

# 南灣海水週期性溫降之特性與預警

鄭宇昕 謝孟樵 張明輝  
國立臺灣大學海洋研究所

## 摘要

本研究分析氣象局施放於南灣的海氣象浮標與潮位站長期觀測資料，解析南灣週期性溫降的特性，並歸納出造成該溫降的可能海洋物理機制，進而制定合理的溫降預警機制。分析結果指出，南灣海水的週期性溫降與潮汐息息相關，最大溫降時間點平均發生在水位達最低低潮位後~3-4小時，大潮期間溫降幅度會比較大，2-3小時內平均溫降~4°C，且該溫降現象，夏季會比冬季明顯。綜合以上分析結果與前人研究成果，該溫降機制可能跟背流渦流和恆春海脊所引發的內潮有關，兩者都與潮汐變動週期與大小有關，因此本研究建議可以將水位差當作第一級預警的指標，當後壁湖潮位站的水位差>1公尺時，南灣灣內就很可能出現較巨幅的海水溫降。

關鍵字：海水溫降、南灣、內潮、背流渦

## 一、前言

海水溫度的異常變動，如突然的升/降溫或是溫度高/低於海中生物無法承受的溫度，都會造成海洋生物的死亡，另一方面更受關注的是海上的魚場養殖，異常的溫度變化，容易導致魚群的暴斃，造成養殖業者的損失。在過去報導中，臺灣四周海域，就有多起低溫造成魚類死亡的報導，其中以2008年澎湖寒害最廣為人知，其次則為屏東南灣，因此本四年期計畫規劃在這兩個海域進行資料收集、成因探討與預警機制的制定，而本年度計畫延續108年度計畫，針對屏東南灣進行研究探討。

屏東南灣生態豐富，除了有世界級的珊瑚礁資源，更有豐富的魚種，異常的高溫會使當地珊瑚白化(Lee et al., 2020)，相反的異常的低溫則可能會造成魚類的死亡，過去資料的歷史紀錄，發生在南灣魚群因低溫而暴斃有三件，分別是1988/11/24，於南灣東北側海表面觀測到幾小時之內降溫約14°C而導致大量魚類死亡，推測該溫降可能與當地離岸海流、潮汐與離岸風所造成的湧升流有關(Su et al., 1989)。2008/07/03下午，在南灣西岸發現大量死魚，經過當地水位觀測資料以及美國海軍實驗室(NRL)的海洋預報系統(ONFS)推測，是由於大潮期間引發的湧升流所引起的海溫快速下降所致(Ko et al., 2009)。2016/01/13，於後壁湖漁港發現

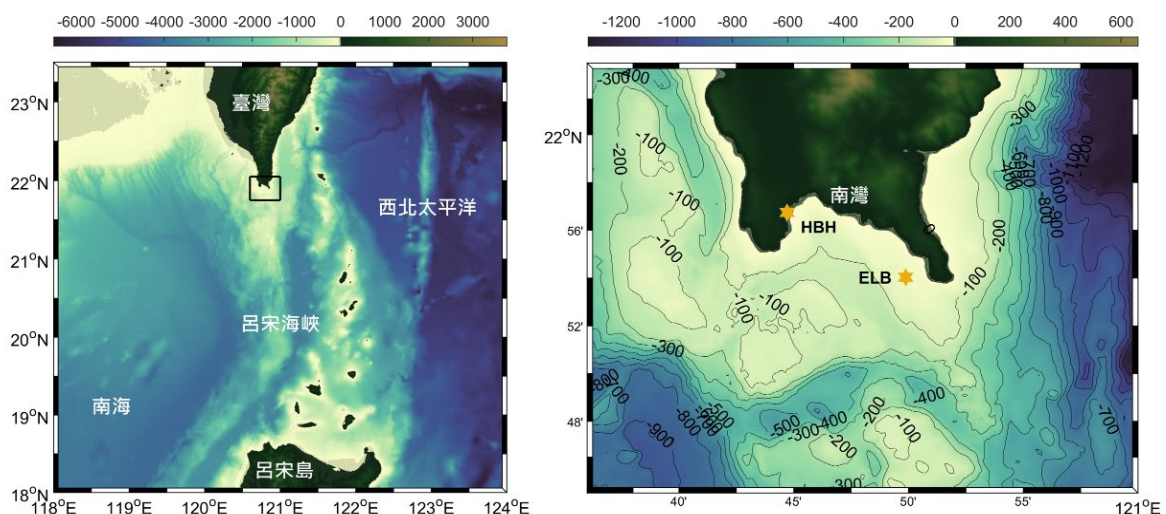


圖1、呂宋海峽海底地形(左圖)以及南灣海底地形(右圖)。南灣左右兩個岬角分別為貓鼻頭及鵝鑾鼻。鵝鑾鼻浮標(ELB)及後壁湖潮位站(HBH)在右圖中以星號表示。

大量凍死魚 (中國時報<https://reurl.cc/W40xWe>)。以下研究將根據氣象局所提供的潮位站與海氣象浮標資料，對屏東南灣海域的異常溫降進行探討，並擬定合理且可行的預警機制。

南灣位於臺灣最南方，是一個開口向呂宋海峽半封閉型式的海盆地形(圖 1)，其東側有向北流動的黑潮，沿著菲律賓海西側從呂宋島一路流向臺灣東海岸。在夏季期間，黑潮距離南灣及其附近地區較遠，但黑潮支流偶爾會入侵呂宋海峽；相反的，在冬季期間，黑潮支流經常性地入侵呂宋海峽，並且在南海北側形成一反氣旋式渦旋，經過臺灣南端後回到黑潮主流(例如 Centurioni et al. 2004; Wu and Chiang 2007; Liang et al. 2008)，而這種反氣旋式渦旋使得黑潮對於南灣及其周圍地區的水文結構會產生較大的影響。

在南灣地區的潮流大致呈東西走向，漲潮時流向西邊，而退潮時則流向東邊，特別是受黑潮支流入侵的影響，在漲、退潮時會因潮流與黑潮支流流向的相對方向有所不同，而使潮流流速改變。在南灣以及呂宋海峽區域，因為整個南海海盆的地形構造，使得潮汐在此產生共振現象，所以全日潮的訊號明顯比半日潮來得大上許多(Jan et al. 2007)。然而，在南灣及其周圍地區的全日潮，會受到半日潮所造成的擾動，在全日潮的週期內，引發經常性的湧升流抑或是冷水入侵事件(Lee et al. 1997)，尤其是在大潮期間，分布廣泛且強勁的湧升流發生的次數更是頻繁。當強勁的湧升流發生，經常使當地海溫劇烈驟降，且通常持續數小時，在南灣東側，經常在一個全日潮週期內發現一次海溫驟降事件；而南灣西側，則是在一個全日潮週期內會發生兩次的海溫驟降事件(Lee et al. 1999)。由湧升流所引起的海溫驟降事件，對當地環境會造成劇烈影響，例如1988年11月24日，海水溫度突然下降約過 $14^{\circ}\text{C}$ ，導致魚類大量死亡(Su et al. 1989)。

對於該週期性的海水溫降現象，過去的研究結果指出主要歸因於三個海洋現象，地形抬升(Ko et al., 2009)、渦流(Lee et al., 1999; Ko et al., 2009; Hsu et al., 2020)與內潮(Jan and Chen, 2009)。前兩者是因為海岬或是海脊所觸發的湧升。臺灣南端的兩個海角(圖 1右圖中的貓鼻頭和鵝鑾鼻)向南延伸的海脊所形成的特殊地形構造，透過海脊劇烈的地形變化會使潮流順著地形淺化而抬升，進而引發湧升流，而海岬則會阻礙流向海岬的潮流，使海岬背流處呈現一水位較低的低壓區，也就是所謂的迴流區(recirculation)，而此低壓就

會迫使底層的海水往上補充來平衡這壓力差，形成湧升(Lee et al. 1999)。後者則是因為正壓潮受恆春海脊影響，造成內潮由東往西經過南灣，並造成當地下層較冷的海水抬升至海面，導致當地海水溫驟降(Jan and Chen, 2009)，且該現象有明顯的季節性變化，夏季時海水的斜密層(pycnocline)結構較強且淺，導致夏季會有比冬季時更大的溫降幅度。

## 二、觀測資料

### (一) 海表高度

本研究主要使用後壁湖漁港的水位資料，後壁湖潮位站位置設置在屏東後壁湖漁港內(圖 1星號)。資料取自交通部中央氣象局，時間範圍為2007年至2019年，約莫12年資料，資料取樣頻率為6分鐘一筆。

### (二) 海氣象浮標

本研究主要使用位於鵝鑾鼻西側(圖1星號)之海氣象浮標資料，浮標上配有風速計、氣壓計、氣溫、海溫與波浪儀。資料取自交通部中央氣象局，時間範圍為2006年至2019年，約莫13年資料，資料為1小時一筆。但請留意2012年12月~2013年2月，與2016整年資料有缺遺。

## 三、結果與討論

### (一) 週期性海溫變化

該海域的海溫有著明顯的季節性變動，夏季平均溫度 $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，冬季平均溫度 $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，變化幅度 $\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。為了突顯朝夕或其它海洋動力對海溫變化的影響，我們對海表溫度做30天的高通率波(30d-HPF)，將季節性的冷熱變動或更長的跨年變動剔除。圖 2以2008年為例，我們可以發現剔除大尺度季節性變動之影響後(例如熱輻射量變化)，30d-HPF的海溫異常值時序列顯示出，夏季(6-9月)時異常值可以達到 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，其它季節最低則為 $-1^{\circ}\text{C}\sim -2^{\circ}\text{C}$ ，其它年份變動也大致相同，這很有可能是因為夏季時，海水分層較明顯，混合層比較薄，因此當有海洋物理運動(例如內潮、流與地形交互作用...等)引發垂直海水運動(湧升)時，就會引發較大的海溫異常變化。

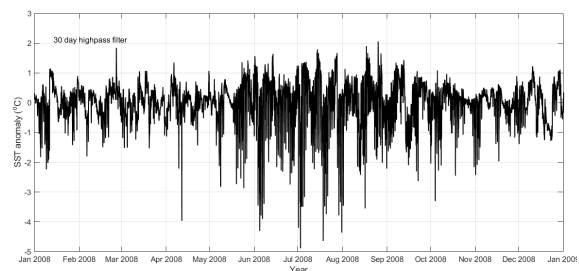


圖2、鵝鑾鼻浮標2008年海表溫時序列。

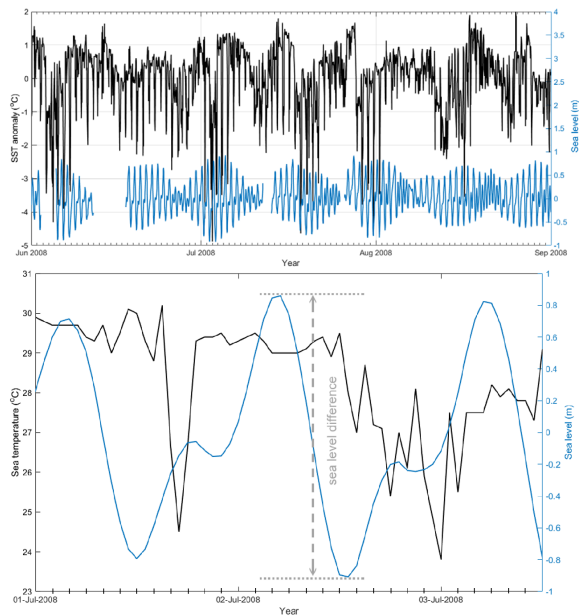


圖3、鵝鑾鼻浮標海表溫時序列(黑線)與後壁湖潮位站水位時序列(藍線)。(上圖)2008年7-9月。(下圖)2008/07/01~2008/07/03。

將時間軸範圍縮小至7-9月(圖3),顯示海溫異常時序列與潮位漲幅有明顯相關性,大潮時水溫異常變化也較大,相反的小潮時水溫異常則較小。圖4以2008年7月份大潮期間為例,可以清楚看出,南灣水位變化為全日半日混合潮,在每日較低低潮位之後數小時,常常伴隨著一個明顯的溫度降,例如2008/07/01當水位達較低低潮位之後~3小時,海溫開始劇降,兩小時內從~30°C降到~24.5°C,類似的週期性海溫變化幾乎在每一日發生,只是大潮期間比小

潮期間溫降更為明顯,且夏季溫降幅度又比冬季時大,以上結果都與前人研究結果相符。

進一步確認水位與海表溫之關係,把兩個變數時序列做交叉頻譜分析(cross-spectrum analysis, 圖4),從圖中結果可以發現海表溫與水位變化在近全日週期與近半日週期有不錯的相關,進一步將近全日區間放大檢視,可以發現主要是O1(~25.8)與K1(23.9)週期,其中O1週期水位變化幾乎與海表溫同時變化,而K1週期水位變化會領先海溫變化~2小時。另一方面,近半日區間以M2和S2週期為主,兩個週期都是水位領先海溫變化約3-4小時。此延遲關係,在日後做低溫預警時會是很有幫助預警機制之一。

Lee et al. (1997)研究指出,在大潮期間,南灣地區由潮流所引起的水溫下降可高達9°C的幅度,且大部分都發生在較低低潮位數小時之後,推測在大潮期間由於潮流較強,退潮時會在貓鼻頭海岬背流側形成一氣旋式渦流。但其觀測結果指出,漲潮時並未在鵝鑾鼻背流處形成一反氣旋式渦流,且水深85公尺的溫度資料指出,小潮期間並非沒有溫降發生,明顯溫降變化依然存在較深海水層。Lee et al. (1999)利用船載式督普勒流速儀進行掃測,指出漲潮時在南灣觀測到一佔據整個南灣的反氣旋式渦流,並進一步使用理想數值模式,模擬南灣週期性溫度下降的成因,藉由模式驗證冷水是因背流處渦流造成湧升流所引起之假設。該理想模式在只考慮潮流的情況下,模擬結果顯示,退潮時會在貓鼻頭背流(東側)處形成一氣旋式渦流,漲潮時會在鵝鑾鼻背流處(西側)形成一反氣旋式渦流,東側只會發生一次溫降,西側則觀測到兩次溫降。但將其模式模擬的溫度降時序變化與實際觀測的溫度降時序變化仔細比較,可以發現兩者的溫降幅度與溫降時間並不符合,尤

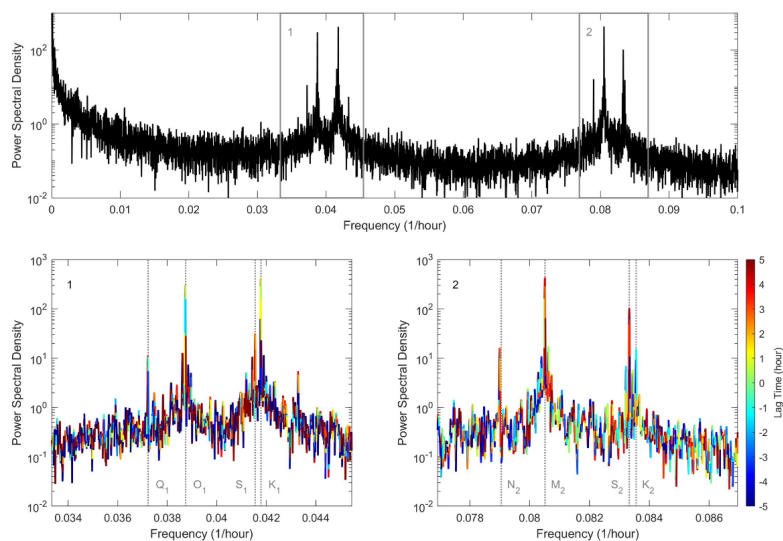


圖4、水位與海表溫之交叉能譜圖(cross-spectrum)。(上)全頻率範圍,(左下)近全日週期區間(上圖灰色方框1),(右下)近半日週期區間(上圖灰色方框2)

其是發生溫降的時間點比實際發生溫降的時間晚了許多。海溫觀測時序顯示實際觀測的第一次溫降發生在水位達較低低潮位後~3小時，其模式結果則是發生在~6小時後。第二次溫降發生在水位達較低低潮位後~8小時，其模式結果則是發生在~18小時後，發生時間相差了10小時，而這些結果可能意味著背流渦漩並非是造成南灣週期性溫降的主要機制。

Jan and Chen (2009)以擬真數值模式(realistic model)，模擬南灣溫降變化，提出內潮可能是另一個造成南灣週期性溫降的主要原因。其研究結果指出，在海水分層的條件底下，正壓潮與恆春海脊作用下，會產生內潮由東往西傳遞通過南灣，將底層冷水帶起，進而造成南灣週期性的溫降，而此溫降變化也勢必隨著大小潮而有強弱變化。另一方面，作者亦指出由於夏季時海水的分層較強，斜密層(pycnocline)結構強且存在較淺海水，因此造成內潮在夏季時所引發的溫降幅度(大潮期間~4°C)會比冬季時來的大，以上兩個溫降特性都與實際觀測相符。但由於其數值模式的空間解析度~9.2km(約半個南灣寬)，所以並無法解析出較區域性的背流渦漩或其他中小尺度運動現象，亦無法解析出南灣西側有兩次溫降，東側則只有一次溫降的現象。

綜合以上研究結果與本計畫分析結果，存在著共同點，南灣週期性溫降與潮汐變動息息相關，背流渦漩或是內潮也都與潮汐變動有關，但動力機制確有極大差異，前者為正壓潮流在當地與海岬地形作用所引發，後者則是正壓潮在遠處與海脊作用所產生的斜壓潮所引起，兩者所產生的溫降變化本來就存在著時間差，前人研究各自對其所觀測到的現象做了合理解釋，但各自也只考慮了其中一個物理機制。本年度計畫試著從觀測資料去找出主要的影響機制，但由於海溫資料只有表層且只有單一位置，要釐清兩者所述現象實屬不易，因為海水分層現象在此處可能扮演著極重要的角色，需要進一步作整層海水與多點的海溫監測，才有辦法進一步釐清。

## (二) 異常溫降事件與預警機制

以上觀測結果指出南灣水溫變化與水位變化有著強烈關係，接著我們假設異常溫降是在週期性溫降基礎下，進一步產生的溫降現象，此假設也在水位差與海表溫異常值關係圖中(圖5)得以證實，水位差=較高高潮位-較低低潮位(本研究只考慮退潮時期)，如圖3灰色虛線所示。圖5水位差與海表溫異常值關係圖顯示，海溫變化幅度會隨著水位差增加而變大，但資料又大致可以分為兩群，第一群整體大致呈現二次函數曲線變化(黑虛線)，98%的資料都分布在黑虛線附近，第二群則是偏離正常溫度變動範圍，溫降變化相對較大(藍點)佔約1%。可以清楚發現，海表溫降幅度大於4°C的資料都分布在水位差大於1公尺以上的區域。

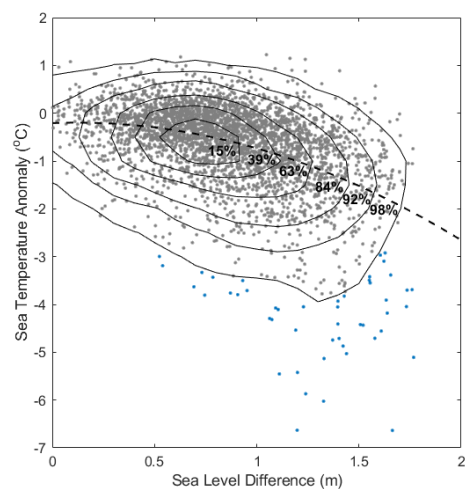


圖5、水位差與海表溫異常值關係圖。百分比表示資料密度等值線內資料點佔整體資料數量的比例。

以下將上述資料分為一般事件(圖5灰點)與異常事件(圖5藍點)來做討論。從圖6(a)顯示風速在異常事件上似乎並沒有扮演著特別的角色，從此直方統計圖可以發現，發生異常事件時的風速分布情況跟

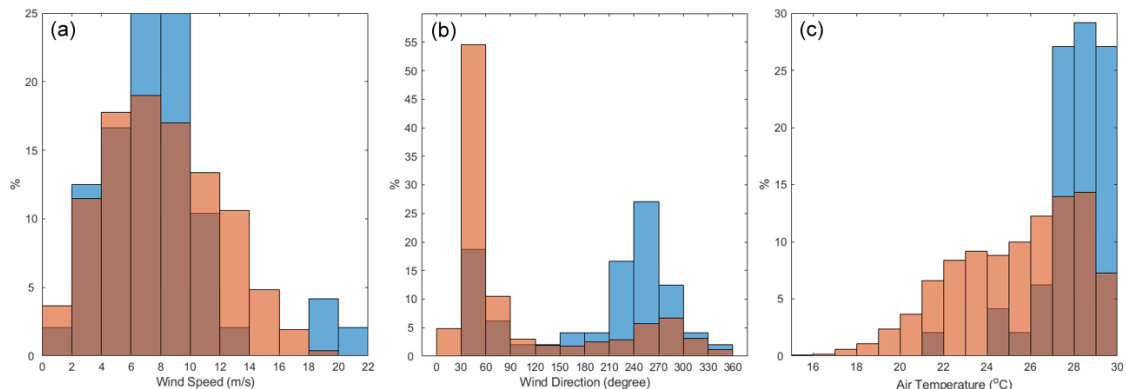


圖6、異常溫降事件(藍色)與一般事件(紅色)統計直方圖，(a)風速、(b)風向和(c)氣溫。

一般事件時沒有太大差異，平均風速都落在~8m/s，這也說明風速大小在南灣並不適合拿來當作警示的標的。另外，圖6(b)可發現，當發生異常事件時，風向大概都是240度(西南風)，與一般事件時有滿大的差異，一般事件風向主要集中在東北風，異常事件則是主要分布在西南風，但這或許只是反應異常事件主要發生在夏季，在動力機制上或許跟風沒有很大的關聯。再者，圖6(c)顯示負偏差較大的數值大部分都發生在氣溫較高的時後，也與前面分析結果在夏季時溫降幅度會比冬季大相符，這或許也暗示了此時海水伴隨著較強的分層結構。

綜合以上分析結果，可以得出當水位差大於1公尺時，才有機會出現大於4°C的溫降，因此本研究建議的預警機制如下：

(1) 第一級預警燈號(黃燈):

預警條件:當水位差與海溫異常資料落在離群值區域時(圖 5中98%等值線以外的區域)。

註解:可藉由以下公式帶入水位差(SLD)推算水溫異常閾值(STAc)，當觀測的水溫異常值低於水溫異常閾值，就亮預警燈號。

$$STAc = 2.133SLD^3 - 3.267SLD^2 - 1.007SLD - 1.592$$

(2) 第二級預警燈號(橘燈):

預警條件:當達到一級燈號標準後，且水位差大於1公尺時。

(3) 第三級預警燈號(紅燈):

預警條件:在以上兩個預警燈號都亮起後，且水溫異常值小於-4°C時。

## 四、總結

南灣海域海水溫度本身就存在著週期性的變動，而造成該週期性變動的可能機制為當地的背流渦流與內潮，但兩者都與潮週期有關，且目前只有單點單層的海水溫度時序列，歸納何者是主要動力機制或兩者各自扮演怎樣角色成為本次研究的一大挑戰。解析南灣週期性溫降特性結果顯示，異常海水溫降是建立在上述正常週期溫降的基礎下，進一步發展而成，最大的局限與挑戰是缺乏實際整體海溫資訊，因此無法個別對每個事件去歸納主要是由哪一項機制造成進一步溫降，雖然如此，當前先依據僅有的海溫和水位數據，依然可以歸納出可行的預警機，後續研究將會使用臺灣海洋資料庫的歷史水文資料，進一步分析不同情況下的水層分層結構，來精進預警機制。

## 參考文獻

- Centurioni, L.R., Niiler, P.P., and Lee, D.-K. (2004), Observations of Inflow of Philippine Sea Surface Water into the South China Sea through the Luzon Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 34, 113–121.
- Hsu, P.-C., Lee, H.-J., Zheng, Q., Lai, J.-W., Su, F.-C., & Ho, C.-R. (2020), Tide-induced periodic sea surface temperature drops in the coral reef area of Nanwan Bay, southern Taiwan. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 125, e2019JC015226. <https://doi.org/10.1029/2019JC015226>
- Jan, S., and Chen, C.-T. Arthur. (2009), Potential biogeochemical effects from vigorous internal tides generated in Luzon Strait: a case study at the southernmost coast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114.C4.
- Ko, D. S., Chao, S. Y., Huang, P., and Lin, S. F. (2009), Anomalous Upwelling in Nan Wan: July 2008. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20(6), 8.
- Lee, H. J., Chao, S. Y., Fan, K. L., and Kuo, T. Y. (1999), Tide-induced eddies and upwelling in a semi-enclosed basin: Nan Wan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(6), 775–787. <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0524>.
- Lee, H. J., Chao, S. Y., Fan, K. L., Wang, Y. H., and Liang, N. K. (1997), Tidally induced upwelling in a semi-enclosed basin: Nan Wan Bay. *Journal of Oceanography*, 53, 467-480.
- Lee, I., Fan, T., Fu, K., and Ko, D. S. (2020), Temporal variation in daily temperature minima in coral reefs of Nanwan Bay, Southern Taiwan. *Sci Rep* 10, 8656. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65194-8>.
- Liang, W.D., Yang, Y.J., Tang, T.Y., and Chuang, W.S. (2008), Kuroshio in the Luzon Strait. *Journal of Geophysical Research* 113, C08048. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004609>.
- Su, J.-C., T.-C. Hung, Y.-M. Chiang, T.-H. Tan, K.-H. Chang, K.-T. Shao, P.-P. Hwang, K.-T. Lee, C.-C. Huang, C.-Y. Huang, K.-L. Fan and S.-Y. Yeh (1989): An ecological survey on the waters adjacent to the nuclear power plant in southern Taiwan. Special publication No. 70, National Scientific Committee on Problems of the Environment, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, ROC, 238 pp. (in Chinese).
- Wu, C.-R., Chiang, T.-L. (2007), Mesoscale eddies in the northern South China Sea. *Deep-Sea Research II* 54, 1575–1588.