

黄海暖流源区海表面温度锋面的结构及季节内演变

刘传玉^{1,2,3}, 王 凡^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用 1985~2002 年月均和每 8 天平均的 AVHRR Pathfinder 卫星海表面温度数据, 分析了黄海暖流源区海表面温度锋面的分布特征及其季节和季节内演变过程的规律。分析结果表明, 黄海暖流源区海表面温度锋面只在冬季及其前后出现, 且是一个包含南北两支锋面的锋面系统, 其北支锋面位于 33°~34°N 之间, 大体呈东西走向, 南支锋面沿长江浅滩边缘, 呈西北东南走向, 作者称之为黄海暖流源区锋面。该锋面从 11 月下旬于济州岛西部生成并向西北方向扩展, 至 1, 2 月份达到最大程度, 于 2 月下旬后向东南方向退缩并在 3 月份至 5 月份之间消失。在该锋面系统的生长期和衰退期, 其南北两支锋面有时于西端连接在一起而形成指向西北的舌状锋面。黄海暖流源区锋面的演变过程与黄海暖流的演变过程紧密相关, 也对黄东海的质量和热量交换有重要影响。

关键词: 黄海暖流; 锋面; 黄海; 东海

中图分类号: P722.5; P722.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2009) 07-0087-07

黄海暖流是指冬季从济州岛西南部进入黄海的高温高盐流动(图 1), 其与两侧相对较冷的沿岸水相遇会导致温度锋面的产生。前人对冬季此锋面的研究较多, 对其他季节的研究则很少。郑义芳等^[1]根据 1977~1981 年逐年 2 月的资料, 发现从南黄海中部开始沿苏北浅滩及长江浅滩边缘南伸直至东海中部存在着一个狭长的 S 形的温度锋面, 并称该锋面为黄海暖流锋面。Ning 等^[2]利用 1981~1986 年的卫星 SST 资料和 1978~1986 年的卫星水色资料, 把这一锋面标记为黄海沿岸流锋面。从历史调查资料中, 许多研究还发现在济州岛西部存在着东西向的温锋面^[3~5]。Lie 等^[6~9]通过整理此区域的观测资料发现此处锋面呈舌状, 并可能在西部破裂; 作者用 1996 年 10 月和 1997 年 2~3 月的观测资料及 2000 年 11 月~2001 年 3 月连续的 6 张卫星图片大致描述了此舌状锋面南北两部分的季节内变化特征。He 等^[10]通过若干卫星图片指出, 黄海暖流区域的锋面分为位于西南部和东北部的两条锋面, 后者呈东西方向并能伸入到黄海中部。Hickox 等^[11]通过长期卫星 SST 资料, 把济州岛西部的锋面标记为济州岛西部锋面, 同时把环绕长江浅滩东南部边缘的锋面称作长江环状锋面。Park 等^[12]则通过

数值模拟的结果认为, 济州岛西部的锋面和环绕长江浅滩东南部边缘的锋面连为一体, 呈 S 状, 称为 济州-长江锋面。总的来说, 前人对于此区域的锋面形态特征及发展过程有了一定的认识, 但前人的研究还存在着两个问题, 一是所用资料的空间覆盖率和时间连续性有限, 对于此区域各锋面的结构、位置和命名都莫衷一是; 二是没有把各锋面的演变特征与黄海暖流相联系, 对已获得的锋面间的联系和季节内演变过程难下定论。因此, 作者利用长时间序列和较高时空分辨率的卫星 SST 数据, 并试图从与黄海暖流演变有关的锋面系统的角度, 分析黄海暖流区域锋面的结构和季节内演变特征。

收稿日期: 2009-03-09; 修回日期: 2009-04-14

基金项目: 中国科学院创新重大项目 (kzcx1-yw-12)

作者简介: 刘传玉 (1982-), 男, 山东临朐人, 博士生, 主要从事海洋环流和海洋锋面的研究工作, 电话: 0532-82898513, E-mail: liuchuanju@ms.qdio.ac.cn

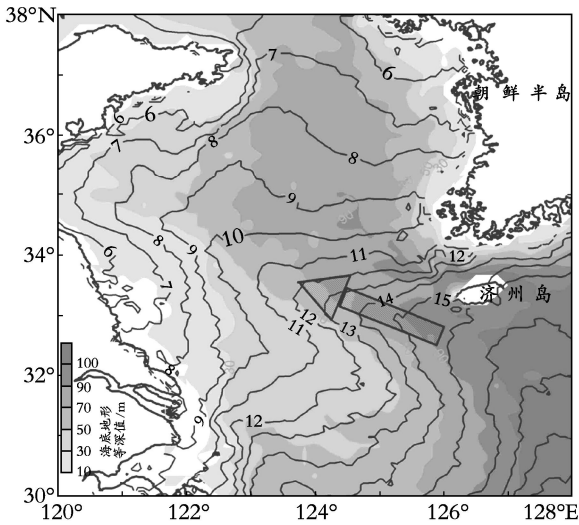


图1 研究区域海底地形和长期平均的1月份海表面温度分布

Fig. 1 Bottom topography and SST climatology in the studying area in January

灰度表示海底地形等深值 (m); 实线表示温度 (°C); 箭头指示黄海暖流源区及此处黄海暖流大体流向

Filled contours are for bottom topography unit: m; solid lines are for SST, unit: °C; the blank arrow indicates the origin area of the Yellow Sea Warm Current and main direction there

1 资料和方法

作者采用了第 4.1 版的 NOAA/NASA 的 AVHRR Pathfinder 的卫星海表面温度数据^[13], 这些数据获取自 Jet Propulsion Laboratory (JPL) 网站 (<http://podaac-www.jpl.nasa.gov>)。数据的起止年月是 1985 年 1 月至 2002 年 12 月, 已经平均到规则网格点上, 空间分辨率为 9 km, 时间尺度为月均和每 8 天平均。为了考察锋面的季节变化和演变过程, 我们对 1985~2002 年共 18 a 的 SST 数据进行了长期平均, 得到了月均的和 8 d 时间间隔的气候态 SST 数据。

作者以梯度法来获取锋面: 首先采用二维高斯滤波消除数据噪音的影响, 然后采用 Sobel 方法求取每个网格点 x, y 方向的梯度值 $(\frac{\partial T}{\partial x})$, $(\frac{\partial T}{\partial y})$ 及总的梯度大小, 即:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

同时求得垂直梯度方向的方向值, 即

$$D = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{\frac{\partial T}{\partial x}}\right) + \pi/2 \quad (2)$$

根据前人研究的经验^[11], 我们选择梯度不小于 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的点作为锋点, 则在锋点上公式(2)表示的方向为沿锋方向。利用每一锋点的梯度大小和沿锋方向即可画出此点锋的向量图, 其中可以箭头的长度或颜色表示锋的强度(即梯度的大小), 以箭头的方向表示锋的走向, 相邻的多个锋点会形成锋区(图 2); 从公式(2)可知, 箭头右侧的温度要高于左侧。本文中, 作者描述的实际上是锋区的形态特征。

2 黄海暖流源区锋面的季节变化

图 2 分别是 1985~2002 年多年平均的秋、冬、春和夏季(分别以 11, 2, 5 和 8 月份代表) 黄海暖流源区的海表面温度和锋面的分布特征。从图上可以看出黄海暖流源区的海表面温度锋面具有显著的季节变化特征。

2.1 秋季

11 月份, 海表等温线大体呈以济州岛西北部为中心向西半平面辐散的结构。在济州岛西北部 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间生成了一条锋面, 呈西南东北走向, 其西端约位于 $124.5\text{ }^{\circ}\text{E}$, $33.4\text{ }^{\circ}\text{N}$ 处, 东端伸入到了朝鲜海峡中。这就是黄海暖流源区锋面最初形成时的形态特征, 在此锋面的南北两侧分别是黄海暖流源区暖水和黄海暖流暖水与黄海冷水形成的混合水, 锋面的平均强度和宽度都很小, 分别约 $0.035\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 30 km 。值得指出的是, 在此锋面的北部, 即 $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线之间, 也存在着一条与此锋面平行的锋面, 从等温线分布可以看出, 有一冷水舌前锋直抵此锋面的北部, 这条锋面可能是朝鲜沿岸冷水与南部的混合暖水交汇形成的。

2.2 冬季

2 月份, 等温线呈现出由黄海暖流源区向西北方向伸展的舌状结构。在此季节, 黄海暖流源区的海表面温度锋面最成熟, 最显著, 形态及强度都发展到最大, 而且呈现出南北两支并存的结构。

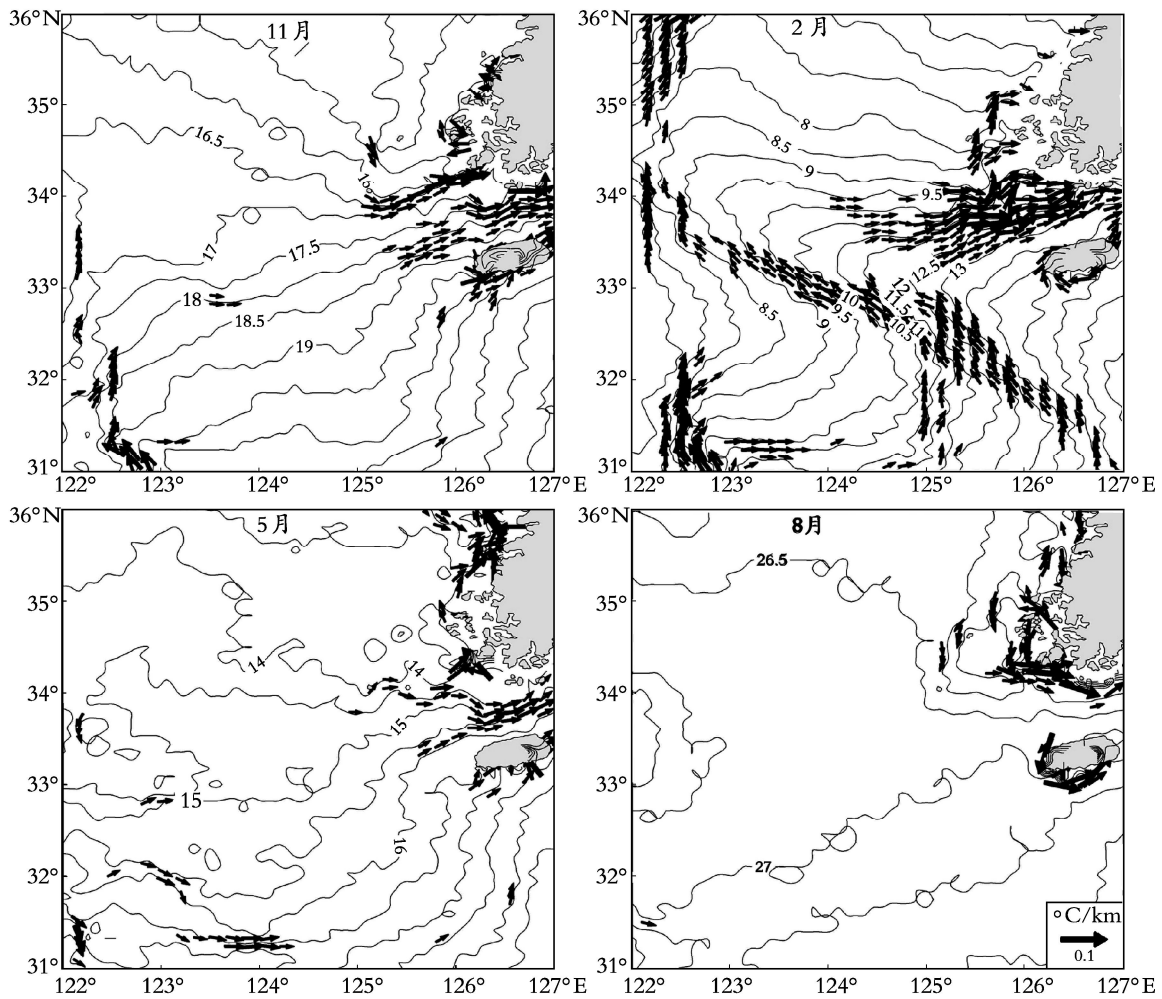


图 2 气候态的黄海暖流区域温度锋面的季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variations of the climatological thermal fronts in the Yellow Sea Warm Current origin area

11, 2, 5 和 8 月份分别代表秋、冬、春和夏季

Seasons of fall, winter, summer and spring are represented by months of November, February, May and August, respectively

北支锋面总体上位于 33.2°N 和 34.2°N 之间, 呈东西走向, 其西端可达 124°E , 东端伸入朝鲜海峡, 正好横跨黄海海槽中央。此锋面于 125°E 处略南凸, 使得锋面在 125°E 以西稍偏西北东南走向, 而 125°E 以东则稍偏东北西南走向。此锋面在 $125^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 之间的平均宽度约为 80 km , 平均强度超过了 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 但在 125°E 以西宽度仅为 30 km , 平均强度约为 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。此锋面的南北两侧分别是黄海暖流源区暖水和黄海冷水, 锋区内为混合后的暖水。

南支锋面呈西北东南走向, 总体沿长江浅滩边缘, 即 $50\sim 70\text{ m}$ 等深线; 其东北端可至 122.5°E , 34°N 处, 西南端可至 127°E , 31°N 处, 最长长度

可达 600 km 。在 125°E 处, 南支锋面最宽约 70 km , 在此经度附近, 南北两支锋面相距最近, 几乎连为一体。南侧锋面的平均宽度约为 30 km , 其平均强度为 $0.035^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

2.3 春季

5 月份, 舌状温度结构消失, 126°E 以西仅有微弱的海表锋面可见, 据文献[14], 黄海暖流锋面可能在海表以下的层次存在。 126°E 以东朝鲜海峡的海表面锋面还较为清楚, 但这些锋面是否是黄海暖流锋面还需要进一步考察。

2.4 夏季

8 月份, 如图所示的黄东海区域海表温度较为均匀, 海表面没有锋面存在。在朝鲜半岛西南角,

以及在济州岛西南沿岸存在着锋面，这些锋面可能是上升流锋面或潮汐锋面。

3 黄海暖流源区锋面的季节内演变过程

从以上的描述可知，研究海域较成体系的海表面温度锋面出现在从秋末至次年春初的时间段内，持续时间超过了半年，且在冬季形态明显，强度大，

这与黄海暖流在冬季较强^[15]的特征是一致的，因此，下文将该锋面系统统称为黄海暖流源区锋面。在一个季节内时间尺度的生命周期内，该锋面经历了产生、发展、成熟及衰退等几个阶段，每个阶段对应着不同的形态特征。

图 3 是 1985~2002 年多年平均的 8 d 时间间隔

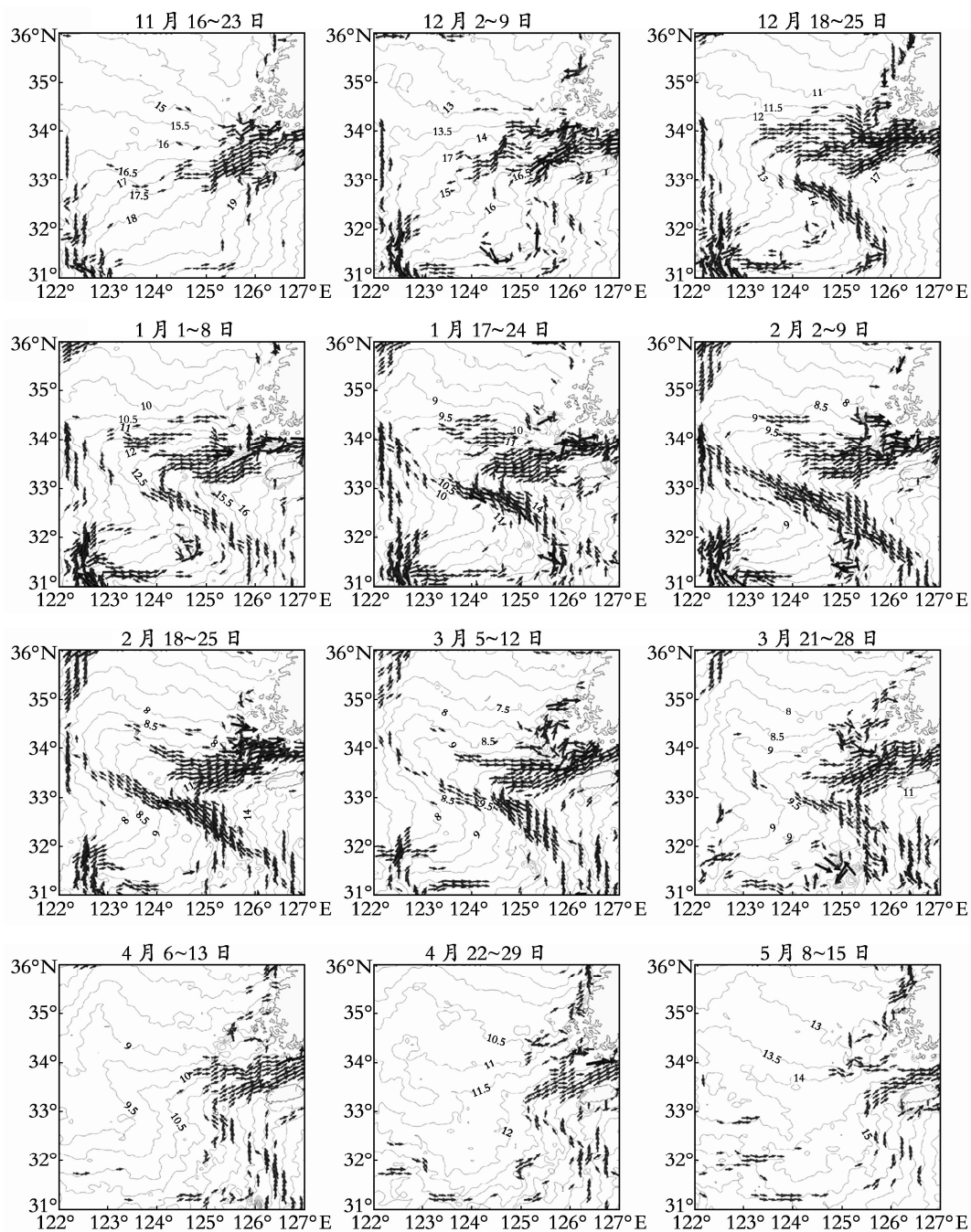


图 3 气候态的黄海暖流源区锋面的演变过程

Fig. 3 Evolution of the climatological Yellow Sea Warm Current Origin Area Front

的锋面的形态特征, 每张图片上标注了对应的时间段。为了减少图片数量, 我们每隔一个时间间隔选取一张图片, 这些图片展示了黄海暖流源区锋面的演变过程。图 4 展示了黄海暖流源区锋面平均强度、平均宽度及其向西的伸展程度等特征的演变, 其中对于北支锋面, 其平均强度(图 4a)以 125°~126° E,

33°~34° N 区域内的锋点的强度平均得到, 其向西的伸展程度以锋面最西端的经度表示(图 4a), 其宽度分别在 125° E, 125.5° E 和 126° E 经度处统计(图 4b); 对于南支锋面, 其宽度在 125° E 经度处统计(图 4c), 其平均强度以 125° E 处, 33°~34° N 区域内的锋点的强度平均得到。

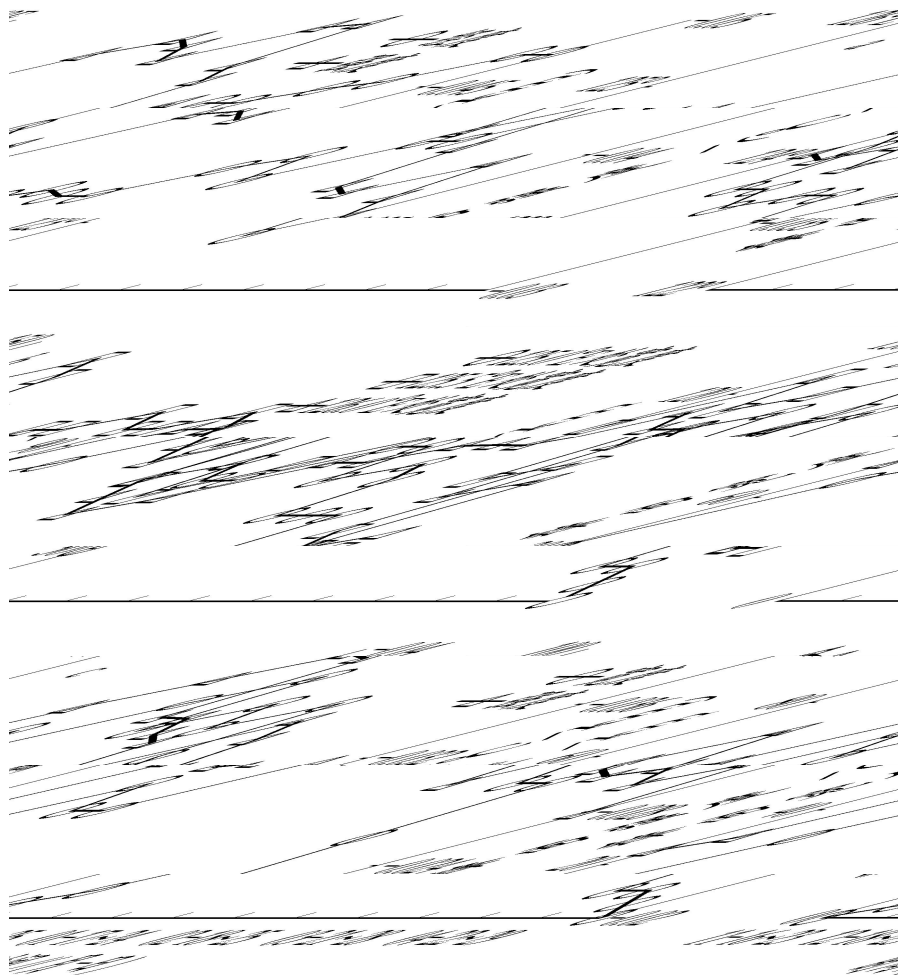


图 4 黄海暖流源区锋面气候态的伸展程度、宽度和强度等的演变特征

Fig. 4 Evolutions of the climatological location, width and intensity of the Yellow Sea Warm Current Origin Area Front

a. 北支锋面的最西端位置和锋面平均强度; b. 北支锋面在不同经度处的宽度; c. 南支锋面在 125° E 处的宽度和平均强度

a. Zonal location of the west tip and the mean strength of the northern front; b. width at different longitudes of the northern front; c. width at 125° E and mean strength of the southern front

3.1 生成阶段

从 11 月中旬至 12 月中旬, 黄海暖流源区锋面只在北纬 33° N 以北出现, 方向大体呈西南东北走向。其东端从 125° E 逐渐伸展至 124° E 附近, 而 125° E 以西的部分不断向北移动, 平均强度约为 0.04 °C/km; 其宽度也在逐渐增加, 直至达到 100 km

以上。12 月份以后, 舌状温度结构开始自济州岛西南部产生。

3.2 发展阶段

从 12 月下旬至 1 月中旬, 黄海暖流源区锋面处于发展阶段, 在这一阶段主要有四个明显的变化过程, 一是南支锋面出现, 其强度和长度逐渐增强;



二是南北两支锋面大体在 124°E 经度处连接在一起；三是北支锋面的西端不断地向西伸展，接近 123°E 处，且呈东西向分布；四是北支锋面的平均强度迅速增大，由 $0.04^{\circ} \text{C}/\text{km}$ 变化到 $0.045^{\circ} \text{C}/\text{km}$ 以上，但宽度却不断减小。

3.3 成熟阶段

从 1 月中旬至 2 月下旬，黄海暖流源区锋面处于成熟时期。在这一时期，主要的形态变化过程有三个，一是南北两支锋面连接的位置往西移动，从 125°E 西移至 124°E 处，随后南北两支锋面断裂，不再相连；二是南支锋面的长度、宽度和强度仍然在不断增加，直至在 2 月中旬达到最大，此时锋面往西北可达 34.5°N 以北并与山东半岛南部的锋面相连，最大宽度和强度分别为 80 km 和 $0.038^{\circ} \text{C}/\text{km}$ ；三是北支锋面的宽度达到最小，同时平均强度达到最大，最小宽度和最大强度分别为 70 km 和 $0.047^{\circ} \text{C}/\text{km}$ 。

3.4 衰退阶段

自 2 月下旬至 5 月中旬，黄海暖流源区锋面经历了较长时间的衰退过程。衰退过程主要体现在以下几个方面的变化：一是自 2 月下旬开始，南北两支锋面于 125°E 附近重新连接在一起，连接点不断往东南移动；二是北支锋面强度逐渐减小到 $0.035^{\circ} \text{C}/\text{km}$ ，但宽度维持 100 km 至 4 月上旬，其后才逐渐减弱到 5 月份的 30 km 左右，其最西端从 124°E 附近逐渐退缩到 125.5°E 附近；三是南支锋面自北向南衰退并首先于 3 月份消失。

从以上演变过程可见，黄海暖流源区锋面在 1，2 月份处于其形态和强度的强盛时期。另外，在此时期内，北支锋面具有两个特征值得注意：(1) 锋区的南部边缘离开济州岛的北岸；(2) 锋区的北部边缘在 $125.6^{\circ} \sim 125.8^{\circ} \text{E}$ 之间呈向锋区内凹陷的结构，与之对应，1 月份和 2 月初的等温线也在近岸向南凸出，之前之后此现象则不明显。这两个结构可能说明了黄海暖流往北的和朝鲜西岸沿岸流往南的冲压作用。

4 结论

前人研究中所谓的 S 形锋面、黄海沿岸流锋面、济州岛西部锋面，环长江浅滩锋面等，其各部分的生成和衰亡的过程与黄海暖流的兴衰过程紧密相连，同时也是反映黄海暖流兴衰的直观标志，在黄海暖流最强盛时，上述锋面也随之强盛且

相互连接，因此可统称为黄海暖流源区锋面。

海表面的黄海暖流源区锋面在秋末至春初出现，在春秋其他时间及在夏季则观测不到。秋季末，黄海暖流源区北部首先产生大体呈东西向的北支锋面，至秋末冬初，南部也产生大体呈西北东南走向的南支锋面；开始时，两支锋面相距很近或连接在一起而呈舌状，随着时间的推移，舌状锋面不断西移，至 1 月份，舌状锋面断裂，南北两支锋面独立存在并继续往西部伸展；2 月下旬以后，南北两支锋面均开始退缩，并在 3 月份中旬重新结合成舌状后继续向济州岛方向退缩；3 月下旬以后，南支锋面首先消失，北支锋面则持续到 5 月份中旬。

北支锋面和南支锋面均在 1，2 月份达到最大强度，分别超过 $0.048^{\circ} \text{C}/\text{km}$ 和 $0.037^{\circ} \text{C}/\text{km}$ ；北支锋面在此两个月份达到最小宽度，约为 60 km 。北支锋面的宽度经历了小-大-小-大-小两个周期的变化，而南支锋面的宽度只经历了小-大-小一个周期的变化，前者与西朝鲜沿岸流在 1 月份的冲压有关。

由于冬季强烈的垂直混合，海表面的黄海暖流源区锋面也指示了表层以下的结构特征^[9]，又因其处于黄东海交汇处，此锋面必然对黄东海质量及热量的交换起着重要作用。本研究结果为此方面的研究提供了一个初步的基础。

参考文献：

- [1] 郑义芳, 丁良模, 谭锋. 黄海南部及东海海洋锋的特征[J]. 黄渤海海洋, 1985, 3(1): 9-16.
- [2] Ning Xiuren, Liu Zilin, Cai Yuming, *et al.* Physicobiological oceanographic remote sensing of the East China Sea: Satellite and in situ observations [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C10): 21 623-21 635.
- [3] 乐肯堂, 毛汉礼. 南黄海冬季温盐结构及其流系[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(6):505-515.
- [4] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 南黄海环流的若干特征[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 1-16.
- [5] 汤毓祥, 邹娥梅, Lie H J. 冬至初春黄海暖流的路径和起源[J]. 海洋学报, 2001, 23(1):1-12.
- [6] Lie H J. Wintertime temperature-salinity characteristics in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea) [J]. *J Oceanogr Soc Jpn*, 1985, 41:291- 298.
- [7] Lie H J, Cho C H, Lee J H, *et al.* Seasonal variation of the

- Cheju Warm Current in the northern East China Sea [J]. **J Oceanogr**, 2000, 56:197-211.
- [8] Lie H J, Cho C H, Lee J H, *et al.* Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow?[J]. **J Geophys Res**, 2001, 106: 22 199- 22 210.
- [9] Lie H J, Cho C H, Lee S. Tongue-shaped frontal structure and warm water intrusion in the southern Yellow Sea in winter[J]. **J Geophys Res**, 2009, 114, C01003, doi:10.1029/2007JC004683.
- [10] He Mingxia, Chen Ge, Sugimori Y. Investigation of mesoscale fronts, eddies and upwelling in the China Seas with satellite data [J]. **Global Atmosphere and Ocean System**, 1995, 3: 273-288.
- [11] Hickox R, Belkin I, Cornillon P, *et al.* Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai Seas from satellite SST data [J]. **Geophysical Research Letters**, 2000, **27**(18):2 945-2 948.
- [12] Park S, Chu P. Thermal and haline fronts in the Yellow/East China Seas: surface and subsurface seasonality comparison [J]. **Journal of Oceanography**, 2006, 62:617-638.
- [13] Vazquez J K, Perry K K. NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Set User's Reference Manual[EB/OL]. ftp://podaac.jpl.nasa.gov/data_collections/woce_v3/avhrr/docs/usr_gde4_0.htm#4.2. 2004-05-20.
- [14] 邹娥梅, 汤毓祥, 李兴宰, 等. 1996 年春季南海水文特征和水团分析[J]. **海洋学报**, 2000, **22**(1):17-26.
- [15] 管秉贤. 黄东海浅海水文学的主要特征[J]. **黄渤海海洋**, 1985, **3**(4):1-10 .

Distributions and intra-seasonal evolutions of the sea surface thermal fronts in the Yellow Sea warm current origin area

LIU Chuan-yu^{1,2,3}, WANG Fan^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao, China; 2.Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039 ,China)

Received:Mar.,9, 2009

Key words: the Yellow Sea warm current; front; the Yellow Sea; the East China Sea

Abstract: Based on the satellite AVHRR pathfinder SST data of monthly and 8-day resolutions from 1985 through 2002, we analyzed the intra-seasonal evolution of the sea surface thermal fronts in the Yellow Sea warm current origin area. The results show that a frontal system is composed of a northern part and a southern part occurring in this area from late fall to spring; we call it the Yellow Sea warm current origin area front. The northern part resides between 33°N and 34°N and generally in the east-west direction while the southern part locates along the margin of the Changjiang Bank. The Yellow Sea warm current origin area front forms in northwest of Cheju Island in late November and extends northwestward till in January and February when it gets a full shape, then it shades and retreats southeastward before it finally disappears in spring. In the developing and decaying periods, the northern and southern parts may connect at the west tips to form a tongue shape front. This frontal system on the one hand is influenced by the Yellow Sea warm current and on the other hand influences the exchange of water and heat fluxes between the Yellow Sea and the East China Sea.

(本文编辑 : 刘珊珊)