

# 台湾以东黑潮流量变异与冬季 西北太平洋海洋-大气相互作用\*

温娜 刘秦玉

(中国海洋大学物理海洋实验室 海洋-大气相互作用及气候实验室 青岛 266003)

**提要** 通过对历史资料进行奇异值分解、合成分析及相关分析,揭示了对应冬季台湾以东黑潮流量增强(减弱)时,西北太平洋海区异常失热(得热),北太平洋(北纬 20°N 以北)上空 500hPa 位势高度负异常(正异常);进一步证实了冬季西北太平洋海洋-大气相互作用是一个正反馈过程;发现了冬季台湾以东黑潮的暖平流作用可能是维持该正反馈过程进行的一个必要条件;通过超前和滞后相关及合成分析,提出从 10 月开始,台湾以东黑潮流量异常形成的暖平流作用会对冬季西北太平洋海区海洋-大气相互作用有贡献。

**关键词** 台湾以东黑潮流量,净热通量,500hPa 位势高度场,奇异值分解  
**中图分类号** P731

海洋经向热输送对全球能量平衡以及气候变化有重要作用,且主要集中在几支强而窄的西边界流中。黑潮是北太平洋的西边界流,它在太平洋的经向热输送中起着极其重要的作用。海洋对大气的影 响主要是通过海-气之间的热量交换实现的。在北太平洋中部热含量的改变中海洋平流的贡献是 30%,其中黑潮(西边界流)占这种平流贡献的 50% (Vivier *et al.* 1999)。台湾以东黑潮流量的低频变化直接影响黑潮流域的海-气热交换,从而影响天气和气候。黑潮附近 SST 已成我国气候统计预测中的重要指标,但是由台湾以东黑潮流量变异对气候异常影响的动力过程研究较少。赵永平等(1995, 1996)通过分析资料指出黑潮海域海洋异常加热对后期下游大气环流的影响是通过改变低纬度与高纬度大气之间温度差和位势高度来实现的,黑潮海域异常加热与大气环流相互作用在冬季是一个正反馈过程。Lu 等(1993)利用海-气耦合模式研究冬季黑潮大弯曲与大气环流相互作用的正反馈过程,李崇银等(1992)也对冬季黑潮增暖影响我国东部汛期降水这一问题进行了数值试验。

Wyrtki (1965)指出:“位于西北太平洋的

黑潮流域是太平洋海域内最大的海洋失热区,冬季是黑潮向大气释放热量最多的季节,也是黑潮海域海-气相互作用最强烈的时期。”刘衍韞等(2004)<sup>1)</sup>对北太平洋海面热通量的研究也证实了日本以南黑潮海区是太平洋海域内最大的海洋失热区。翁学传等在 1996 年指出黑潮经向热输送变化与其流量大小关系非常密切,黑潮断面热输送主要取决于两个因子:台湾以东黑潮流量和温度,对 PN 断面黑潮热输送变化贡献来说,来自低纬度海域的黑潮体积输送强弱占第一位,而水体温度的高低占第二位。既然台湾以东黑潮流量与经向热输送关系如此密切,而黑潮的经向热输送又在海气作用中占重要地位,那么台湾以东黑潮流量变异时,它与黑潮流经区域的海-气作用有无联系?冬季是海-气相互作用最强烈的时期,本文作者着重研究台湾以东黑潮流量的变异与其流经区域冬季海-气相互作用间的关系。

台湾以东黑潮是黑潮的源头,贾英来等(2004)利用长时间序列的石垣-基隆两个验潮站间的海平面高度差(18 年),结合风应力资料,计算了台湾以东黑潮流量,为本文的研究奠定基础。在本文中用 500hPa 位势高度场代表大气环

\* 国家自然科学基金重点项目,4033030 号。温娜,硕士, E-mail wenna2004@mail.ouc.edu.cn

1) 刘衍韞、刘秦玉、潘爱军, 2004. 太平洋海-气界面净热通量的季节、年际和年代际变化. 研究资料

收稿日期: 2005-04-12 收修改稿日期: 2006-01-09

流,净热通量表征海洋与大气之间的热交换。

### 1 数据与方法

本文中所有的 500hPa位势高度场资料取自 1958—1999年 NCAR/NCEP再分析月平均资料,水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。净热通量、SST、海面大气温度及海面风均来自 1945—1993年 COADS月平均资料,水平分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。台湾以东黑潮流量是根据台湾以东石垣-基隆两个验潮站 1980—1997年逐日验潮站资料和相应的公式计算得到(贾英来等, 2004)。

本文中所研究的台湾以东黑潮流量与西北太平洋海洋-大气相互作用的关系主要是年际变化问题,因此所有变量都是扣除季节变化的异常值。为了去除 ENSO 信号对它的影响,作者又对每一个异常场都与 Nino3 指数做线性回归,用此方法滤除每个异常场中的 ENSO 影响信息。针对扣除 ENSO 信号的异常场,再应用合成分析、奇异值分解法和相关分析方法寻找台湾以东黑潮流量变异与冬季西北太平洋海-气相互作用之间的关系。为了使空间格点数能与时间序列的长度相匹配,在进行奇异值分解时,北半球 ( $0^{\circ}-360^{\circ}E, 0^{\circ}-90^{\circ}N$ ) 500hPa位势高度场采用相距 5 个经纬度取一个资料;西北太平洋 ( $120.5^{\circ}-180.5^{\circ}E, 10.5^{\circ}-45.5^{\circ}N$ )海面热通量资料相距 2 个经纬度取一个资料。本文中所说的某年冬季是这年 12月至第 2年的 2月。

### 2 冬季台湾以东黑潮流量异常对应的大气环流及海-气热通量异常

根据台湾以东黑潮流量的年际变化,可以将 13年的冬季台湾以东黑潮流量异常标准化(图 1),并将其进行分类,将距平大于和等于 0.5 的年份(1980, 1985, 1987, 1988)定义为台湾以东黑潮流量强的年份,小于和等于 -0.5 的年份(1981,

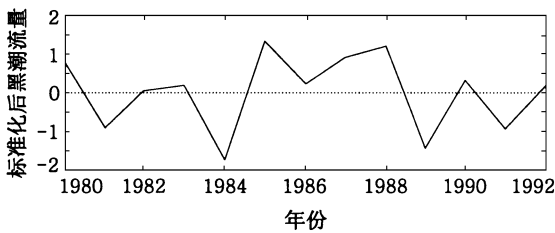


图 1 冬季台湾以东黑潮流量的标准化距平(1980—1992年)  
Fig 1 The standard deviation of Kuroshio flux between 1980 and 1992

1984, 1989, 1991)定义为流量弱的年份。将四个强流量年份的北半球 500hPa位势高度场进行合成,之后与由四个弱流量年份合成后的位势高度场相减,得到与台湾以东黑潮流量增强所对应的大气环流异常场(图 2b)。同样的方法也可以得到与冬季台湾以东黑潮流量增强对应的净热通量异常场(图 3b)。

三槽三脊是冬季北半球 500hPa环流的基本特点,且在气候平均意义下,冬季东亚大槽由鄂霍茨克海向较低纬度的东海倾斜(图 2a)。当冬季台湾以东黑潮流量强时,北半球 500hPa位势高度场的变异主要体现在东亚大槽和北太平洋出现低压异常,其槽前的低压异常通过 90% 的显著性检验;而欧亚大陆、北美大陆和北大西洋高压异常也通过 90% 的显著性检验(图 2b),这表明冬季台湾以东黑潮流量强对应的北半球大气经向环流加强。西北太平洋冬季海洋处于失热状态(图 3a),冬季西北太平洋净热通量在强台湾以东黑潮流量年与弱流量年存在显著性差异,台湾以东  $130^{\circ}E$  以西海域明显通过 90% 的显著性检验(图 3b)。与台湾以东黑潮流量增强相对应,在西北太平洋——黑潮流经区及日本南部黑潮延伸体区海洋异常失热,特别在台湾以东海域和中国海异常失热显著。

由此,作者初步发现了台湾以东黑潮流量变异时,西北太平洋净热通量与大气环流可能出现的异常。为了进一步证实西北太平洋净热通量与北半球大气环流异常场的对应关系,作者采用奇异值(SVD)分解方法寻求这两个场耦合的主模态。

### 3 北太平洋净热通量场与北半球 500hPa 位势高度场 SVD 分析

用冬季(1958—1993年)西北太平洋净热通量场(负值代表向大气失热,正值代表向大气吸热)与同期北半球 500hPa位势高度场作 SVD 分解。其一、二、三模态所占的权重分别为 70.4%、12.2%、7.2%,第一模态所占权重较大。

从图 4a可以看出冬季北半球 500hPa位势高度场 SVD1模态的空间分布特点:在亚欧大陆、北美至北大西洋上中纬度带状区域的位势高度异常与北太平洋上空位势高度异常相反。即日本岛至阿留申低压区域出现低压加强时,相应亚欧大陆高压脊及北美高压脊加强,北太平洋副热带高压区出现高压异常;反之亦然。图 4a中反映的

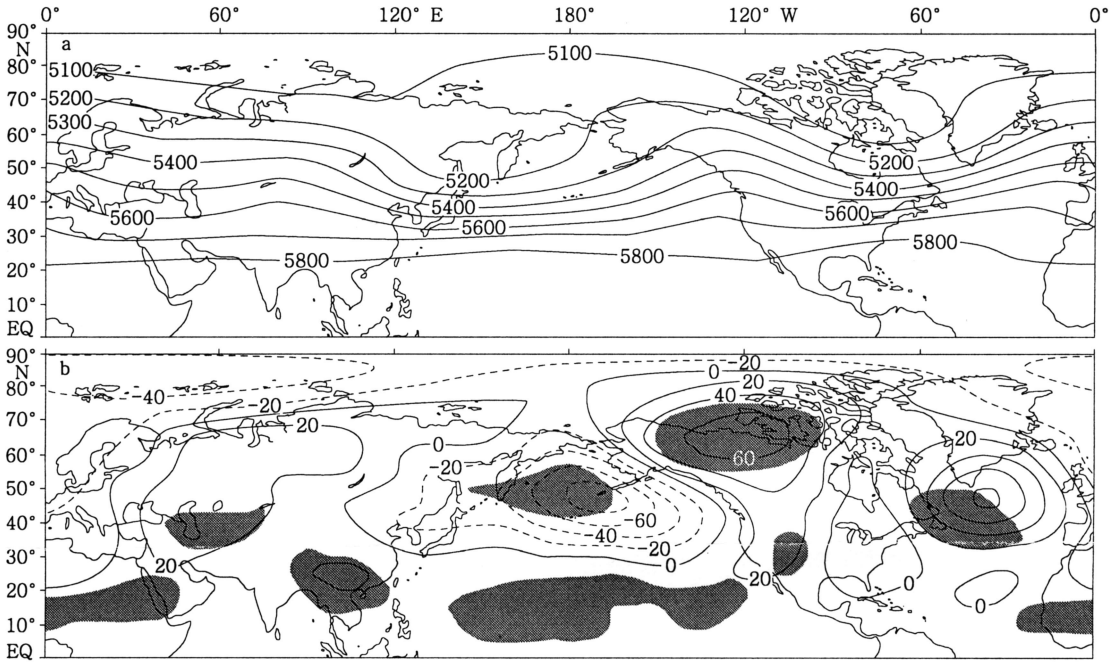


图 2 a) 1980—1992年平均冬季北半球 500hPa位势高度场; b) 台湾以东黑潮流量强与弱对应的冬季北半球 500hPa位势高度场的差异。阴影表示过 90% 的显著性检验

Fig 2 a) The average winter 500hPa geopotential height in north hemisphere during 1980—1992 b) The difference in winter 500hPa geopotential height anomaly in north hemisphere between strong and weak Kuroshio years. The shaded area is in the significance level of 90%

500hPa位势高度异常场第一模态的空间分布与台湾以东黑潮流量增强所对应的大气环流异常场(图 2b)基本类似;与 500hPa位势高度异常场第一模态所对应的西北太平洋净热通量异常场 SVD 第一模空间分布如图 4b,西北太平洋大部分海域具有同时对大气失热或同时被加热的特点,其异常中心位于黑潮流经海域及其临近海域。西北太平洋净热通量异常场第一模态的空间分布(图 4b)与台湾以东黑潮流量增强所对应的净热通量异常场(图 3b)的空间分布也类似。图 4c 是这两个异常场的第一模态各自对应的时间系数,两个时间系数的同期相关达 0.84。两个时间系数在 1980 年以后与台湾以东黑潮流量异常标准化时间序列的关系也非常密切。在台湾以东黑潮流量大的 1980 和 1985 年, SVD 第一模态的两个时间系数为正;在流量小的 1981、1984、1989、1991 年, SVD 第一模态的两个时间系数为负。这说明西北太平洋净热通量与北半球大气环流的耦合作用的主要部分与台湾以东黑潮流量变化有一定的对应关系。台湾以东黑潮流量

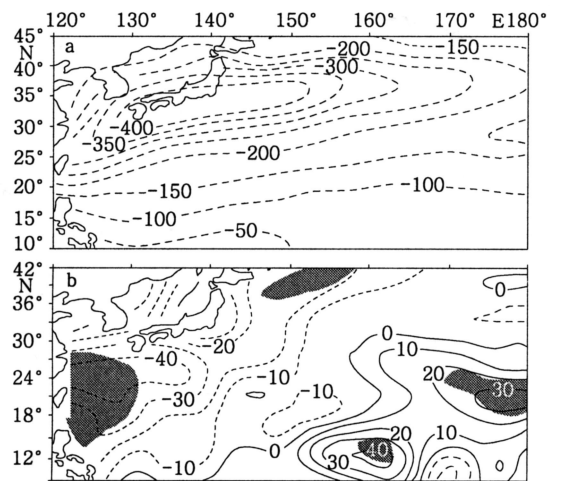


图 3 a) 1980—1992年平均冬季西北太平洋净热通量场; b) 冬季台湾以东黑潮流量强与弱对应的冬季西北太平洋净热通量场的差异。阴影表示过 90% 的显著性检验; 实线表示海洋失热,虚线表示海洋吸热

Fig 3 a) The average winter net heat flux in Northwest Pacific during 1980—1992 b) The difference in winter net heat flux anomaly in Northwest Pacific between strong and weak Kuroshio years. The shaded area is in the significance level of 90%; solid line indicating ocean releasing heat to atmosphere, and dashed line for ocean receiving heat from

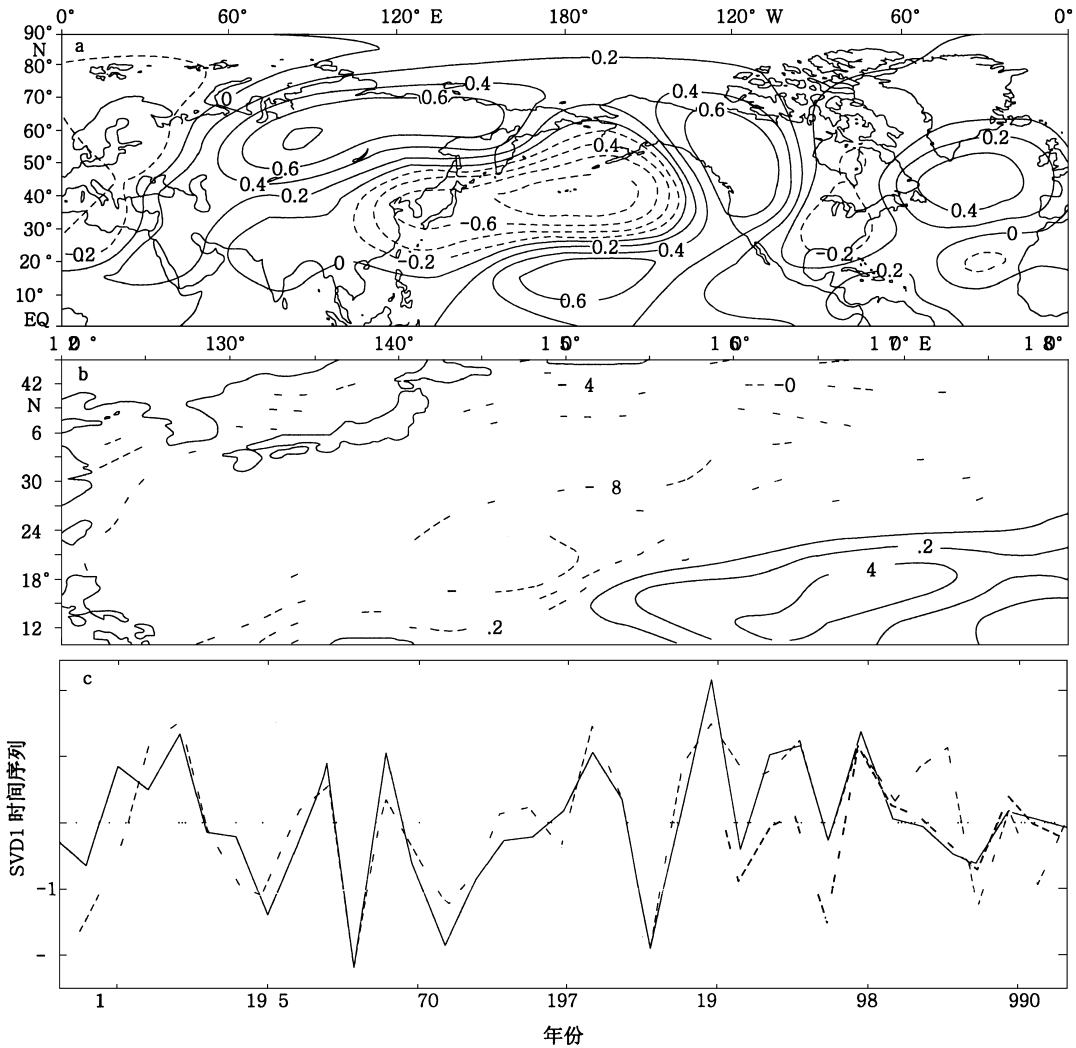


图 4 SVD 第一模态的空间分布: (a) 冬季北半球 500hPa 位势高度场异常场, (b) 西北太平洋净热通量异常场和 (c) 所对应的的时间序列 (与冬季北半球 500hPa 位势高度场异常对应的是实线, 与冬季西北太平洋净热通量异常对应的是虚线, 与台湾以东冬季平均黑潮流量异常对应的是粗虚线)

Fig 4 The pattern of the first SVD mode for (a) the winter 500hPa geopotential height in North hemisphere, (b) the winter net heat flux in Northwest Pacific; (c) the principle component time series (solid line for 500hPa geopotential height, the dashed line for net heat flux, and the bold dashed line for Kuroshio anomaly in winter)

增强时, 大气出现强的经向环流 (亚欧大陆高压脊、东亚大槽、北美高压脊都加强), 西北太平洋, 特别是黑潮流经区域的海面向大气异常失热; 反之亦然。

#### 4 台湾以东黑潮流量正异常对应的冬季西北太平洋海洋-大气相互作用

图 5a-d 依次为台湾以东黑潮流量大的四年 (1980、1985、1987、1988) 冬季 500hPa 位势高度异常场合成与净热通量场合成、海面净热通量异常场合成与海面风异常场合成、海面净热通量

异常场合成与海面气温异常场及 SST 异常场的合成。

由图 5a 更清楚地看出: 与台湾以东黑潮流量增强相对应的冬季西北太平洋向大气异常放热时, 有利于其下游阿留申低压加强。这与 Liu 等 (2004) 用 FOAM 耦合模式所得到的结果 [在 (143°-180°E, 30°-50°N) 区域异常失热时, 500hPa 位势高度场出现异常热低压] 相类似。由图 5b 和图 5c 可以看出, 海面风异常、海面大气温度异常与黑潮海域的净热通量异常区有较好的

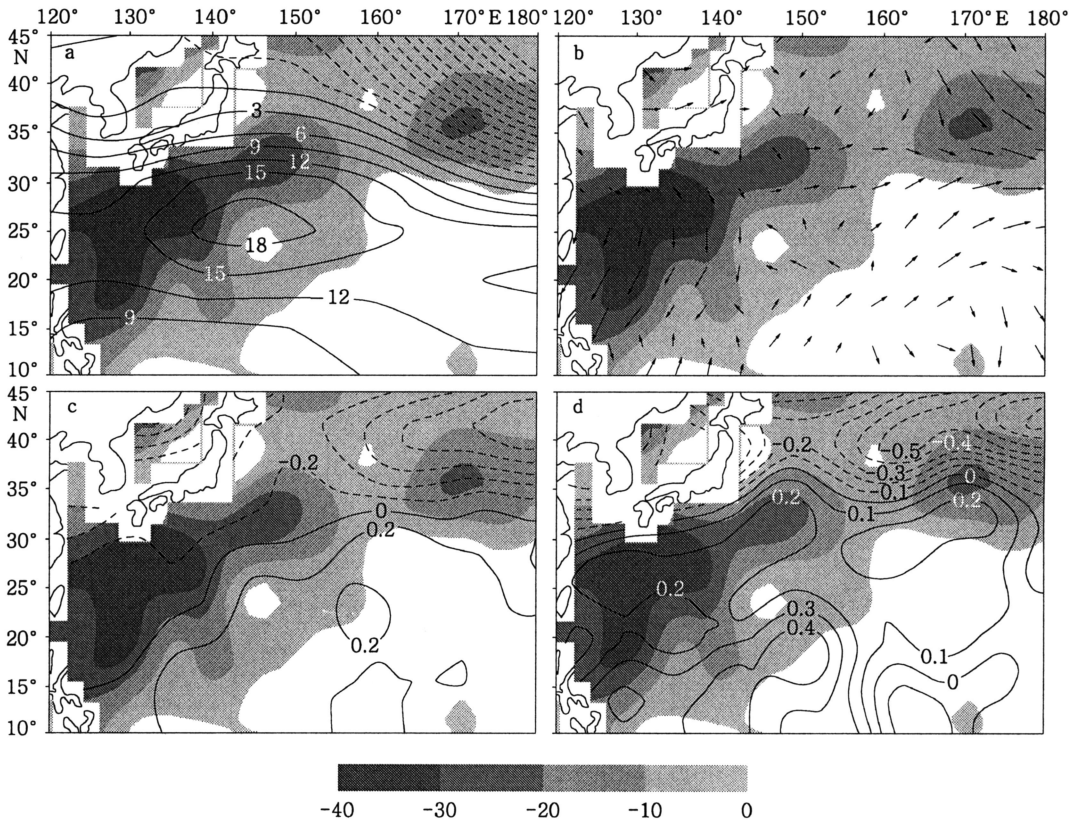


图 5 1980、1985、1987、1988 年冬季净热通量异常场合成 (阴影仅代表小于 0 的值), 分别与 a) 冬季 500hPa 位势高度场合成 (用等值线表示); b) 冬季海面风异常场合成 (用箭头表示); c) 海面大气温度异常场合成 (用等值线表示); d) 及冬季 SST 异常场的合成 (用等值线表示)

Fig. 5 The composite map of the winter net heat flux for years 1980, 1985, 1987 and 1988 (shaded showing the value below zero) with that of a) the winter 500hPa geopotential height anomaly (in contours); b) the winter sea surface wind anomaly (vector); c) the winter surface atmospheric temperature (in contours); d) the winter SST anomaly (in contours)

对应关系: 强失热区西北风加强, 气温降低的幅度要比 SST 降低的幅度大。北风异常时, 干、冷空气南下降低了空气温度, 低气温异常有利于黑潮流经海域的净热通量增大 (负异常); 而海面气温异常与净热通量异常区是一致的 (图 5c), 它的降低加强了潜热和感热释放, 从而也降低了 SST。但 SST 的负异常区却在 30°N 以北的海域 (图 5d), 而 30°N 以南台湾以东的海域 SST 几乎是正常。SST 的变异主要由净热通量、海洋平流的热输送、垂直对流热输送和混合层底的卷夹这几个主要物理过程决定。在 30°N 以南台湾以东的海域影响 SST 减小的主要因素是海面失热和混合层底的卷夹, 而该海域的水平平流作用是暖平流, 抵消了海域的失热作用, 维持了冬季的 SST 不变或正异常。

合成的结果再次证实了赵永平 (1995) 提出的正反馈过程: 台湾以东、日本以南的西北太平

洋失热增大会导致大气经向环流加强, 东亚大槽加深使西风加强, 从而带来冷而干的空气, 进一步加强了西北太平洋的失热。但是该正反馈过程不可能继续下去, 因为海洋失热增加后 SST 会下降, 无法维持海洋持续大量失热。为什么从以上分析中还能发现海洋会持续失热呢? 这是因为这些异常年黑潮的暖平流作用较大, 可以弥补海洋失热对 SST 的影响。这样才能满足该海区的热量收支平衡, 保持了这些年 30°N 以南、台湾以东 SST 不变或正异常。在黑潮流经的海域, 这种暖平流作用会导致一个暖舌 (Xie 2002)。为了进一步证实这一新观点, 下面通过超前、滞后的相关分析进行讨论。

### 5 秋季台湾以东黑潮热输送对西北太平洋冬季海-气相互作用的影响

将 1980~1992 年黑潮月平均流量与冬季西

北太平洋净热通量 SVD 第一模态的时间序列以及 500hPa位势高度场 SVD 第一模态的时间序列做相关分析,其结果如图 6所示。台湾以东黑潮流量超前两个月时关系最密切,分别为 0.60和 0.74 过 0.05的显著性检验。这意味着从 10月份开始的台湾以东黑潮流量异常,将对冬季西北太平洋海-气相互作用产生较重要的影响。

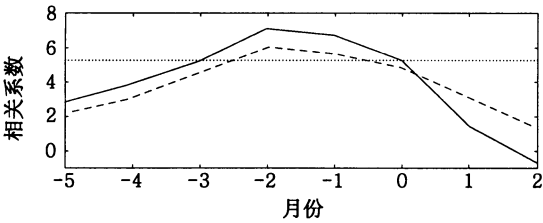


图 6 台湾以东平均黑潮流量与冬季 500hPa位势高度场及净热通量场 SVD1对应时间序列的超前和滞后相关。横轴表示平均黑潮流量(连续 3个月平均)超前或滞后于 SVD1模态对应时间序列的月份,正值代表滞后,负值代表超前。实线是黑潮流量与 500hPa位势高度场 SVD1对应时间序列的相关,虚线是黑潮流量与净热通量场 SVD1对应时间序列的相关,直线是 95%的显著检验线

Fig. 6 The lead or lag correlation map between Kuroshio transport and the principle component (PC) in time series of the first SVD mode between 500hPa geopotential height (solid line) and net heat flux (dashed line). The x-coordinate represents the SST the number of lead or lag months than PC (positive value means lag, negative one means lead). The straight line shows the significance level of 95

黑潮是北太平洋的西边界流,它的一个重要作用就是源源不断地把低纬度的热量输送到中高纬度,其流量异常直接决定了它向中高纬输送的热量异常(翁学传等,1996)。而黑潮流量与冬季西北太平洋的海-气相互间的显著相关,说明存在可能由于黑潮流量异常所输送的热量异常补偿了冬季西北太平洋强烈海-气相互作用时海洋向大气放热所损耗的能量。而秋季的黑潮流量与冬季西北太平洋的海-气相互作用对应关系最好,这与作者所选的黑潮流量位置有关;台湾以东是黑潮流经区域的源头,这个位置黑潮流量的大小直接决定了其下游海域热输送大小;按黑潮主流流速平均为 0.5m/s计算,2个月内黑潮平流输送可以将台湾以东异常热信号输送达 2500km

之远。也就是说,在两个月的时间尺度上,它可以将 10月份台湾以东黑潮流量异常引起的暖平流异常信号带到日本南部黑潮延伸体区,从而秋季的黑潮流量异常热输送维持了冬季西北太平洋强烈的海-气相互作用的发展。所以,超前冬季 2个月的平均台湾以东黑潮流量与冬季净热通量 SVD 第一模态的时间序列以及 500hPa位势高度场 SVD 第一模态的时间序列间有如此密切关系,可以从上述物理过程上也能得到很好的解释和验证。

### 6 结论与讨论

通过对两个样本显著性检验分析,发现了冬季台湾以东黑潮流量与北半球大气环流及西北太平洋净热通量之间的对应关系:在台湾以东黑潮流量增强年,北太平洋(北纬 20°N 以北) 500hPa位势高度负异常,西北太平洋海区异常失热。通过对冬季北半球 500hPa位势高度场与同期西北太平洋净热通量 SVD分析,进一步证实了冬天西北太平洋海-气相互作用时,热通量场与 500hPa位势高度场间的对应分布形势:整个西北太平洋向大气异常失热,对应着北太平洋的低压异常及内蒙古、北美高压异常,而且西北太平洋强的海-气相互作用年基本上与台湾以东大黑潮流量年相重合。通过台湾以东黑潮流量与奇异值分解所得的主分量超前和滞后相关分析,揭示当台湾以东黑潮流量超前于冬季两个月时,它与冬季西北太平洋的海-气相互作用间的关系最好。基于以上分析,作者推断台湾以东黑潮热输送在冬季西北太平洋海-气相互作用中扮演着一个重要的角色:秋末台湾以东黑潮暖平流作用维持了冬季西北太平洋海-气相互作用正反馈过程的进行。

致谢 在成文过程中,本文作者与中国海洋大学林霄沛博士进行过多次讨论,黄菲、胡瑞金、贾英来老师给予热情的指导,研究生刘伟给予帮助,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

李崇银,龙振夏,1992 冬季黑潮增暖对我国东部汛期降水影响的数值模拟研究:气候变化若干问题研究.李崇银主编.北京:科学出版社,145-156  
赵永平,Ma Bean G A,1995.黑潮海域海洋异常加热与北半球大气环流的相互作用.海洋与湖沼,26(4):

383—388

赵永平, McBean G A, 1996 黑潮海域海洋异常加热对后期北半球大气环流影响的分析. 海洋与湖沼, 27(3): 246—250

翁学传, 张启龙, 杨玉玲等, 1996 东海黑潮热输送及黄淮平原区汛期降水的关系. 海洋与湖沼, 27(3): 237—245

贾英来, 刘秦玉, 刘伟等, 2004 台湾以东黑潮流量的年际变化特征. 海洋与湖沼, 35(6): 507—512

Vivier F, Kelly K A, Thompson L, 1999 The contributions of wind forcing waves and surface heating to sea surface height observations in the Pacific Ocean. J Geophys Res 104: 20767—20788

Liu Q inyu, Xu Q ichun, Wang Zhilian *et al.*, 1993. The meander of kuroshio and oscillation in a coupled ocean-atmosphere model. Acta meteorologica Sinica 7(3): 338—346

Liu Z Wu L, 2004 Atmospheric response to North Pacific SST: The role of ocean-atmosphere coupling. Journal of Climate, 17(9): 1859—1882

Wyrki K, 1965. The average annual heat balance of the North Pacific Ocean and its relation to ocean circulation. J Geophys Res 70(18): 4547—4559

Xie S-P, Hafner J Tanimoto Y *et al.*, 2002 A thymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas. Geophys Res Lett 29(24): 2228

## WINTER OCEAN-ATMOSPHERE INTERACTION IN THE NORTHWEST PACIFIC

WEN Na LU Q in-Yu

(Physical Oceanography Laboratory & Ocean-Atmosphere Interaction  
Ocean University of China, Qingdao, 266003)

**Abstract** Using the NCAR/NCEP reanalysis (1958—1999), COADS monthly data(1945—1993) and Kuroshio transport observation from various sources covering 1980—1997, we studied mainly the relationship between Kuroshio transport and ocean-atmosphere interaction in the area northeast of Taiwan in Northwest Pacific (NWP) during winter. First we employed composite analysis to understand simple corresponding relationship between Z500 geopotential height difference in north hemisphere and net heat flux difference in NWP from large Kuroshio transport years to small Kuroshio transport years. When larger Kuroshio transport is very different from smaller Kuroshio transport in the period, the net heat in the NWP would be released to the atmosphere, resulting in the occurrence of large low-pressure anomaly in the areas from southeastern Japan to Aleutian. With singular value decomposition (SVD) analysis, we further confirmed that in winter the air-sea interaction in NWP releases net heat to the atmosphere, which corresponds to the low-pressure anomaly in NWP and high-pressure anomalies in Nei Mongol (Inner Mongolia) and in North America. In addition, the year of strong air-sea interaction in NWP largely corresponds to the year of large Kuroshio transport. Having related the Kuroshio flux to the first principle component obtained with SVD using lead or lag correlation, we discovered that when Kuroshio transport lead by two months, it could best match the air-sea interaction in NWP in winter. In conclusion, we believe that the Kuroshio plays an important role in winter air-sea interaction in NWP for transporting heat. In other words, the warm advection of the Kuroshio in late fall sustains the winter air-sea interaction in NWP.

**Key words** Kuroshio transport, Net heat flux, 500hPa geopotential height, Singular value decomposition