

黑潮入侵東海之研究

林永富¹ 吳朝榮²

¹ 國立臺灣師範大學 地球科學系博士生

² 國立臺灣師範大學 地球科學系教授

摘要

當黑潮流經台灣東北時，因遇到東西走向的東海陸棚，使得原本向北流動轉而向東流，大約沿著 200 公尺等深線流往日本東岸，黑潮在台灣東北部有季節性擺動的現象，在夏季時，容易向離岸(向東)方向擺動；在冬季時，容易向靠岸(向西)方向擺動，並進而入侵東海陸棚。本研究主要是利用 1993 年至 2010 年的衛星觀測資料來研究台灣東北部海流的時空變化，尤其是黑潮入侵東海陸棚的現象，定義經度 121.67°E 至 122.5°E，緯度 25.5°N 至 26.4°N 之平均流速為黑潮入侵東海陸棚的指標 (Kuroshio Intrusion index, KI 指標)，結果發現在年際變化上 KI 指標與氣候指標(如 ENSO、PDO 和 PTO 等)有顯著的相關性，在 1997/98 年與 2002/03 年的冬季，當 PDO 與 ENSO 皆呈正相時，入侵量有明顯減少的現象。進一步分析，在 1997/98 年的冬季，是受到熱通量梯度的改變所影響。2002/03 年的冬季則是受到由東向西傳的中尺度渦旋靠近黑潮所影響，反氣旋渦旋容易造成黑潮向東蜿蜒，使得入侵量減少。

關鍵詞:黑潮、衛星高度計、湧升流

Interannual variability of the Kuroshio intrusion onto the shelf of the East China Sea

Yong-Fu Lin Chau-Ron Wu*

* Professor, Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University.

ABSTRACT

Using 18 years of multi-satellite geostrophic velocity data to study interannual variability of the Kuroshio intrusion onto the southern shelf of the East China Sea. We defined a Kuroshio Intrusion (KI) index off northeast Taiwan over the region from 25.5°N-26.4°N, 121.67°E-122.5°E. The results suggest that seldom intrusion events have been identified in the winters of 1997-1998 and 2002-2003. Those two non-intrusion events take place during the winters when both the Niño 3.4 index and the PDO index are large and positive. Two conditions are responsible for the cause of the non-intrusion events. During the winters of 1997-1998, the main cause is no significant winter cooling off northeast Taiwan. More anticyclonic eddies collided the Kuroshio in winter of 2002-2003.

Keyword: Kuroshio; Satellite altimetry; Upwelling

一、前言

黑潮是北太平洋中最重要的西方邊界流，由北赤道洋流(North Equatorial Current, NEC)分支而

來，北赤道洋流由東向西流，遇到民答那峨島分支成南北兩股海流，向北支流為黑潮，向南為民答那峨海流(Mindanao Current)，而黑潮流經菲律賓東

岸、呂宋海峽與台灣東部海岸(Nitani, 1972)。

當黑潮流經台灣東北時，因遇到東西走向的東海陸棚阻擋，向北流的黑潮轉而向東，約沿著東海陸棚邊緣200公尺等深線往日本東部外海流去，分支則經由北棉花峽谷跨越陡峭的陸棚邊緣進入東海陸棚之上。

黑潮主軸有季節性的擺動，在夏季時，黑潮的主軸較容易向東，偏離台灣東岸，在冬季時，黑潮的主軸較容易向西，往台灣東岸靠近，平均而言，會有支流入侵東海陸棚。

在過去的觀測資料都可發現黑潮在台灣東北有入侵到東海陸棚的現象，不管是衛星觀測、現場實際觀測與數值模式模擬的資料都可證實，此現象有季節性的變化(e.g. Wu et al., 2008; Ichikawa et al., 2008; Hsin et al., 2011)，且當支流入侵到東海陸棚時，會影響此區域生地化的變化，Chen (1996) 利用觀測資料發現，當黑潮入侵至東海時，因受到地形抬升的效應，會將較冷的黑潮次表層水帶至表層，並將豐富的營養鹽帶到東海，進而影響到東海地區的生地化。

Ichikawa et al. (2008) 利用雷達觀測資料，觀測台灣東北的黑潮流場變化，發現當黑潮流速變快(變慢)時，黑潮主軸容易向離岸(靠岸)方向擺動，且黑潮夏季流速較快，冬季流速較慢，又利用海平面高度場看到西太平洋向西傳的中尺度渦漩也會影響到黑潮，當氣旋式(cyclonic)渦漩，接觸到黑潮時，會使黑潮流速減慢，當遇到反氣旋式(anticyclonic)渦漩時，黑潮流速會增強。

Wu et al. (2008) 利用數值模式研究黑潮的擺動情形，在空間尺度上，黑潮的擺動會影響上層湧升流的出現與否，此種影響主要在水深150公尺以上，當向東(向西)擺動時，湧升流會變明顯(不明顯)，且在上層30公尺處最為明顯。而進一步分析變化週期，主要分為30天與110天，其中110天週期來自向西傳遞的中尺度渦漩與黑潮交互作用，30天週期可能來自黑潮本身的斜壓不穩定性。

過去的研究也指出，在動力機制上，不同的作用也會影響黑潮入侵，如海上的渦漩(eddy)、海氣交互作用與地形等等(e.g. Chao, 1991; Yang et al., 1999)，也發現黑潮有年際上的變化(e.g. Hwang and Kao, 2002)。

Zhang et al. (2001) 和Yang et al. (2004)指出當反氣旋式渦漩(氣旋式)靠近黑潮時，黑潮流經東台灣通道 (East Taiwan Channel, ETC)的傳輸量會增加(減少)，且容易向東(向西)蜿蜒(meander)。

Oey et al. (2010) 利用數值試驗解釋為何冬季黑潮在台灣東北容易向陸岸擺動，模擬去除風的影響，只加入季節性的熱通量變化，發現黑潮還是有擺動的現象，指出黑潮擺動與熱通量變化有關。在冬季時，在台灣北部接近陸地的區域冷卻影響較強烈，使得東海陸棚區較外海散失較多的熱量，亦造成向西的密度梯度，加上離岸地形坡度影響，使得黑潮靠陸棚擺動，即為JEBAR (Joint Effect of Baroclinicity and Relief, JEBAR)效應，此效應在冬季較明顯。

Hwang 和 Kao (2002) 利用衛星資料，將SSH計算出地轉流傳輸量，發現黑潮上游(台灣東南)的傳輸量比下游(台灣東北)來得大，而在年際變化上，與ENSO 指標做相關，在上游呈現負相關，且延遲10個月，在下游呈現正相關，延遲一個月，故下游的區域，當聖嬰年時期，傳輸量會增強，在反聖嬰年時期，傳輸量會減弱。

本研究利用AVISO衛星觀測資料，時間從1993年1月到2010年12月做分析，研究黑潮入侵東海之年際變化，以及影響的原因。

二、研究工具及方法

2.1 觀測資料介紹

2.1.1 AVISO 資料

AVISO (Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)為整合多個衛星資料的資料庫，結合ENVISAT、ERS-1、ERS-2、GFO、Jason-1、Jason-2、TOPEX/Poseidon等衛星資料，進一步統整彙集而成，將各個資料交互比對修正，以降低誤差及提高資料完整性。本研究所採用的是AVISO中的絕對動力高度及絕對地轉流(Maps of Absolute Dynamic Topography & absolute geostrophic velocities, MADT)中的Ref (Reference)資料，它是利用兩顆衛星在固定的軌道上採樣經過處理而得的資料，有很好的穩定性，適合用於長時間尺度分析(如年際變化)，故選用此資料研究黑潮入侵東海之年際

變化。

空間解析度為 $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ ，取用的時間解析度為一週一筆數據，經處理後為一個月一筆，範圍為經度 120°E 至 126°E ，緯度為 21°N 至 27°N ，時間範圍為1993年1月至2010年12月，為期18年整。

2.1.2 NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis 熱通量及風場資料

本研究採用的熱通量資料為國家環境預報中心/國家能源研究中心能源部(National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy Atmospheric Model Intercomparison Project reanalysis-2, NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (R-2))的再分析資料，是根據國家環境預報中心/國家大氣研究中心的再分析資料 (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research reanalysis-1, NCEP/NCAR reanalysis(R-1))做分析處理，涵蓋1979年到現在的衛星資料，使用最新的預測模式以及資料同化系統，提高輸出資料品質，並修正已知 NCAR reanalysis(R-1)的資料處理問題(Kanamitsu et al., 2002)，在本研究區域的空間解析度約為 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，採用的時間解析度為一個月一筆，其中所使用的熱通量資料和風場資料。

2.1.3 傳輸量資料與計算

本研究主要是引用Hsin et al. (2011)中利用潮位站資料所計算出來的黑潮傳輸量，時間範圍為1994年4月至2008年5月，時間解析度為一個月一筆。

在本研究也利用AVISO衛星資料的海平面高度(Sea Surface Height, SSH)，取梗枋(GF)與石垣島(IG)潮位站區域(如圖2)的SSH做SLDA(Sea Level Difference Anomaly, SLDA)，帶入Yang et al. (2001)之經驗公式(如式1)得到黑潮的傳輸量。

$$\text{Transport (Sv)} = 0.25 \times (\text{IG} - \text{GF}) + 20.87 \quad (1)$$

三、結果與討論

為更確定衛星觀測資料的可信度，故與實測資料做比對，取用AVISO的SSH資料與潮位站所算出的黑潮傳輸量(取至Hsin et al., 2011)(如圖1)做相關達0.56，透過計算超過99%顯著水準(Significance Level)為0.07，呈顯著相關，故AVISO衛星資料與實際現象相符。

由圖3為在台灣東北部取一測線(如圖2黑色斜線位置)，穿越東海陸棚(200等深線)觀測黑潮的流軸位置，在正常的狀況下，夏季多為不入侵東海陸棚，而在冬季多為入侵的情況，且研究發現黑潮的入侵量會受傳輸量、熱通量梯度等等作用所影響，也與各氣候震盪息息相關。

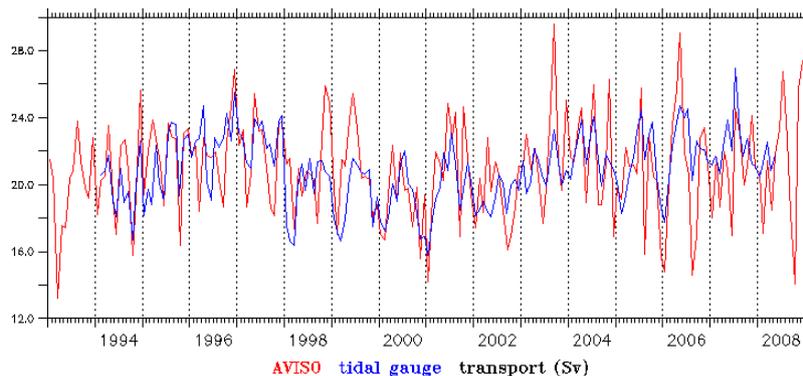


圖 1 AVISO 衛星海高(紅線)和潮位站資料(藍線)計算中的黑潮傳輸量時間序列圖

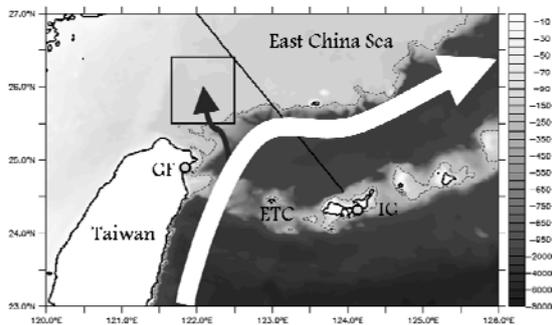


圖 2 台灣東北地形與黑潮(白色箭頭)流場示意圖

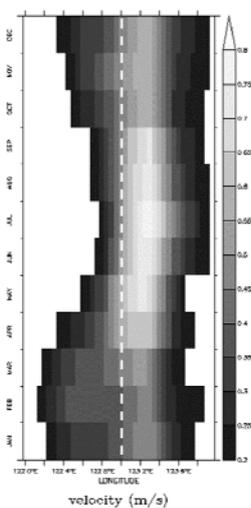


圖 3 AVISO 衛星地轉流之黑潮平均流速時間序列圖，白色虛線為 200 等深線的位置

我們定義經度 121.67°E 至 122.5°E ，緯度 25.5°N 至 26.4°N 之平均流速為KI指標，將KI、PDO(均經過15個月以下訊號濾除)和ENSO指標比對(如圖4)，發現在1997/98年與2002/03年的冬季，黑潮入侵的量明顯減少，甚至是不入侵的情況，且又是在PDO正相與聖嬰年的時期，為找出造成此現象的原因做進一步分析。

由前人研究發現黑潮可能會受到台灣區域的季風，在冬季台灣區域吹著強烈的東北季風，帶動西北方向的艾克曼傳輸，使的黑潮容易向陸棚擺動，而入侵到東海陸棚(Chao, 1991)，於是利用NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis資料觀察風場是否有明顯的改變，但是在1997/98和2002/03年的冬季

風場均無明顯的改變，故入侵量明顯減少與風的作用無關。

將KI指標與傳輸量和熱通量梯度年際變化(經過15個月以下訊號濾除)時間序列比對(如圖5)，發現在1997/98年的冬季黑潮傳輸量並沒有顯著的增加，但是在熱通量梯度的部分，1997/98年的冬季，有顯著變小的現象，這使得JEBAR效應變的不明顯，黑潮不易入侵東海陸棚，造成入侵量的減少。另外，我們也發現2000/01年的冬季，熱通量梯度也有變小的情況，但是入侵量卻沒有減少，這是因為黑潮的傳輸量有非常顯著減少的現象，故導致在那年冬季還是呈現入侵的情況。

2002/03年冬季的傳輸量的變化並沒有顯著的增加或減少，熱通量梯度雖有減少的情況但不顯著，但KI與PTO指標比對後發現，在2002/03年冬季，PTO呈現極大的正值(如圖6)，而根據Chang和Oey (2011)，來自西太平洋向西傳遞的中尺度渦流，在PTO正向時，靠近台灣東部黑潮的反氣旋渦流會增加，又根據Zhang et al. (2001)、Yang et al. (2004)與Ichikawa et al. (2008)研究發現，當高壓(反氣旋)渦流靠近黑潮時，使得容易導致黑潮向東方蜿蜒的現象，故可能是造成在2002/03年冬季入侵量有明顯減少的原因。

四、結論

探討在台灣東北流場的年際變化，使用完整且長時間的AVISO衛星觀測資料，從衛星導行的地轉流可明顯看出黑潮，在台灣東北有明顯東西擺動的現象，在年際變化方面，將KI指標與氣候指標比對，發現在1997/98年與2002/03年的冬季，當PDO與ENSO皆呈正值時，入侵量有明顯減少的現象。

進一步分析，在1997/98年的冬季，是受到熱通量梯度的改變所影響。2002/03年的冬季則是受到由東向西傳的中尺度渦流靠近黑潮所影響，反氣旋渦流容易造成黑潮向東蜿蜒，使得入侵量減少。

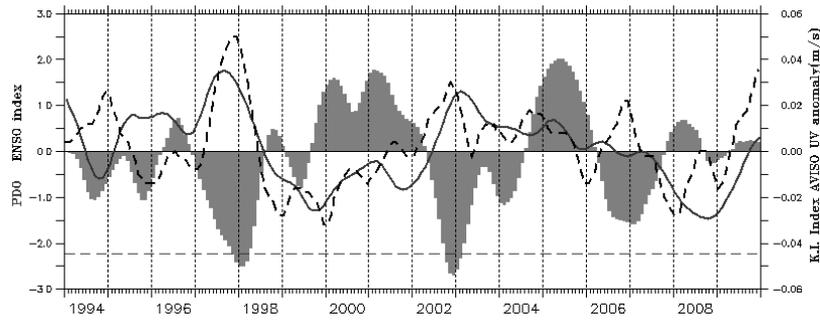


圖 4 KI(灰色)、PDO(實線)與 ENSO(曲虛線)指標時間序列圖，直虛線為 KI 指標之標準差

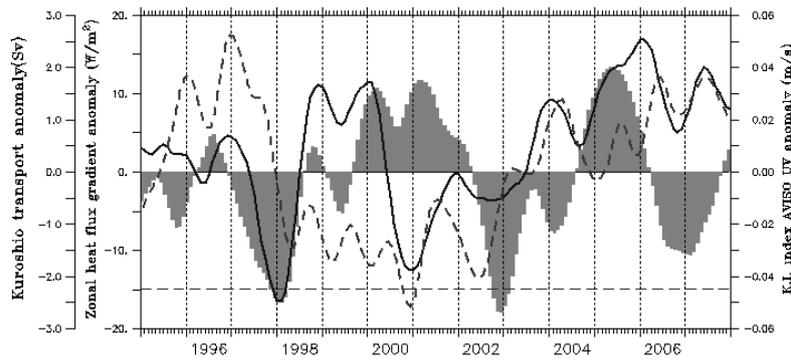


圖 5 KI(灰色)、經向熱通量梯度(實線)與黑潮傳輸量(虛線)時間序列圖

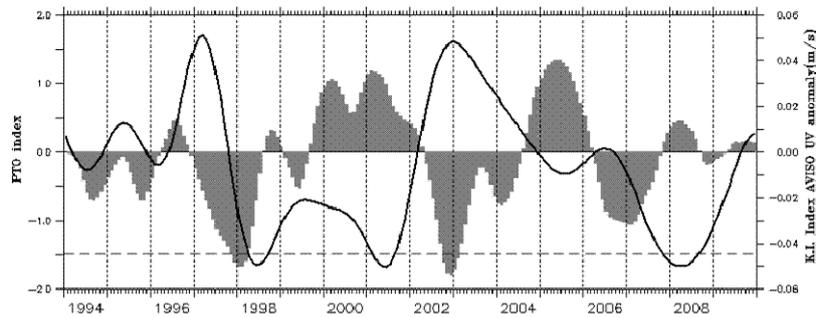


圖 6 KI(灰色)與 PTO(實線)指標時間序列圖

參考文獻

1. Chang, Y.L., and Oey, L.Y. (2012) "The Philippines-Taiwan Oscillation: Monsoon-Like Interannual Oscillation of the Subtropical-Tropical Western North Pacific Wind System and Its impact on the ocean," *Journal of Climate*, 25, 1597-1618.
2. Chao, S.Y. (1991) "Circulation of the East China Sea, a numerical study," *Journal of Oceanography*, 42, 273-295.
3. Chen, C.T. A. (1996) "The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf," *Oceanologica Acta*, 19(5), 523-527.
4. Hsin, Y.C., Chiang, T.L., and Wu, C.R. (2011) "Fluctuations of the thermal fronts off northeast Taiwan," *Journal of Geophysical Research*, 116, C10005.
5. Hwang, C., and Kao, R. (2002) "TOPEX/POSEIDON-derived space-time variations of the Kuroshio Current: applications of a gravimetric geoid and wavelet analysis," *Geophys Journal International*, 151, 835-847.
6. Ichikawa, K., Tokeshi, R., Kashima, M., Sato, K., Matsuoka, T., Kojima, S. and Fujii, S. (2008) "Kuroshio variations in the upstream region as seen by HF radar and satellite altimetry data," *International Journal of Remote Sensing*, 29, 6317-6326.
7. Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang,

- S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., and Potter, G.L. (2002) "NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2)," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631-1643.
8. Nitani, H. (1972) "Beginning of the Kuroshio," *In Kuroshio, its physical aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo Press, Tokyo, 129-163.
 9. Oey, L.Y., Hsin, Y.C., and Wu, C.R. (2010) "Why does the Kuroshio northeast of Taiwan shift shelfward in winter?," *Ocean Dynamics*, 60, 413-426.
 10. Wu, C.R., Lu, H.F., and Chao, S.Y. (2008) "A numerical study on the formation of upwelling off northeast Taiwan," *Journal of Geophysical Research*, 113, C08025.
 11. Yang, Y., Liu, C.T., Lee, T.N., and Johns, W.E. (2004) "Geostrophic uncertainty and anomalous current structure in association with mesoscale eddies delineated by altimeter observations east of Taiwan," *In: Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*, 205-211.
 12. Yang, Y., Liu, C.T., Lee, T.N., Johns, W.E., Li, H.W., and Koga, M. (2001) "Sea surface slope as an estimator of the Kuroshio volume transport east of Taiwan," *Geophysical Research Letters*, 28, 2461-2464.
 13. Yang, Y., Liu, C.T., Hu, J.H. and Koga, M. (1999) "Taiwan Current (Kuroshio) and Impinging Eddies," *Journal of Oceanography*, 55, 609-617.
 14. Zhang, D., Lee, T.N., Johns, W. E., Liu, C.-T. and Zantopp, R. (2001) "The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies," *Journal of Physical Oceanography*, 31, 1054-1074.