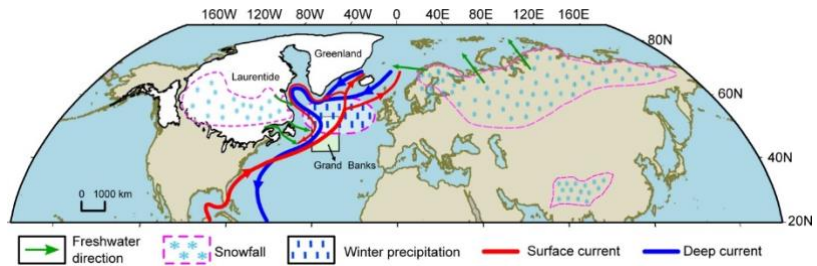


圖 6-7：新仙女木事件發生原因與溫鹽環流發源地示意圖

八、在模擬實驗中，上層染色水體垂直沉降至下方寶特瓶底部所需的時間，是否與上層水體的密度呈現負相關？

答：由圖表也可以看出，密度增加時下沉至底部所需時間較短，代表密度與下沉速率呈正相關，與所需時間呈負相關。另外固定密度的情況下，上層水體在高溫高鹽時垂直下沉至底部所需時間較長，代表下沉速率較慢，我們認為是在上層水體溫度較高，與下層水體溫度差異較小時，因為無法與下層水體進行溫度平衡，進而達到降溫增加密度，所以下沉時間較長。

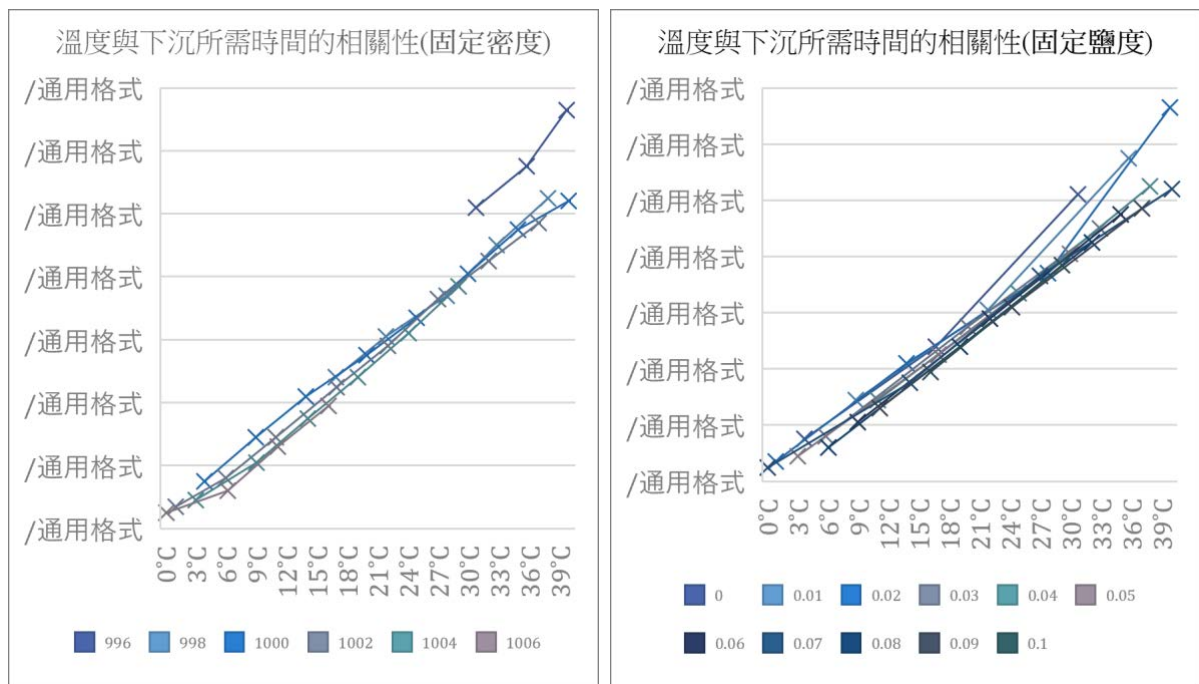


圖 6-8：溫度與下沉所需時間的相關性

九、在模擬實驗中，上層染色水體水平擴散至下方側邊寶特瓶所需的時間，是否與上層水體的密度呈現負相關？



答：由圖表也可以看出，密度增加時，水平擴散至下方側邊所需時間較短，代表密度與水平擴散速率呈正相關，與所需時間呈負相關。另外在密度固定的情況下，當上層水體溫度較高鹽度較高時，水平擴散的速率減慢，我們認為是在上層水體溫度較高，與下層水體溫度差異較小時，因為無法與下層水體進行溫度平衡，在下沉時與下層水體進行混合、進而達到降溫與增密，所以下沉時間較長。

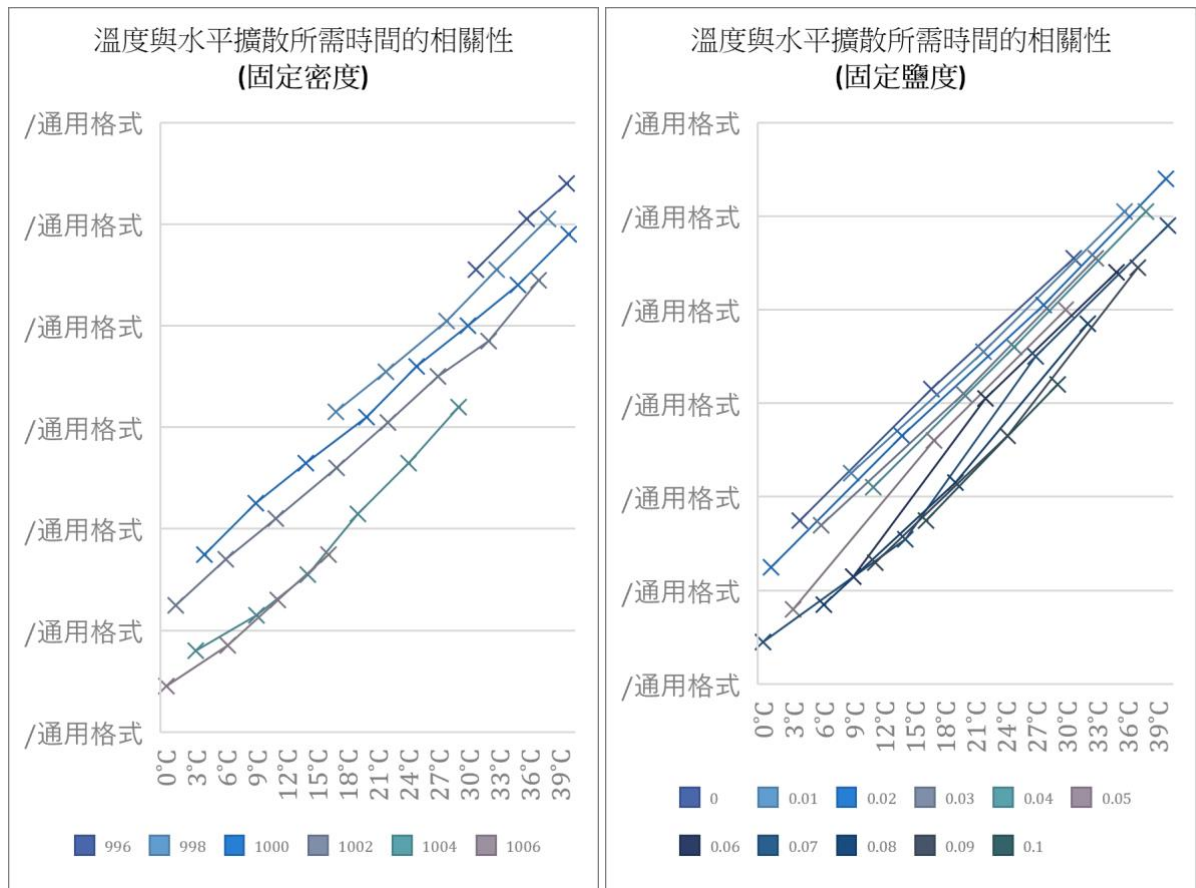


圖 6-9：溫度與水平擴散所需時間的相關性

十、在模擬實驗中，上層染色水體水平擴散的深度，是否與上層水體的密度呈現負相關？

答：在固定密度時，低溫低鹽的情況下相較於高溫高鹽的情況，垂直下沉後轉為水平擴散的深度較淺。我們認為上下層水體溫差較大的情況下，會因為上層冷水體會與下層暖水體平衡溫差，上層冷水體溫度升高密度下降，所以下沉的深度會減少，在海洋現場中，因上層水體溫度較高，所以會與模擬實驗的結果不同，是在密度相同，溫度增加鹽度增加的情況下減少垂直下沉的深度。在圖 4-7 的實驗中，雖然在水平擴散的水管編號看不大出來下層水體密度與水平擴散深度的關係，但是若以第三管為基準，可以看出在密度增加時，第四管與第五管的水平擴散長度比例增加，此現象可視為水平擴散的深度增加，因此符合假設。

十一、在模擬實驗中，上層染色水體水平擴散的吸管數，是否與上下層的溫差呈現正相關？

答：在模擬實驗中，我們並沒有在實驗數據中看出兩者的相關性。所以我們額外做了實驗，一樣將下層水體固定成 40 度的淡水，上層將溫度定為 0~40 度，鹽度則在 0%~4%，從實驗可以看出在上層水體低溫高鹽的情況下，水平擴散的深度較深，管數較多。在上層水體高溫低鹽的情況下，水平擴散的深度較淺，管數較少。另外上層溫度固定，鹽度增加的情況下，水平擴散的深度增加，但是管數近乎沒有差異。但是在上層鹽度固定溫度降低時，水平擴散的管束有從 2 管增加至 3 管。代表在上下層溫差較大時，水平擴散的吸管數會增加，呈現出正相關趨勢，與假設符合。

水平擴散發生的深度 (吸管編號)		上層溫度				
		0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
上層鹽度	0%	3~5	3~4	2~3	2~3	2~3
	1%	3~5	3~5	3~4	2~4	2~3
	2%	3~5	3~5	3~4	3~4	3~4
	3%	3~5	3~5	3~4	3~4	3~4
	4%	3~5	3~5	3~5	3~4	3~4

圖 6-12：水平擴散發生的深度的追加實驗紀錄

十二、在模擬實驗中，上層染色水體水平擴散至下方側邊寶特瓶時，將染色水體在各管的水平擴散的邊界繪出。在上層染色水體溫差較大時，是否長度會較為一致？

答：在上層密度固定的情況下，當上層低溫度且低鹽度時，染色水體在各管水平擴散的長度，較上層水體為高溫高鹽一致。在上層鹽度固定的情況下，當上層溫度較低時，染色水體在各管水平擴散的長度，較上層水體為高溫高鹽一致。溫差較大時水平擴散的鹽指較短胖，與假設相同。

## 柒、 結論

- 一、 當表層海水因為溫度上升使密度下降時，密度流停止下沉轉為水平擴散的深度變淺。
- 二、 當表層海水因為鹽度下降使密度下降時，密度流停止下沉轉為水平擴散的深度變淺。
- 三、 當表層海水因為溫度上升或是鹽度下降，使表層海水密度下降時，中層海水的鹽度與溫度會產生正異常，深層海水的鹽度與溫度會產生負異常。
- 四、 當表層海水密度下降時，會使垂直下沉與水平擴散的速度減慢。
- 五、 在上下層海水密度差相同的情況下，表層溫度與鹽度較高時，產生的鹽指較為粗短。

## 捌、參考文獻與資料

- 一、 Heat Content Figures - Yearly, Pentadal, and 3-Month for 0 - 2000 m depth layer  
<https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/bin/heatfig2.pl?action=start>
- 二、 Salinity Yearly, Pentadal, and 3-Monthly Anomaly Figures  
<https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/bin/anomfigs.pl?action=start>
- 三、 海底輸送帶 溫鹽環流與氣候變遷的關係。2017 全國科學探究競賽。  
<http://sciexplore2017.colife.org.tw/Upload/d0193829-8ce6-4d74-aca3-424176a3d3cc-20170411113353095.pdf>
- 四、 驚天「凍」地-深海環流之探討。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。  
<https://twsec.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-080507.pdf>
- 五、 范凱翔(無日期)。全球溫鹽環流輸送帶與氣候之間的影響。  
<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2015/11/2015111223221461.pdf>
- 六、 全球海洋深層大循環 (The Global Ocean Conveyor)  
<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=38544>
- 七、 M. G. Wells<sup>1</sup> and R. W. Griffiths, Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra, A.C.T., Australia, Received 4 April 2001; revised 16 July 2002; accepted 23 July 2002; published 15 March 2003. Interaction of salt finger convection with intermittent turbulence  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JC001427>
- 八、 北大西洋示踪劑  
[https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/29/7/1520-0485\\_1999\\_029\\_1404\\_tcosft\\_2.0.co\\_2.xml?tab\\_body=abstract-display](https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/29/7/1520-0485_1999_029_1404_tcosft_2.0.co_2.xml?tab_body=abstract-display)
- 九、 新仙女木事件(民 104 年 7 月 8 日)。高瞻自然科學教學資源平台。  
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=63934>
- 十、 Importance of salt fingering for new nitrogen supply in the oligotrophic ocean(2015.9)  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26350062/>  
大西洋子午傾覆環流的驅動過程。

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004RG000166>

十一、物理海洋知識點。

<http://m.mnr.gov.cn/zt/hyang/hyzsjs/xzzx/201812/P020181229548184519912.pdf>

海洋教育部年度工作報告(2014.12)。

<http://www.qnlm.ac/hydlgcyqh/common/upload/20160428/185933064780.pdf>

十二、菲克定律。維基百科。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%8F%B2%E5%85%8B%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

十三、海洋狀態方程式(密度)。

<http://mail.atm.ncu.edu.tw/~hong/OceanDynamics/chap02/Fig01-15a.htm>

十四、田家康。氣候文明史-改變世界的攻防八萬年，臉譜出版社。

## 【評語】 051902

本研究收集 NOAA 網站資料，包括海水溫度及鹽度，來獲得北大西洋海水不同深度上中下水層鹽度，同時設計簡單的寶特瓶水體擴散實驗，來模擬北大西洋的海水分層。報告撰寫非常的完整，利用簡單寶特瓶水體的科學實驗，是個很好的點子。實驗數據的紀錄非常詳盡，很有科學精神。是個很不錯的科學專題研究。實驗結果的圖都畫得很好，但引用文獻者例如圖 1-1、1-2、1-3、1-4 應該說明來源。實驗室模擬跟實際海洋不一樣，應說明適用性。並更具焦的彙整分析，以凸顯研究之創新結果。

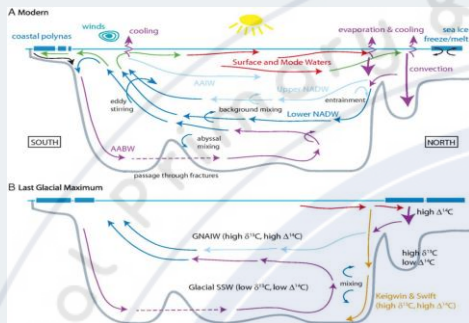
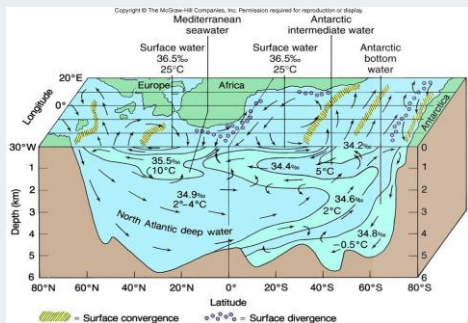
## 作品簡報



# 你的『海水拿鐵』要分層 還是漸層？

- 表層海水變化對密度流的影響 -

# 動機



## 北大西洋下沉的原因？

北大西洋表層的鹽度下降or 南極融冰使得溫度驟降  
 →密度流受溫度、鹽度的影響

## 狀態方程式(equation of state)

$$\rho = \rho_0 + a(T - T_0) + b(s - s_0) + \kappa p$$

$\rho_0$  - 密度參考值：1027 kg/m<sup>3</sup>

$T_0$  - 溫度參考值：10 °C

$s_0$  - 鹽度參考值：35 psu

## 密度、鹽度與溫度的關係

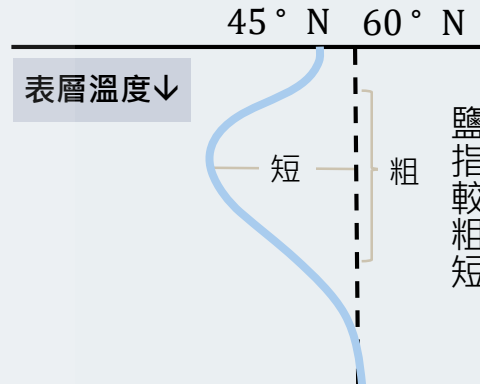
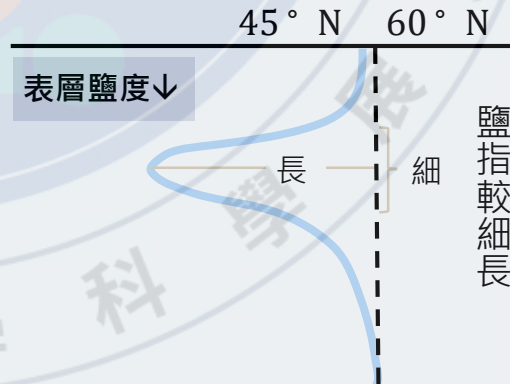
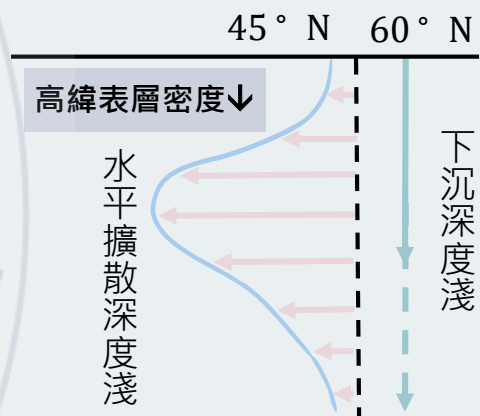
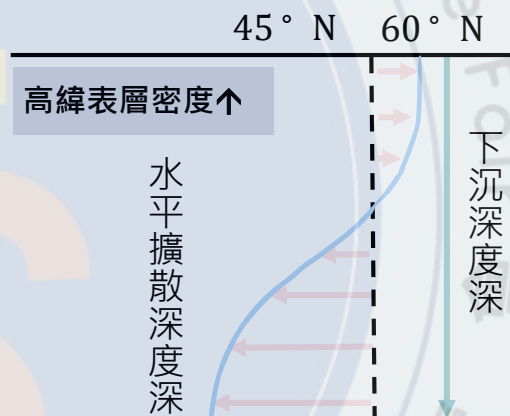
溫度每增加1 °C 密度下降0.15 單位

鹽度每增加0.1 % → 密度增加0.75 單位

# 依據

## 假設

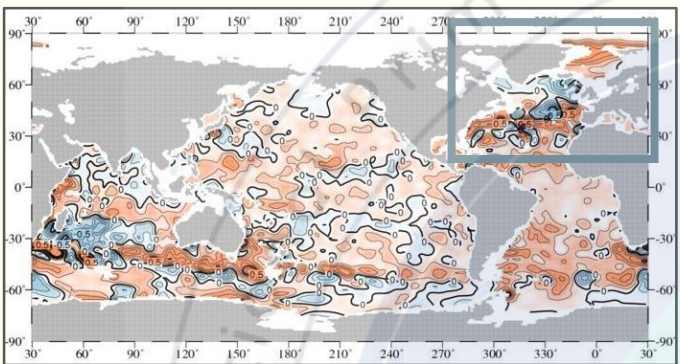
表層	原始狀態	密度大 (高鹽低溫)	密度異常	密度稍大 (低鹽高溫)
中層	溫↓ 鹽↓ 梯度↓	弱	溫↑ 鹽↑ 梯度↑	強
深層	溫↑ 鹽↑ 梯度↑	強	溫↓ 鹽↓ 梯度↓	弱





# 研究方法

NOAA現場觀測數據

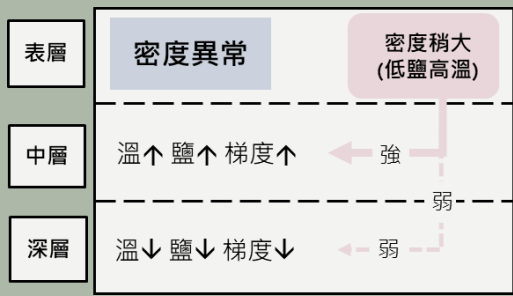


	第一季	0° N	15° N	30° N	45° N	60° N
2005	0m	-0.075	-0.075	-0.15	-0.3	-0.075
	250m	0.0405	-0.003	-0.057	-0.0315	0
	500m	-0.0375	0.0195	0	-0.1935	-0.0195
	800m	-0.0195	0	-0.1155	-0.0015	0
	1000m	-0.0465	0.039	-0.075	-0.0165	-0.0315
	1300m	-0.0225	-0.0075	0	0.015	-0.0153
	1500m	-0.0075	-0.0075	-0.0156	0.0147	-0.0078
	1750m	-0.00375	-0.00375	-0.01995	0.00345	0.0672
	2000m	0	0	0	0	0

## 示性實驗

上層密度		上層鹽度(0~4%)		
		正異常	無異常	負異常
上層溫度(0~40°C)	正異常	略大於下層		
	無異常	正異常一單位		
	負異常	正異常二單位	正異常一單位	略大於下層





### 表層正異常

250m內正異常

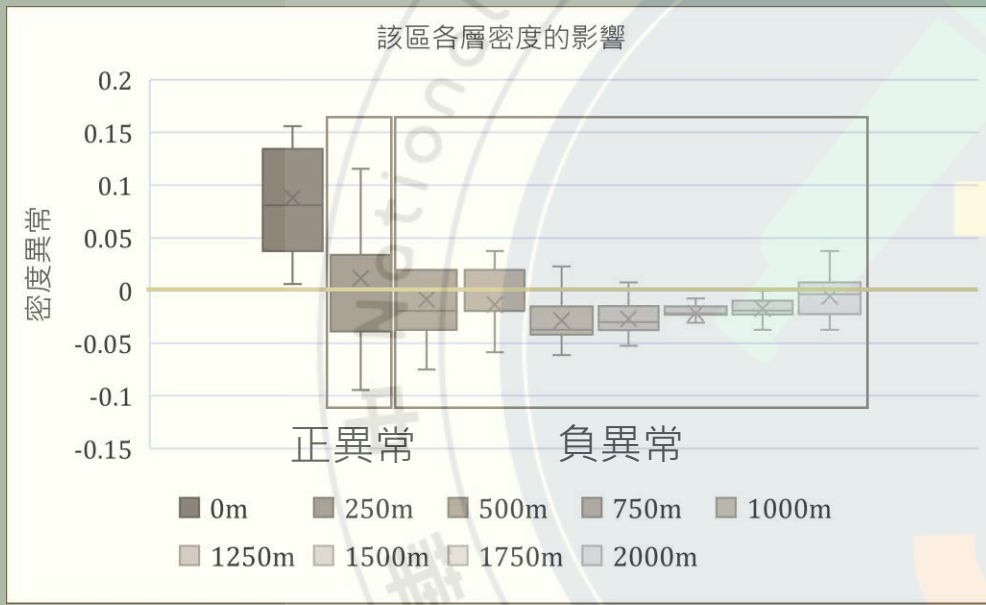
500m~2000m負異常

### 表層負異常

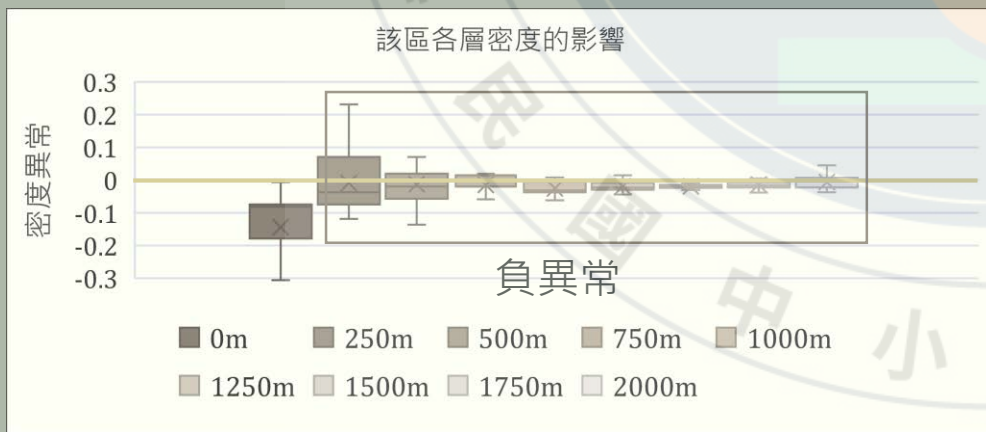
以下均呈現負異常

# 密度異常值

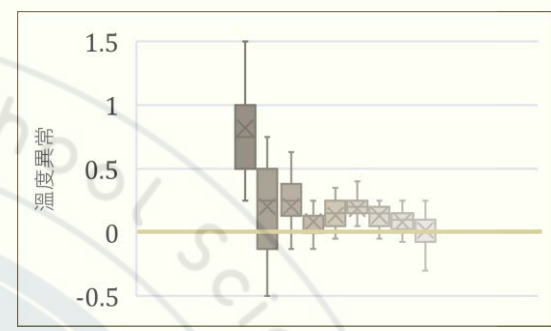
## 正異常



## 負異常

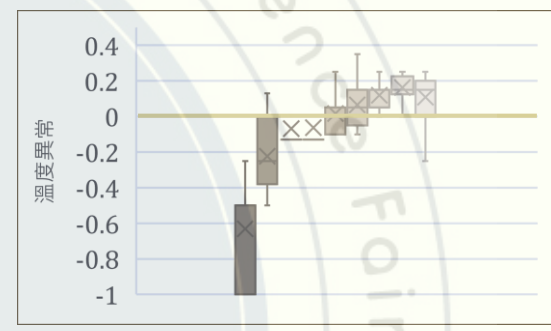


# 溫度異常值



## 正異常

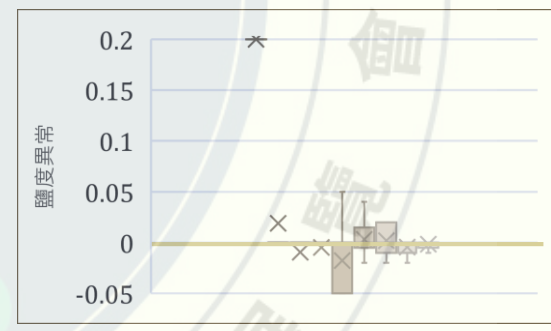
中層：正異常  
深層：微弱正異常



## 負異常

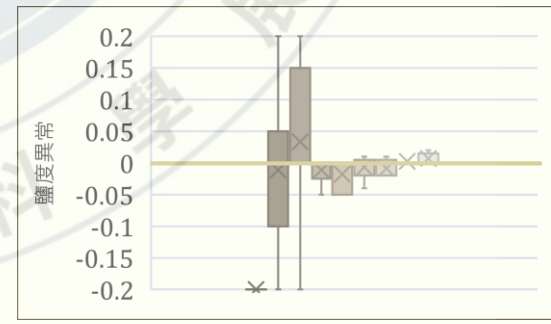
中層：負異常→與假設不符  
深層：正異常

# 鹽度異常值



## 正異常

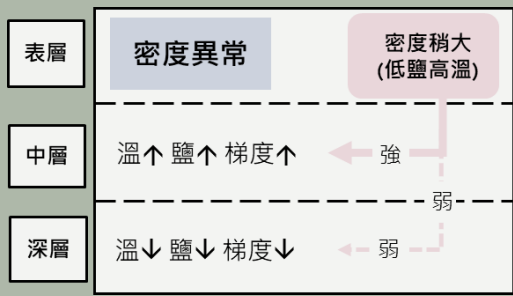
250~800m：近乎無異常  
1000m：負異常  
1250~1500m：正異常  
混合作用較強→  
中深層的鹽度異常較小



## 負異常

250m：負異常  
500m：正異常



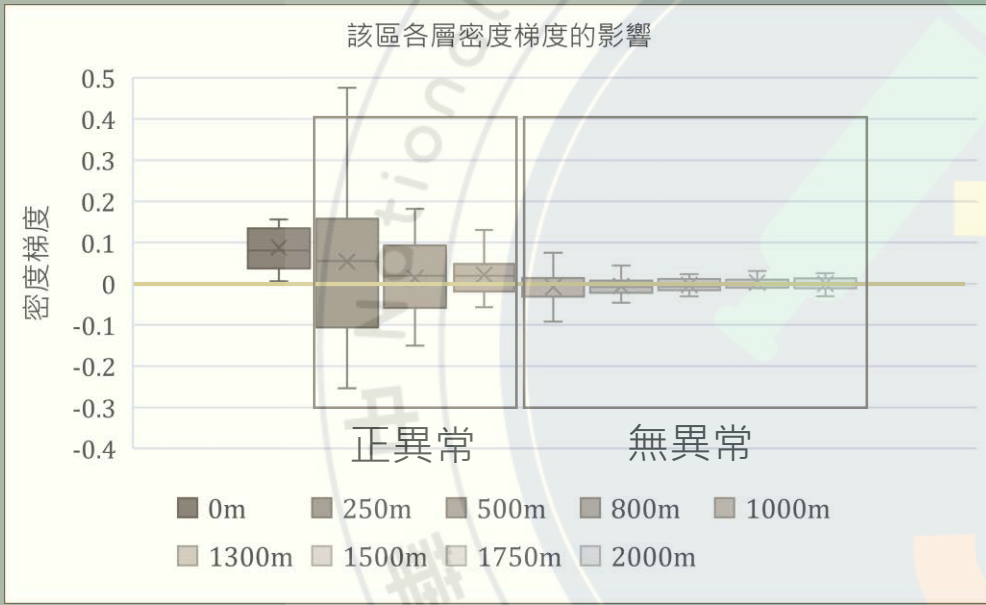


**表層正異常**  
 水平擴散深度1000m  
 停止下沉前的水平擴散有較大趨勢

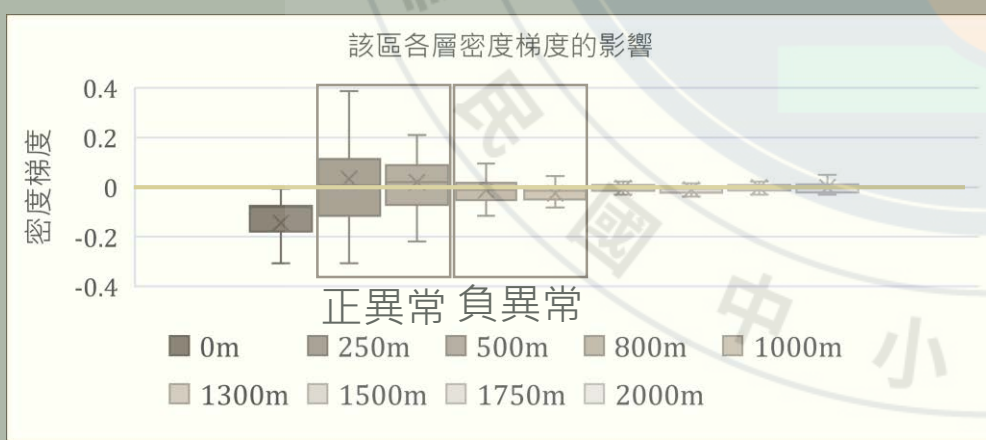
**表層負異常**  
 水平擴散深度800m

# 密度異常值

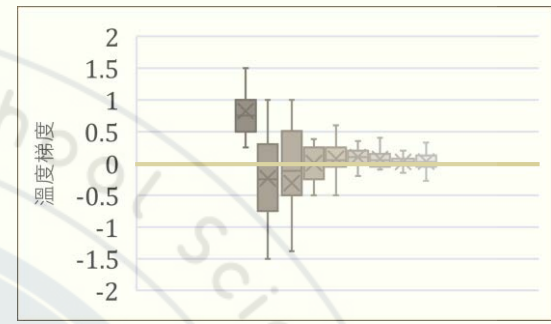
## 正異常



## 負異常

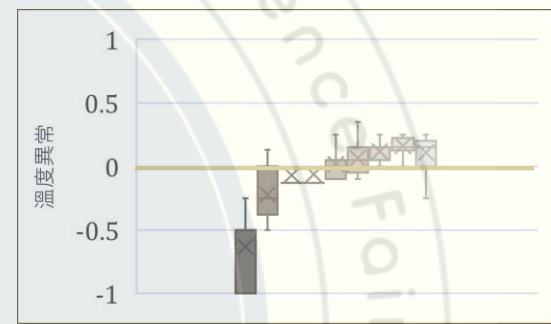


# 溫度異常值



## 正異常

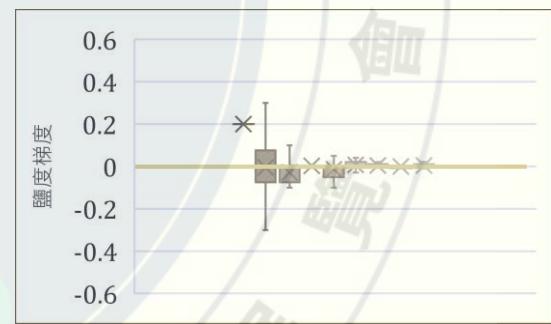
250~500m：負異常  
 800m：無異常  
 →轉水平擴散



## 負異常

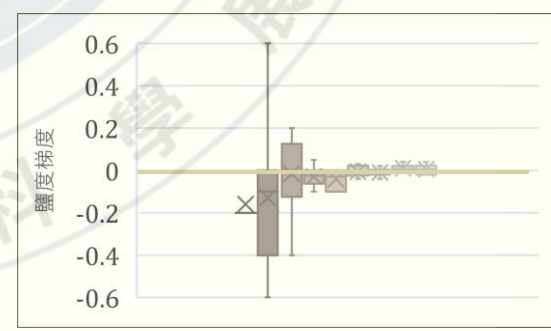
250m~1300m：負異常  
 1500m：無異常  
 →轉水平擴散

# 鹽度異常值



## 正異常

250~1000m：些微負梯度  
 1250m：無梯度



## 負異常

250~1000m：負梯度  
 1250m：無梯度

## 海洋現場數據分析I

在海洋現場中，鹽度異常抑或是溫度異常對於各層海水性質與洋流的形式影響較大？

溫度異常範圍 $2^{\circ}\text{C}$ →造成的密度異常範圍0.3單位

鹽度異常範圍0.4% →造成的密度異常範圍0.312單位

在海洋現場中**鹽度**的影響較溫度明顯

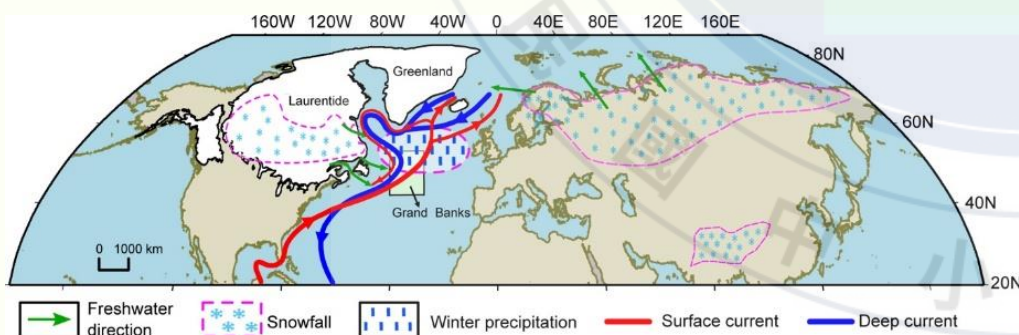
### 新仙女木事件

原假設：

淡水強制力的發生是因為北大西洋格陵蘭南部海域表層海水受全球回暖使其溫度上升而無法下沉

現推論：

新仙女木事件發生的原因，為表層鹽度被北半球陸地**融冰**產生的淡水而下降



## 海洋現場數據分析II

### 密度

#### 分析結論

750m以下的海域，不論表層海水密度如何改變，密度皆為負異常

#### 推論原因

北大西洋下沉流的影響僅影響至750m深，對於以下海域，其溫度與鹽度的影響受其他洋流影響的程度較大，例如：南極底層流

### 溫度

#### 分析結論

表層溫度負異常V.S.正異常

1. 停止垂直下沉的深度較深外
2. 各層的密度梯度較大，代表在垂直下沉的同時，也有較強的水平擴散趨勢

### 鹽度

#### 分析結論

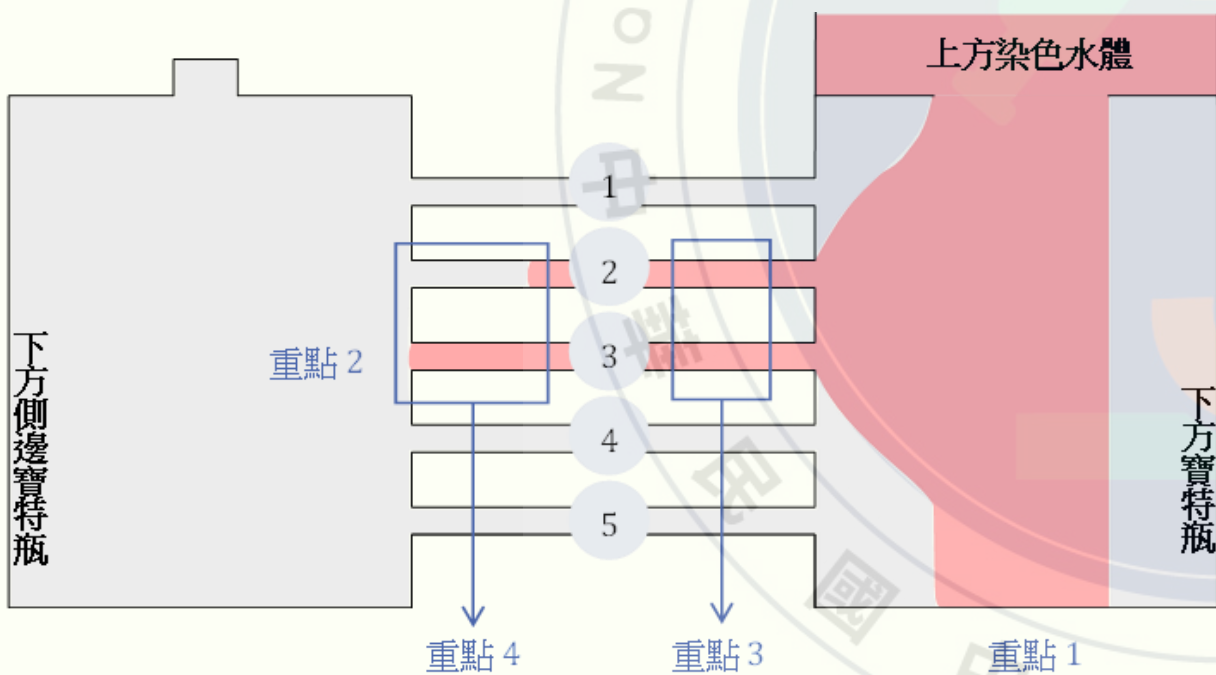
表層正異常較負異常情況下的各層異常值和梯度幅度皆較小

#### 推論原因

在真實的海洋現場，表層鹽度正異常時，通常是**海冰增加**而導致。在相對低溫高鹽時，密度流有**較強的流動與混合作用**，導致下層的鹽度梯度差異較小

# 示性實驗

1. 垂直下沉所需時間( $T_1$ )
2. 水平擴散所需時間( $T_2$ )
3. 出現水平擴散的水管編號與數量
4. 各水管水平擴散的長度



密度	溫度(°C)	鹽度(%)	$T_1$ (sec)	$T_2$ (sec)
996	40	0.2	132.6	107.6
	36	0.1	115	101.3
	31	0	101.8	91
998	38	0.4	105.2	101.2
	33	0.3	89.6	90.6
	28	0.2	74.4	81.2
	22	0.1	61.2	70.8
	17	0	48.2	63
1000	40	0.7	104.2	98
	35	0.6	94.8	87.6
	30	0.5	81.4	80.4
	25	0.4	67.2	71.8
	20	0.3	54.6	62
	14	0.2	42.2	52.8
	9	0.1	29.4	44.6
	4	0	15.4	35.2
1002	37	0.9	97.2	88.6
	32	0.8	84.6	77.2
	27	0.7	73.4	70.4
	22	0.6	57.6	60.6
	17	0.5	44.8	52
	11	0.4	28.8	42
	6	0.3	16	33.8
	1	0.2	6.6	24.6
1004	29	1	77	64.4
	24	0.9	62	52.8
	19	0.8	47.6	42.8
	14	0.7	35.4	30.6
	9	0.6	21.4	23.2
	3	0.5	9	16.4
1006	16	1	38.6	34.6
	11	0.9	25.6	25.6
	6	0.8	12	17.2
	0	0.7	5.4	8.6



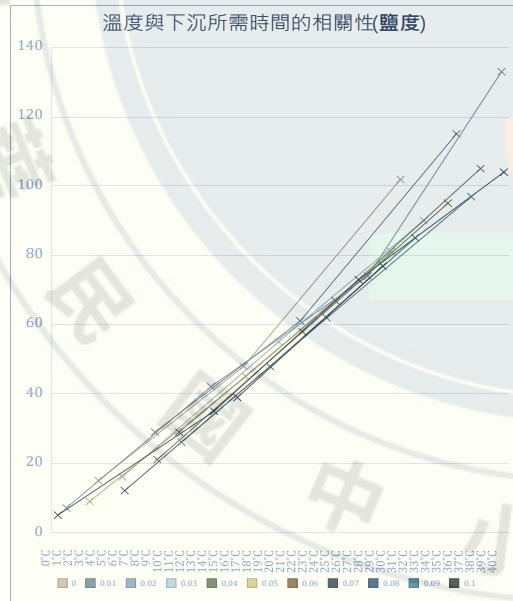
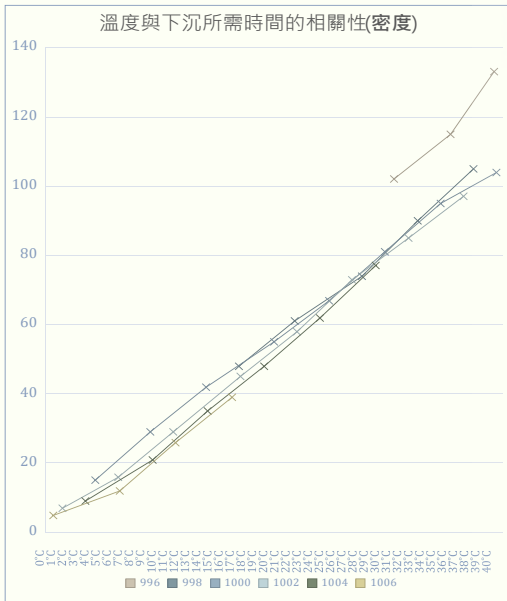
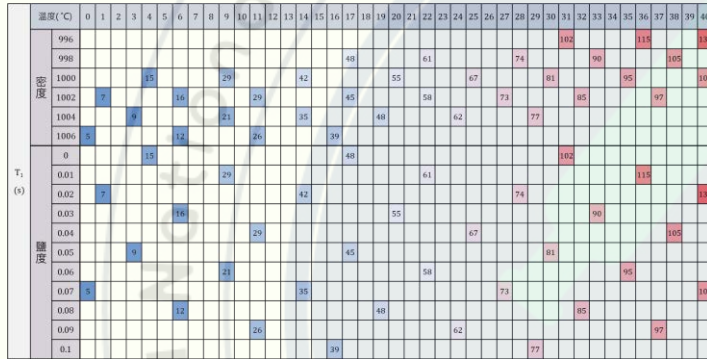
# 垂直下沉時間數據

## 分析結論

密度與下沉速率呈**正相關**，與所需時間呈**負相關**。  
上層水體高溫高鹽時，垂直下沉至底部所需時間較長

## 推論原因

上層高溫高鹽，與下層水體溫度差異小，無法進行溫度平衡，進而達到降溫增加密度



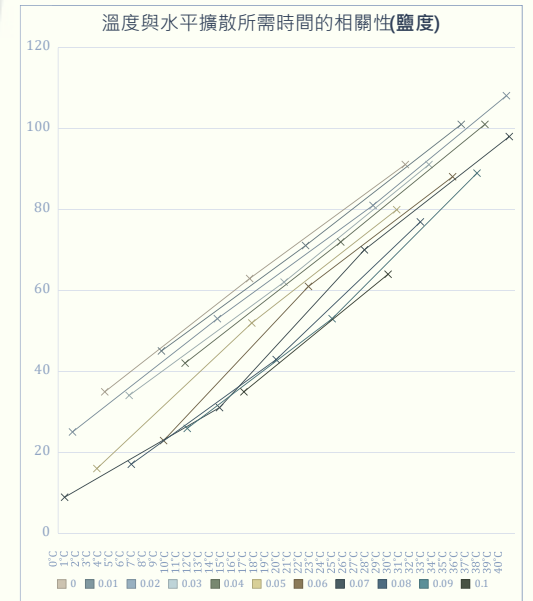
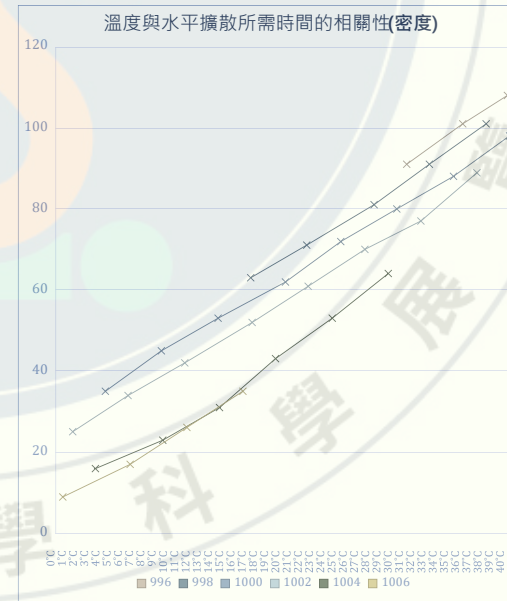
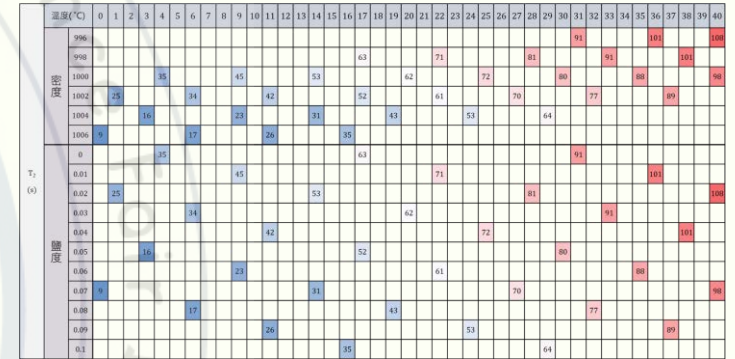
# 水平擴散時間數據

## 分析結論

密度與水平擴散速率呈**正相關**，與所需時間呈**負相關**。  
上層水體高溫高鹽時，水平擴散的速率減慢

## 推論原因

上層高溫高鹽，與下層水體溫度差異小，無法進行溫度平衡，進而達到降溫增加密度





上層染色水體水平擴散的吸管數，是否與上下層的溫差呈現正相關？

分析結論

低溫高鹽：水平擴散的深度較深，管數較多  
 高溫低鹽：水平擴散的深度較淺，管數較少

上層溫度固定鹽度增加：水平擴散的深度增加，但是管數近乎沒有差異

上層鹽度固定溫度降低：水平擴散的管束從2管增加至3管  
 →上下層溫差較大則水平擴散的吸管數增加，呈現正相關

水平擴散發生的深度 (吸管編號)		上層溫度				
		0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
上層鹽度	0%	3~5	3~4	2~3	2~3	2~3
	1%	3~5	3~5	3~4	2~4	2~3
	2%	3~5	3~5	3~4	3~4	3~4
	3%	3~5	3~5	3~4	3~4	3~4
	4%	3~5	3~5	3~5	3~4	3~4

討論

當上層染色水體溫差較大時，染色水體在各管的水平擴散的是否長度會較為一致？

上層密度固定

當上層低溫低鹽時，染色水體在各管水平擴散的長度，較上層水體為高溫高鹽一致

上層鹽度固定

當上層溫度較低時，染色水體在各管水平擴散的長度，較上層水體為高溫高鹽一致。

→溫差較大時水平擴散的鹽指較短胖

密度	996			998			1000							1002					1004					1006										
溫度	40	36	31	38	33	28	22	17	40	35	30	25	20	14	9	4	37	32	27	22	17	11	6	1	29	24	19	14	9	3	16	11	6	0
1																																		
2	15	15		15	15				15	0	1						15	3							2									
3	7	15	15	10	14	15	15	15	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14			15	15	15	15	12		15	15	15		
4			10		4	8	15			1	10	6	10	14	15		1	5	11	14	15	15	15	2	6	10	14	15	15	5	10	14	13	
5					0	0	6						1	2	7	15				5	10	12	15			5	13	14	1	5	11	15		

鹽度	0			0.1			0.2			0.3			0.4			0.5			0.6			0.7			0.8			0.9			1				
溫度	31	17	4	36	22	9	40	28	14	1	33	20	6	38	25	11	30	17	3	35	22	9	40	27	14	0	32	19	6	37	24	11	29	16	
1																																			
2				15			15				15			15			1			0			15				3			15			2		
3	15	15		15	15	15	7	15	15		14	15		10	15	14	15	15	15	15	12	13	15	15		15	15	15	15	15	15	15	15	15	
4	10	15	15		8	14	4	10	15		6	15		10	15	1	14	15		11	15		5	14	13	1	10	14		6	10	2	5		
5		6	15		0	7	0	2	15		1	12		10	5	14				13			5	15			11			5		1			



## 研究結論

01

當表層海水因為**溫度上升**使密度下降時，  
密度流停止下沉轉為水平擴散的**深度變淺**

02

當表層海水因為**鹽度下降**使密度下降時，  
密度流停止下沉轉為水平擴散的**深度變淺**

03

當表層海水**密度下降**時，會使垂直下沉與  
水平擴散的速度**減慢**

04

當表層海水因為溫度上升或是鹽度下降，  
使表層海水密度下降時，中層海水的鹽度  
與溫度會產生正異常，深層海水的鹽度與  
溫度會產生負異常

05

在上下層海水密度差相同的情況下，表層  
**溫度與鹽度較高**時，產生的鹽指較為**粗短**

## 參考資料



NOAA網站：

<https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/bin/heatfig2.pl?action=start>



海洋狀態方程式(密度)：

<http://mail.atm.ncu.edu.tw/~hong/OceanDynamics/chap02/Fig01-15a.html>



氣候文明史-改變世界的攻防八萬年-田家康-臉譜出版社