

冬季南海表层黑潮的入侵形式以及相关风场的影响

杜天时

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 利用业务化海表面温度和海冰分析系统的海表面温度(SST)数据,分析了十年间(2008—2017年)冬季南海的表层黑潮入侵,可将南海表层黑潮的入侵可分为西向入侵型和西北向入侵型两种方式。利用经验正交函数对SST场和海表面风场进行分解,发现可用SST场第二模态时间系数来表征黑潮入侵形式的年际变化趋势,用风场的第二模态时间系数表征风向的变化。通过Ekman流场分析发现吕宋海峡南部海域风向的年际变化与冬季表层黑潮入侵形式的年际变化存在着密切联系,但这个风向的改变并非是影响表层黑潮入侵形式的唯一因素。

关键词: 黑潮入侵;南海;SST;冬季;风场;EOF;Ekman流场

中图分类号: P731.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)04-0060-08

1 引言

黑潮(Kuroshio)作为全球第二大暖流,具有高温、高盐、流幅窄、流速快、流量大等特点;它发源于菲律宾以东的北赤道流,沿吕宋岛东岸北上,经过吕宋海峡从台湾岛北部进入东海,后沿东海大陆架折向东北沿日本继续流向东北,最后在九州岛南部海域汇入太平洋。黑潮在流经吕宋海峡时会以分支或流套的形式入侵南海,对南海的温盐结构、环流特征产生影响^[1-2]。因此,研究黑潮入侵南海的问题具有重要的科学意义。

黑潮在流经吕宋海峡时,由于西边界支持的缺失,导致其西侧流体具有较大的相对正涡度,脱离黑潮主体,整个黑潮以弯曲、扩展的形式在海峡处产生形变^[3]。黑潮入侵南海的季节变化和年际变化,主要受风应力、北赤道流分叉以及El Niño-Southern Oscillation(厄尔尼诺-南方涛动,ENSO)和中尺度涡等因素的影响。在季节变化方面,主要受季风的影响,冬季的东北季风利于黑潮水的入侵,而夏季强盛的西南季风则减弱了入侵;在年际变化方面,黑潮入侵南海的输送量变化与北赤道流的分

叉位置变动有很好的对应关系,当分叉点偏南时,吕宋海峡东侧黑潮输运量较大,不利于黑潮的入侵,反之有利于入侵^[4-5];而北赤道流分叉位置的变动则与ENSO和Pacific Decadal Oscillations(太平洋十年涛动,PDO)有关^[4,6];北太平洋中尺度涡的西传也会导致黑潮入侵形式的变化,黑潮处于滞迟过程的临界状态时,其路径易受中尺度涡影响,且只有反气旋式中尺度涡会诱使黑潮向入侵状态转变^[7-9]。但是对于吕宋海峡处风场变化所引起的黑潮入侵南海的年际变化还需要进一步研究。本文利用卫星观测的高精度SST(Sea Surface Temperature,海表面温度)数据和EOF(Empirical Orthogonal Function,经验正交函数分析方法)分析方法,定性分析了从2008—2017年冬季黑潮表层流入南海的路径及其变化,并将其与同期的风场资料建立了联系。

2 数据来源与选取

2.1 数据来源

文中使用的海表面温度采用业务化海表面温

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-11-04。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604103)。

作者简介: 杜天时(1997-),男,本科在读,主要从事大洋环流研究。E-mail: dutianshi@hotmail.com

度和海冰分析系统 (operational SST and sea ice analysis, OSTIA) 的 SST 数据, 由高分辨率海表温度组 (The Group for High Resolution Sea Surface Temperature, GHRSSST) 的产品所提供。该产品通过集成多颗卫星传感器的数据并结合了现场观测数据, 由最优插值 (Optimal Interpolation, OI) 方法给出最终的全球海表面高精度 ($0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$) SST 数据。OSTIA 的 SST 数据为日平均数据, 文中所用 SST 月均数据是通过这些日平均数据计算得到。本文所用风速风向数据来源于 METOP-A 卫星上搭载的 ASCAT 散射计的月平均数据, 并用该风场数据计算了表层 Ekman 流场。本文的地转流数据采用的是全球海洋多种观测产品 (MULTIOBS), 该产品利用统计方法将卫星和观测数据再分析得到。

2.2 数据选取

吕宋海峡是黑潮与南海进行水交换的主要地点, 也是黑潮影响南海的直接通道^[10]。为此, 本文选取的研究范围为 $116^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$, $17^{\circ} \sim 24^{\circ}\text{N}$ (见图 1)。由于夏季海水温度升高, 黑潮水体的温度与其周围海水温度区别较小, 不易通过 SST 图像分辨出黑潮的位置, 故本文仅研究冬季南海的表层黑潮入侵。对于南海而言, 12 月、1 月、2 月为其冬季, 1 月又为冬季现象表现明显的月份。曲堂栋等^[11]通过历史资料的分析认为 1—2 月黑潮对南海输送量最大、黑潮入侵现象较强。因此, 本文选取 1 月为冬季代表月,

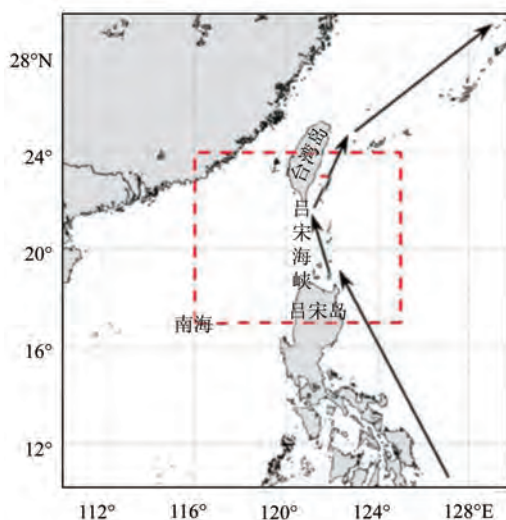


图1 研究区域地理位置及黑潮流向示意图
(红色方框内代表本文研究区域, 黑色箭头代表黑潮的流向)

利用 1 月的 SST 数据分析冬季南海表层黑潮的入侵问题。

3 结果与讨论

3.1 黑潮入侵南海的形式

南海的黑潮入侵并不是黑潮主轴拐入吕宋海峡入侵南海, 而是黑潮在经过吕宋海峡时有一西向分支进入吕宋海峡入侵南海^[12], 其分支可形成黑潮的流套结构^[13]。Caruso 等^[14]基于 SST、SSHA (Surface sea height anomaly, 海高度距平) 等资料分析指出: 黑潮入侵南海的形式有着明显的年际变化, 尤其在冬季。为了更好地认识黑潮流动形式的年际变化, 本文选取了 2008—2017 年 1 月的月平均 SST 数据进行分析 (见图 2)。图中等温线 (实线) 弯曲方向大致与地转流与 Ekman 漂流叠加的流向 (箭头) 相同, 故根据黑潮的平均流向, 认为每条等温线上弯曲程度最大的点为流速最大的点, 选取这些点作为流轴点, 顺着流向连接这些点即得到黑潮的表层流轴。在等温线图上, 可以明显的看出黑潮流轴的位置变化。从上述 10 a 的 1 月平均 SST 数据可以清晰的看出: 冬季黑潮表层流的路径大致可分为 3 种: (1) 黑潮表层流轴在 21°N 附近明显由西北方向转到西向方向, 入侵南海 (见图 2d、e、h、j); (2) 黑潮表层流轴一直沿着西北或者西北偏北的方向入侵南海 (见图 2a、c、f、g、i); (3) 黑潮表层流轴没有明显的入侵南海 (见图 2b)。下面就黑潮表层流轴在冬季入侵南海的 3 种形式 (西向入侵型、西北向入侵型和不入侵型) 进行详细分析。

3.1.1 西向入侵型

从图 2d 可以看出, 2011 年 1 月的黑潮表层流轴从 (122°E , 19.5°N) 开始沿着西北-西北偏北向进入吕宋海峡, 大约到达 120.8°E , 21.2°N 后迅速向西偏折进入南海; 2012 年 1 月的黑潮表层流轴 (见图 2e) 从 (122°E , 19.5°N) 开始沿着西北向进入吕宋海峡, 大约到达 121.1°E , 20.5°N 后迅速向西偏折进入南海; 2015 年 1 月的黑潮表层流轴 (见图 2h) 从 (122°E , 19.3°N) 开始沿着西北向进入吕宋海峡, 大约到达 120.8°E , 20.7°N 后向西偏折并沿着西北偏西方向进入南海; 2017 年 1 月的黑潮表层流轴 (见图 2j) 从

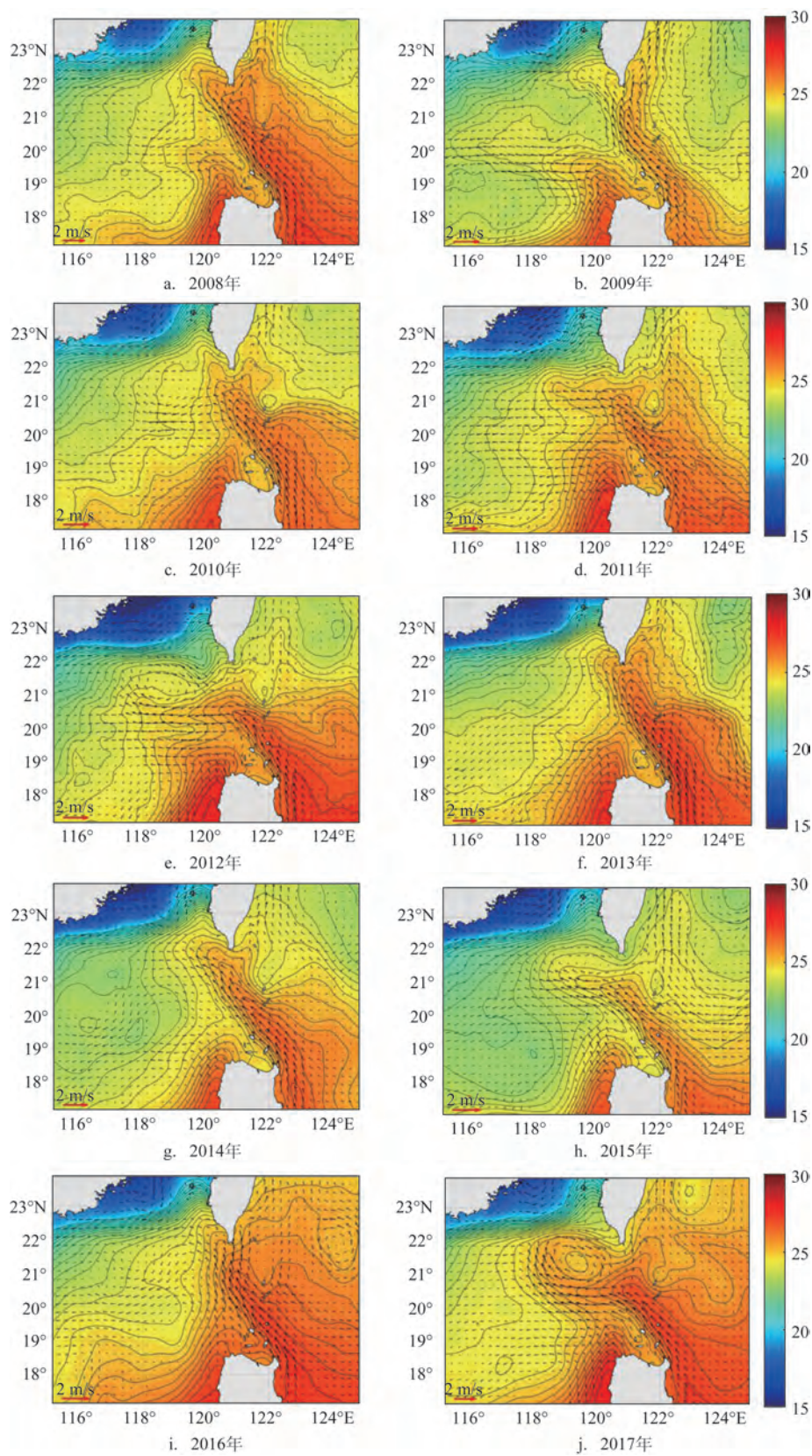


图2 2008—2017年1月吕宋海峡和南海海域月均SST(单位:℃)
(流场为地转流和Ekman漂流的叠加流场,实线为等温线,箭头表示流场)

(122°E, 19.5°N)开始沿着西北向进入吕宋海峡, 大约到达 121.1°E, 20.5°N 后迅速向西偏折进入南海。

从上述 4 a 1 月份黑潮入侵南海的路径可以看出:(1)黑潮表层流开始进入吕宋海峡的位置基本相同;(2)黑潮表层流进入吕宋海峡后都是先沿着西北向继续入侵,然后在稍微不同的地点开始向西偏转进入南海。其中,2012 和 2017 年的黑潮分支,在大约 121.1°E, 20.5°N 的位置迅速向西偏折进入南海;2011 年,在大约 121.1°E, 20.5°N 的位置先(由西北)向北偏折,到达 120.8°E, 21.2°N 后再迅速向西偏折进入南海;2015 年,在大约 120.8°E, 20.7°N 的位置,转向沿着西北偏西方向进入南海。

3.1.2 西北向入侵型

从图 2a 可以看出,2008 年 1 月黑潮表层流轴从 (122°E, 19.5°N)开始沿着西北偏北向进入吕宋海峡,保持相同流向穿越吕宋海峡直至 121°E, 21.5°N 附近出现分叉,一支向西北进入台湾海峡南端,另一支转向东北方向沿台湾岛东侧北上;2010 年 1 月(见图 2c)黑潮表层流轴从 (122°E, 19.5°N)开始沿着西北偏北向进入吕宋海峡,沿着这个方向穿越吕宋海峡直至 121.3°E, 20.5°N 附近后,稍微向北偏折,继续流动至 121°E, 21.5°N 处出现分叉;2013 年 1 月(见图 2f)黑潮表层流轴从 (122°E, 19.8°N)开始沿着西北偏北向进入吕宋海峡,到达 121.8°E, 20.3°N 附近稍微向北偏折,继续流动至 121°E, 21.5°N 处出现分叉;2014 年 1 月(见图 2g)黑潮表层流轴从 (122°E, 19.5°N)开始沿着西北偏北向进入吕宋海峡,沿此方向穿越吕宋海峡,直至 120.5°E, 21.3°N 附近出现分叉;2016 年 1 月(见图 2i)黑潮表层流轴从 (122°E, 19.5°N)开始沿着西北偏北向进入吕宋海峡,沿此方向穿越吕宋海峡直至 121°E, 21°N 附近,接着出现分叉。

通过这 5 a 的综合特征可知:(1)黑潮表层流开始进入吕宋海峡的位置基本相同,但是相较于西向入侵型略微偏北;(2)黑潮表层流在进入吕宋海峡后均是先向西北向入侵,穿越吕宋海峡,在 121°E, 21°N 附近分为两支,稍弱的一支继续沿西北向进入台湾海峡南端,稍强的一支转向东北向沿台湾海峡东岸北上,与黑潮主轴汇合。其中,除 2014 年未出现向北的偏折外,2010、2013 年两年在 121.5°E,

20.5°N 附近向北偏折,而 2008、2016 两年则是在 121°E, 21°N 有向北的偏折,随后迅速分叉。

3.1.3 未入侵形态

Shaw^[15]通过历史水温调查数据分析发现吕宋海峡与太平洋的水交换输运有冬季强夏季弱的趋势,马超等^[16]通过 Argo 浮标数据证实了这一理论,虽然黑潮在冬季入侵较为明显,但是 2009 年(见图 2b)黑潮主轴在 121.2°E, 20.3°N 附近有一个明显的北向偏折,随后转向东北流出了吕宋海峡,并未越过 120.4°E 经线^[17]进入南海,所以 2009 年 1 月的黑潮属于未入侵形态。

3.2 影响黑潮入侵的因素

3.2.1 黑潮入侵形式的年际变化

为进一步探究影响表层黑潮入侵形态的因素,首先需定性的确定表层黑潮入侵形式的年际变化。由图 2 可知表层黑潮入侵形式的变化对于吕宋海峡处的海平面温度分布影响最大,所以对 118°~124°E, 18°~23°N 的范围内的 SST 距平场进行 EOF 分解,并选取由于表层黑潮入侵形态变化引起的 SST 变化的模态,其模态时间系数即可定性的表征表层黑潮入侵形式的年际变化。

EOF 分解的第一模态,因为反映的是空间模态在任意时间的一致变化,这里不予考虑。EOF 分解第二模态方差贡献率为 21.2% 且通过显著性检验,结合空间模态和时间序列(见图 3)可以发现,第二模态在区域 A (118°~120.8°E, 20°~21°N)有一负异常,而在区域 B (120°~122°E, 21°~22°N)有一正异常。第二模态的时间系数(见图 3 实线)在 2011、2012 和 2015 这 3 年为负值,表明在这 3 年间,区域 A 的 SST 为正异常,这与黑潮西向入侵的年份相符;由于黑潮的西向入侵使得黑潮所携带的暖水影响到区域 A 的 SST,使得该区域水温上升,产生正异常。而对于发生黑潮西北向入侵的年份,区域 A 并未受到暖水影响,因此表现为负异常;同时,入侵的黑潮暖水北上,影响了区域 B 的 SST,使得该区域水温上升,表现为正异常。对应于 2017 年的黑潮西向入侵,第二模态时间系数虽然不是负值,但是与 0 相差不大。这是由于该年受到涡旋(见图 2j)的影响使得黑潮所携带的暖水影响范围扩大,进而影响到 B 区从而使得时间系数偏大。

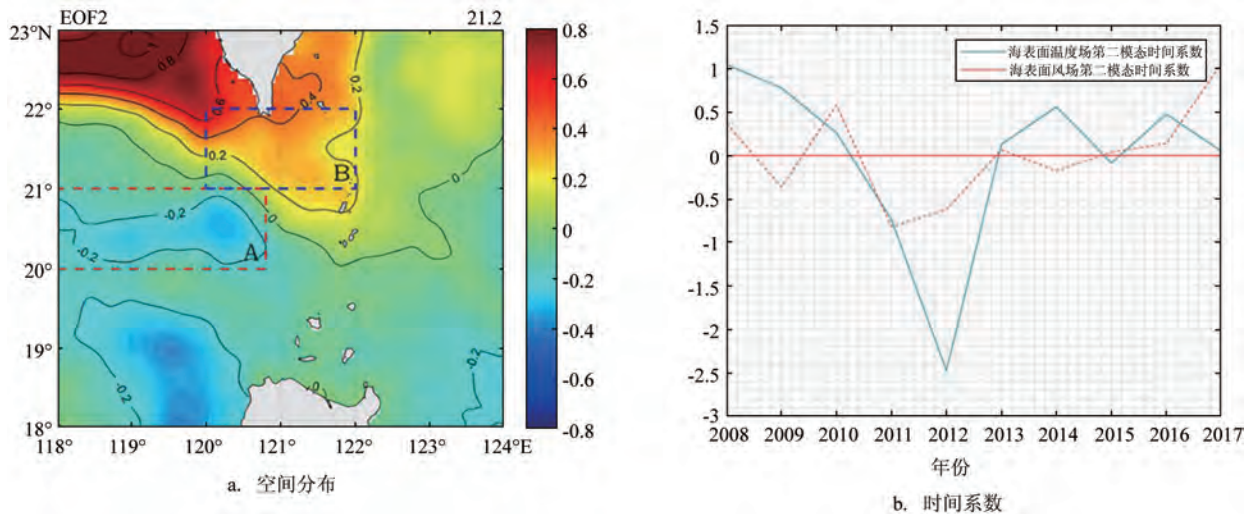


图3 EOF分解第二模态的空间分布和时间系数

根据上面的分析,可以认为:EOF分解所得第二模态所表征的SST变化是由黑潮入侵的形式所决定,故可以选取第二模态时间系数表征黑潮入侵形式的年际变化。

3.2.2 风场变化对表层流的影响

南峰的研究认为:黑潮通过巴林塘海峡之后,由于主轴路径的明显区别产生了不同的入侵形式^[18]。本文上面的分析(见图2)发现:黑潮主轴在吕宋岛东岸时方向均向北,但在越过吕宋岛后就会产生差异,且大部分西向入侵型的黑潮在21°N以南就已进入南海。为了研究黑潮入侵形式的改变与海表面风场的变化是否存在密切联系,利用海表面风场数据计算出吕宋海峡南部海域的表层Ekman流场来进行研究。选择风场的范围为120°~122°E, 18.5°~21°N,图4是2008—2017年10 a间的海表面Ekman流场。从中可以看出:吕宋海峡南部的Ekman流场在不同的年份之间存在着明显的年际变化。例如,在2011、2012年,从流向看是明显的西向;而在2008、2010年,流向显示是明显的西北向。

为进一步探究不同年份海表面风场的变化与黑潮入侵形式的关系,对所选区域内的风场进行EOF分析。第一模态反应的是风速随时间的变化故不予考虑,而第二模态则反映了风向的变化并画出该模态时间系数(见图3)。考虑到2017年有一个明显的涡旋结构使黑潮进入南海(见图2),黑潮表

层流轴受其影响与其他年份存在一定差异,所以剔除2017年数据后,计算风场第二模态时间系数与海表面温度场第二模态时间系数的相关系数为0.61,两者具有显著相关关系,说明海表面风场风向的年际变化与表层黑潮入侵形式存在一定的联系。

这可用Ekman漂流理论做出解释,北半球水体的体积输运只存在于与风向垂直的方向上且向风向的右侧输运;而当相对水深 $\frac{h}{D_0} > 0.5$ (其中 h 是海深, D_0 是Ekman摩擦深度)时表层流和风向的夹角大致为45°。所以,风向角越接近于270°,表层流越向西北偏(如2010年,见图4c),体积输运越向西北;而风向角趋向于215°时表层流向西偏(如2011、2012年,见图4d、e),体积输运向西,与黑潮西向入侵型的表层流场相近。虽然Qu^[19]推测Ekman直接引起的季风输运仅占上层海水(0~600 m)西向输运的10%,李云等^[20]运用模式也证实了这一点,但是风向改变引起的风漂流改变与表层黑潮入侵形式的变化大致吻合,认为表层黑潮主轴路径在越过吕宋岛后受风场的年际变化影响产生差异,进而影响表层黑潮入侵形式的年际变化。

在黑潮以西向入侵为主的4 a中,2011和2012两年的流向更偏西,而另外两年的流向却更偏西北。同样,在黑潮以西北向入侵型为主的年份中,2009、2014年流向却更偏西。因此,部分年份虽然具有相同的入侵形式,但风向却有较大差异,这说

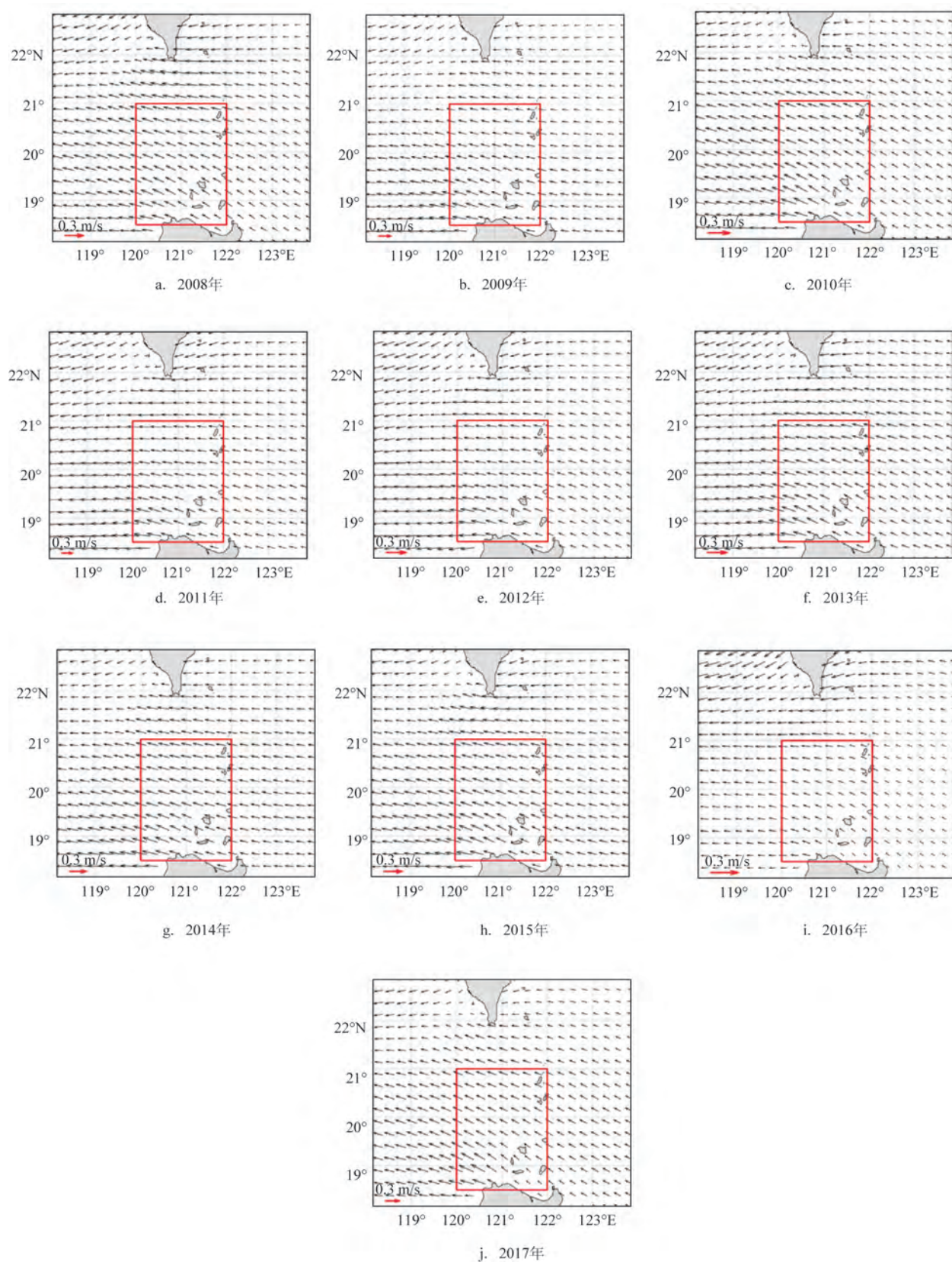


图4 2008—2017年1月吕宋海峡月平均海表面Ekman流场

明由于风向变化导致的 Ekman 流场变化虽然会对黑潮表层流的入侵形式起到一定的影响,但黑潮表层流的入侵形式并不完全取决于此,还与其他多方面因素有关,如吕宋海峡的压力梯度和涡旋。

4 结论

通过对卫星观测的 2008—2017 年间冬季 1 月份 SST 和海表面风场数据进行分析,研究了冬季黑潮表层流入侵南海的形式以及海表面风场的变化对黑潮表层流入侵形式的影响,得到了以下结论:

(1) 冬季表层黑潮入侵南海的形式大致上分为两种,西向入侵型和西北向入侵型;

(2) 当黑潮进入吕宋海峡时,西向入侵型初始的进入位置比西北向入侵型初始的进入位置略微偏南;

(3) 对海表面温度距平场进行 EOF 分解,第二模态反映表层黑潮入侵形式不同所引起的海表面温度差异,故第二模态的时间系数可表征表层黑潮入侵形式的年际变化;

(4) 对吕宋海峡南部海域一月的海表面风场进行 EOF 分解,第二模态反映了风场风向的变化且与该月黑潮入侵形式的年际变化关系密切;

(5) 在部分西向入侵型年份,风向更偏西北,其表层流向和体积输运与西向入侵型的表层流场相符合。然而,并非所有西向入侵型年份都有相同或类似的表层风向,所以冬季表层黑潮的入侵形式不仅与表层风场有关,还受到其他诸多因素的影响。

本文仅分析了黑潮表层流的入侵形式与风场之间的联系,影响其入侵形式的其他因素和全深度流场与风场之间的关系仍待进一步分析。

致谢: 本文的指导老师为中国海洋大学海洋与大气学院马超副教授。

参考文献

- [1] Nan F, Xue H J, Yu F. Kuroshio intrusion into the South China Sea: a review[J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 137: 314-333.
- [2] 贾英来. 吕宋海峡黑潮形变的时空分布特征和形成机制[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
- [3] 刘秦玉, 刘倬腾, 郑世培, 等. 黑潮在吕宋海峡的形变及动力机制[J]. *青岛海洋大学学报*, 1996, 26(4): 413-420.
- [4] Qiu B, Chen S M. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North equatorial current off the Philippines[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(11): 2525-2538.
- [5] Sheremet V A. Hysteresis of a western boundary current leaping across a gap[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(5): 1247-1259.
- [6] Wang D X, Liu Q Y, Huang R X, et al. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(14): L14605.
- [7] Lien R C, Ma B, Cheng Y H, et al. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(4): 2129-2142.
- [8] Zheng Q A, Tai C K, Hu J Y, et al. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(4): 365-376.
- [9] 袁东亮, 李锐祥. 中尺度涡旋影响吕宋海峡黑潮变异的动力机制[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(4): 1-9.
- [10] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 250-296.
- [11] Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C3): 6415-6424.
- [12] 黄企洲. 巴士海峡黑潮流速和流量的变化[J]. *热带海洋学报*, 1983, 2(1): 35-41.
- [13] 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨[J]. *台湾海峡*, 1989, 8(1): 89-95.
- [14] Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(4): 559-575.
- [15] Shaw P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine sea water into the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C1): 821-827.
- [16] 马超, 吴德星, 鞠霞. 利用 Argos 浮标资料对黑潮入侵南海问题的分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, (2): 1-5.
- [17] 郭景松, 冯颖, 袁业立, 等. 入侵南海的黑潮流套及其脱落涡旋[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(3): 537-544.
- [18] 南峰. 台湾西南部海域流—涡结构及其演变规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [19] Qu T D. Upper-layer circulation in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(6): 1450-1460.
- [20] 李云, 俞永强. 涡分辨率全球海洋环流模式 LICOM 模拟的吕宋海峡流场的季节变化[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(5): 547-558.

Intrusion pattern of the surface Kuroshio into the South China Sea in winter and the impact of related wind fields

DU Tian-shi

(College of Ocean and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100 China)

Abstract: The surface Kuroshio intrusion pattern into the South China Sea in winter from 2008 to 2017 is analyzed using the Sea Surface Temperature (SST) data of the Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis System. The intrusion of the surface Kuroshio into the South China Sea can be divided into the westward intrusion type and the northwestward intrusion type. The empirical orthogonal function is used to decompose the SST field and surface wind field. It is found that the time coefficient of the second mode of the SST field can be used to characterize the inter-annual variation trend of the Kuroshio intrusion pattern, while the time coefficient of the second mode of the sea surface wind field can be used to characterize the change of the wind direction. The Ekman flow field analysis shows that the inter-annual variation of the surface Kuroshio intrusion pattern in winter is closely related to the inter-annual variation of the wind direction in the southern part of the Luzon Strait, which is not the only factor affecting the pattern of surface Kuroshio intrusion.

Key words: Kuroshio intrusion; South China Sea; SST; winter; wind field; EOF; Ekman flow field