

# 春季赤道外北太平洋上层流场异常的统计动力诊断

路凯程<sup>1,3</sup>, 卢 姁<sup>2,3</sup>, 张 铭<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军39506部队82分队, 北京100076; 2. 中国人民解放军61741部队, 北京100081;  
3. 中国人民解放军理工大学气象学院大气环流与短期气候预测实验室, 江苏南京211101)

**摘 要:**采用复EOF分析方法,对春季赤道外的北太平洋海域的上层流场异常做了统计动力诊断,得到以下主要结论:赤道外北太平洋海域上层流场的明显异常主要发生在日本本州岛以东、以南范围不大的关键区内;异常的第一、二模态分别表现为东东北至西西南走向的涡旋偶和涡旋列。该两模态时间系数的辐角均分别有两个状态,相应的偏差流场则分别与其空间场相同或相反;其模的大小决定了其偏差流场偏离以上两个状态的程度;该两模态的时间系数均有非常明显的20年左右的年代际变化。该两模态均反映了黑潮延伸体以南回流漩涡的异常;其性质是海洋Rossby波的异常。

**关键词:**复EOF分析,流场异常,北太平洋,回流漩涡

**中图分类号:**P731 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2010)06-0057-08

## 1 引言

太平洋是全球最大的大洋,其海洋状态的异常对全球气候有重要影响<sup>[1-2]</sup>。前人研究表明,中高纬度北太平洋海区(160°E~160°W, 35°~50°N)和中低纬度太平洋(180°~160°W, 5°~25°N)都是海温变化明显的区域<sup>[3]</sup>。从整体上看,太平洋海温异常有两个强信号中心,一个在40°N附近的中西太平洋,另一个在赤道太平洋<sup>[3]</sup>。这表明,除应重视热带太平洋海洋状态的异常外,也必须重视中高纬度北太平洋海区海洋状态的异常。

北半球海洋环流普遍存在一个特征:在风驱动的西边界流的南侧存在一个反气旋回流漩涡(Recirculation Gyre),许多关于黑潮延伸体和墨西哥暖流的观测研究都证实了在这两个系统南部的反气旋回流漩涡的存在<sup>[4-7]</sup>。值得关注的是,该回流漩涡增强了向东的热量传送和西边界流的热量传送<sup>[8]</sup>;且研究者认为,回流漩涡的变异在解释低频中尺度海洋变化上起到了关键作用<sup>[9-15]</sup>。

我们曾计算过赤道外北太平洋海洋上层从1950~2001年共52年春季(4月)的平均流场(图略)<sup>[16]</sup>。计算结果表明,在北太平洋西海岸,有一明显洋流由南向北,从日本以东进入大洋,其即为黑潮及其延伸体的多年平均。在平均黑潮进入大洋之前,在日本本州东海岸平均黑潮延伸体的蛇曲(meander)以南,即在34°N, 143°E附近,则存在有反气旋曲率,这反映了该反气旋回流漩涡的多年平均。然而,该平均状态要较日常环流弱,这说明该回流漩涡日常位置和强度的离散程度均较大。

目前对北太平洋流场的气候平均状态以及日常观测的研究工作均不少<sup>[17-19]</sup>,但对年代际时段中流场异常的研究却并不多。春季处于大气环流由冬季型转为夏季型的转换季节,其气候异常也没有冬季和夏季那样稳定,并在跨季度短期气候预测中还存在春季预报障碍问题<sup>[20]</sup>,这样就更有必要对春季流场的异常多加关注。为此本文利用52年的Carton海洋资料,利用复EOF分析方法,着重

收稿日期:2010-02-02

基金项目:国家“973”项目北太平洋副热带环流变异对大气强迫的反馈作用(2007CB411805)

作者简介:路凯程(1985-),女,硕士,主要从事海洋气象方面的研究。E-mail:kittyly329@163.com

对春季北太平洋上层流场异常进行统计动力诊断。在海气相互作用中,上层流场异常是海气耦合的直接环节,该流场的异常是由风场异常直接造成的;所以分析研究北太平洋上层流场异常的结构以及其年际、年代际变化,则不仅对研究北太平洋海气相互作用有指导意义,而且对气候预测也有应用价值。

## 2 资料和诊断方法

本文所用的资料为 Carton 流场资料,该资料提供了海洋上层从 1950~2001 年共 52 年在深度 112.5 m、97.5 m、82.5 m、67.5 m、52.5 m、37.5 m、22.5 m、7.5 m 上的各月平均流场,其为高斯网格,网格距约为  $1^\circ$ 。本文的统计动力诊断范围则取赤道外的北太平洋,即取  $19.5^\circ \sim 50.8^\circ \text{N}$ ,  $120^\circ \sim 180^\circ \text{E} \sim 80^\circ \text{W}$  (见图 1)。所用的统计动力诊断方法为复 EOF 分析,其原理可参见文献[2]、[21],这里不再赘述。具体操作步骤是:将 4 月份作为春季代表;首先将各年 4 月份在上述 8 个深度上的月平均流场分别求其 52 年的平均值,其次将各年 4 月的平均流场减去该平均值,则可得各年 4 月这 8 层上的偏差流场;最后将这 8 层上的偏差流场作为一个整体进行复 EOF 分析。此时的空间场和时间系数场都是复数;空间场的模表示各模态偏差流场的流速大小,辐角则表示流向,而时间系数则表示 1950~2001 年这 52 年中流速、流向随时间的变化。由于将各层上的偏差流场当作一个整体来做复 EOF 分析,故各层有相同的时间系数。复 EOF 分析的结果表明,第一、二模态的方差贡献分别

为 8.17% 和 5.69%。

## 3 诊断结果分析

### 3.1 第一模态

在北太平洋上层,从诊断得到的第一模态空间场的分布可知:在上述 8 层上,明显的偏差流场均仅出现在日本本州岛以东以南海域,并表现为涡旋偶的形式;其范围仅占北太平洋很少部分,在该海域外则偏差流场均很小。该涡旋偶轴心呈东北至西西南走向,偏东的涡旋呈反气旋式旋转,其位置与 Qiu<sup>[10]</sup>等观测到的反气旋回流漩涡的位置大体重合,偏西的则呈气旋式旋转。在上述 8 层上该模态的流场异常结构十分类似,这表明海洋上层的流动呈现正压性。图 1 给出了 22.5 m 处的空间场(其余各层的图略)。该图上在日本本州岛以东海域出现的反气旋涡旋是复 EOF 分析的结果,反映了该处的流场异常;而日常在该处也可分析出反气旋的回流漩涡,但那是观测场;这两者不可混淆。

图 2 a、b 分别给出了第一模态偏差流场时间系数的模和辐角的余弦,从图 2 b 可见,其辐角的余弦值分别明显集中于  $\pm 1$  附近,这表明辐角值的分布有两个状态,即其位于  $0^\circ$  和  $180^\circ$  附近,并可称为态 A、B。前者因其余弦值约为 +1,表明其偏差流场的分布形势与该模态的空间场基本相同,而后者约为 -1,其分布形势则相反;从图 2 a 可见,各年时间系数的模值大小有明显差别,按该图上模大小的 52 年平均值 135.9 为界,也可将模值划分为两个态:大于等于该值的强模态 S 和小于该

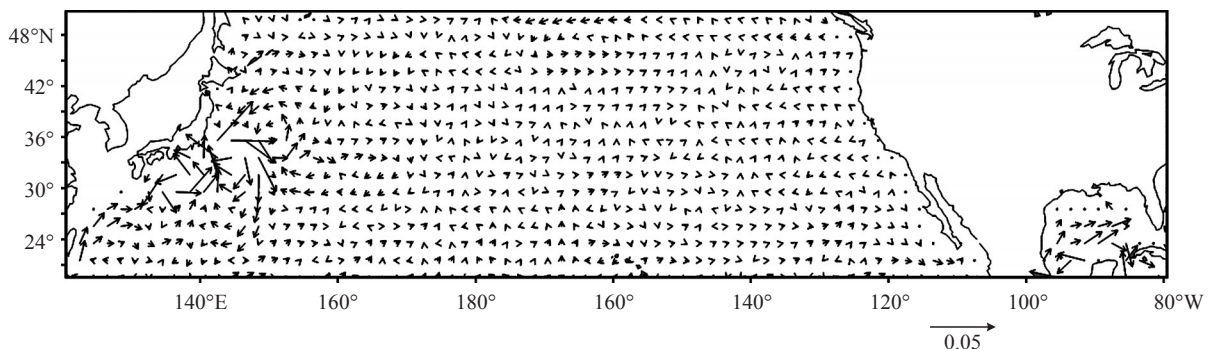


图 1 第一模态 22.5 m 处的空间场向量(单位:m/s)

值的弱模态W;而各年模的数值(大小)则决定了其偏差流场偏离以上两个状态的程度,模的数值越大则这种偏离就越大,也即异常越大。根据第一模态时间系数模和辐角的分类,可有以下4种配置组合:AS、BS、AW、BW,即相似强模、相反强模、相似弱模、相反弱模,这里相似与相反均对第一模态空间场而言。在此AS和BS是两个强异常的态,对于AS则上述涡旋偶很强,而对BS则涡旋偶的流动方向发生反转且强度也大。

由于这里将偏差流场 $u, v$ 作为一个整体来进行复EOF分析,故可计算第一模态偏差流场的散度和相应的垂直运动(设7.5 m处的垂直运动近似为0)<sup>[20]</sup>。计算结果表明,对于该涡旋偶中的反气旋涡,在其位置上对应着辐散和上升运动,且除7.5 m处的其他各层上,散度和垂直运动分布均大体一致(图略)<sup>[16]</sup>。这样对于AS异常态,则反气旋

涡处有较强涌升异常,反之对于BS异常态,则该处有较强下沉异常。而对于其西西南方的气旋涡,则有辐合和下沉。众所周知,上升运动将造成海温下降,而下沉运动则造成海温升高;故对AS异常态,因其与空间场的分布一致,则在涡旋偶中反气旋涡处有偏低的海温异常,而气旋涡处则有偏高的海温异常;而对BS异常态,因其与空间场的分布相反,则海温异常与上相反。注意,这种海温异常是因垂直运动引起的绝热海温异常,也可称之为海温动力异常;这和由辐射加热引起的非绝热海温异常不同,后者可称为海温热力异常,其主要由辐射和水气相变引起。因这里讨论的是上层流场的情况,显然该涡旋偶的产生与风应力异常和边界强迫有关。

由第一模态时间系数模和辐角的演变可见(见图2 a、b),其具有年际变化和年代际变化。为揭

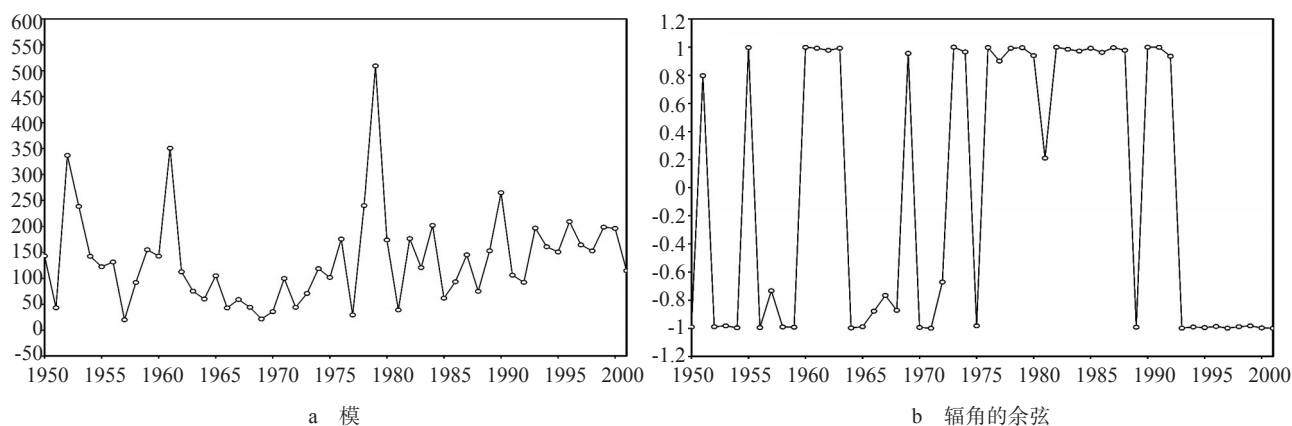


图2 第一模态时间系数的模和辐角的余弦

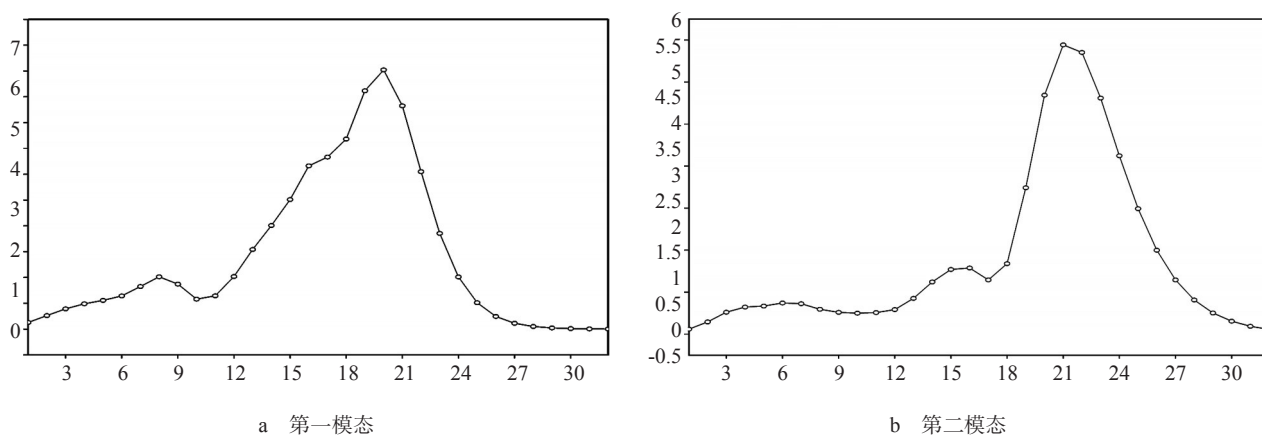


图3 时间系数序列的小波全谱

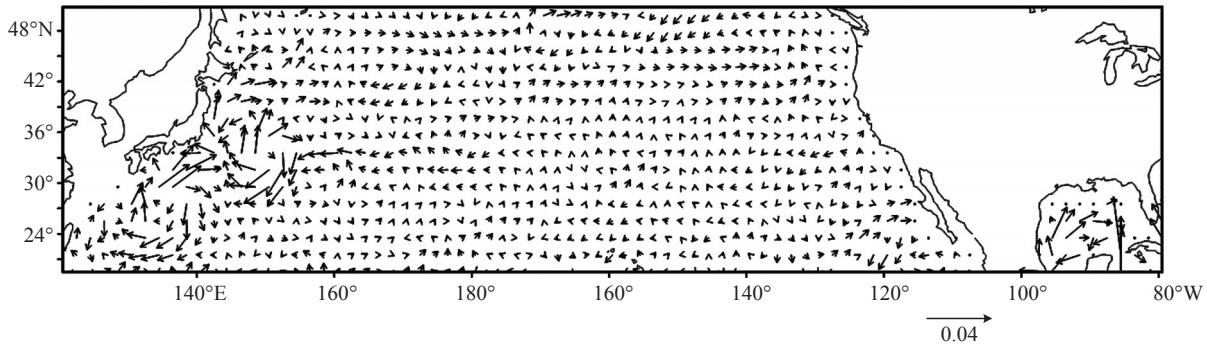


图4 22.5m处第二模态的空间场(向量单位:m/s)

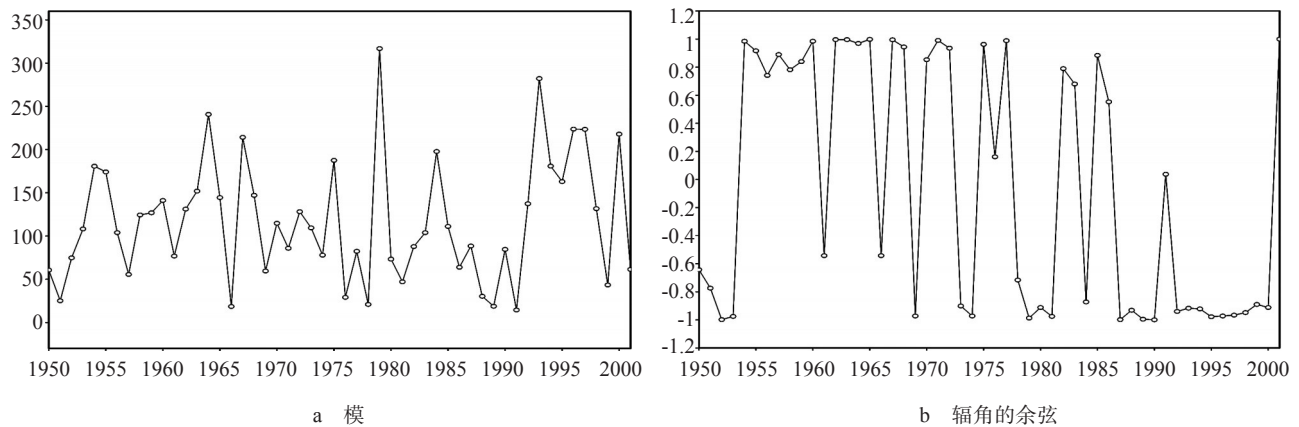


图5 第二模态时间系数的模和辐角的余弦

示时间系数(其为复数)的变化规律,将各年时间系数的模乘以其辐角的余弦后构成一新的实数时间序列。因余弦值有近于 $\pm 1$ 的两个状态,故该新时间序列可综合反映模和辐角的时间演变。将该新时间序列标准化,即将各年的值减去该序列的最小值再除以该序列的极差(最大值与最小值之差),然后对标准化后的该序列作了小波分析。图3a给出了此时第一模态的小波全谱。由图可见,其20年左右的年代际变化十分明显。

### 3.2 第二模态

从诊断得到的第二模态空间场的分布可知,在上述8层上,明显的偏差流场其出现位置与第一模态大体相同,也仅出现在日本本州岛的以东以南海域,但表现形式不同;其空间场表现为涡旋列的形式,即表现为两个紧邻的反气旋涡,两者的轴心仍呈东东北至西西南走向;在上述8层上,该涡旋列的分布结构也基本相同,即流动具有正压性(见图4)。

图5a、b分别给出了第二模态偏差流场时间系数的模和辐角的余弦值,从图5b可见,其辐角的余弦值也明显集中于 $\pm 1$ 附近,这表明辐角值也有两个状态,也可称之为态A、B。前者其偏差流场的分布形势大体与其空间场相同,而后者则相反。由该图还可见,第二模态在以上两个状态的离散度较第一模态略大。从图5a则可见,类似于第一模态,各年时间系数模值的大小也有明显差别。按该图上模大小的52年平均值116.8为界,也可将模值划分为两个态:强模态S和弱模态W;也能得到以下4种配置组合:AS、BS、AW、BW。同样在此AS和BS是两个强异常的态,对于AS则上述涡旋列很强,此时在日本本州岛的以东、以南海域,在这两个反气旋处,上层流场有反气旋性涡度,且有辐散和上升流,故会有负的海温动力异常;而对态BS,则因此时偏差流的方向与态AS相反且强度也大,此时一切情形发生反转。

由第二模态偏差流场时间系数模和辐角的时



间系数可见(见图5),其模和辐角也具有年际和年代际变化。我们采用与第一模态同样的处理方法,对处理后的标准化的时间序列进行小波分析;发现其20年左右的年代际变化也十分明显(见图3b)。

综上,第一、二模态20年左右的年代际变化均十分明显,因该年代际变化与北太平洋年代际涛动(PDO)的周期相近,故其可能与该涛动有关<sup>[22]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 模态与回流漩涡异常

注意到第一、二模态中偏东北的反气旋涡两者的位置大体重合,均位于日本本州岛的东部海域即黑潮延伸体以南,即基本位于反气旋回流漩涡处。当两者位相相同,且均处于AS态或BS态时,则有该两模态强模的同位相叠加,当均处态AS时,则会加强该回流漩涡,并增大该处的涌升,且使该海域次表层海温出现明显负异常(因次表层的海温异常是动力性的)。反之,则一切相反,海温出现明显正异常。表1给出了52年来这

两个模态的类型。表1中以“※”号标注出了第一、二模态为同位相强模态的年份;两者均为AS态的只有1960年一年,而均为BS态的则有1993年、1994年、1995年、1996年、1997年、1998年、2000年共7年。Qiu等<sup>[23]</sup>观测到回流漩涡的变异发生在1993年,2000年,2001年和2004年(4年,前者);而在1996年至2001年(7年,后者),黑潮延伸体的路径也有明显改变。本文在前者年份,第一模态均为BS态,无一例外;第二模态则除2001年为AW态外,其余各年也均为BS态(未计2004年,参见表1)。本文在后者年份,第一模态也均为BS态,并无例外;第二模态则6年处于B态(其中5年为BS态),仅2001年为AW态。以上情况表明本文的诊断结果与他们的观测事实相一致。由于后者年份均出现在上世纪90年代以后;看来这不是偶然的,其可能与90年代后的全球明显增暖有关。

本文得到的EOF第一、二模态偏东北反气旋涡的位置均大体位于回流漩涡处,且由以上讨论可知,其反映了回流漩涡的异常;然第一模态的方差贡献要较第二模态偏大明显,故第一模态可

表1 52年来模态一与模态二的类型

年份	模态一	模态二	年份	模态一	模态二	年份	模态一	模态二
1950	BS	BW	1968	BW	AS	1986	AW	AW
1951	AW	BW	1969	AW	BW	1987	AS	BW
1952	BS	BW	1970	BW	AW	1988	AW	BW
1953	BS	BW	1971	BW	AW	1989	BS	BW
1954	BS	AS	1972	BW	AS	1990	AS	BW
1955	AW	AS	1973	AW	BW	1991	AW	AW
1956	BW	AW	1974	AW	BW	1992	AW	BS
1957	BW	AW	1975	BW	AS	1993※	BS	BS
1958	BW	AS	1976	AS	AW	1994※	BS	BS
1959	BS	AS	1977	AW	AW	1995※	BS	BS
1960※	AS	AS	1978	AS	BW	1996※	BS	BS
1961	AS	BW	1979	AS	BS	1997※	BS	BS
1962	AW	AS	1980	AS	BW	1998※	BS	BS
1963	AW	AS	1981	AW	BW	1999	BS	BW
1964	BW	AS	1982	AS	AW	2000※	BS	BS
1965	BW	AS	1983	AW	AW	2001	BS	AW
1966	BW	BW	1984	AS	BS			
1967	BW	AS	1985	AW	AW			



图6 全球热盐环流图

称为回流漩涡异常主模态，第二模态则可称为次模态。

#### 4.2 该异常对热盐环流的可能影响

图6给出了《NASA's Earth Science Enterprise Informational CD-ROM Version3,1999》中的全球热盐环流图。由图可见，在大西洋，热盐环流在高纬出现海水下沉，而在太平洋，其在中纬则出现了海水涌升；而该海水涌升或许不能排除风应力的作用。由于该海水涌升处位于中纬西风带日本本州岛以东海域，在该处风应力的强迫下，海水被吹离本州岛向东流动，这样就造成该岛以东海域上层海水质量的流失；依流体连续性原理，深层的海水就要向上涌升，来弥补缺失的质量。由此可知，在北太平洋日本本州岛以东海域，热盐环流的水平流动和涌升则也许均与风应力的强迫有关；而这或许能够对管玉平和黄瑞新的机械能（主要由风等提供）驱动大洋热盐环流的新理论做出说明<sup>[24]</sup>。结合前面的讨论还可知，全球增暖也许会造成北太平洋热盐环流涌升的减弱。这里附带说一句，在大西洋北部的极地东风带，因这里的热盐环流（见图6）受极地东风强迫，故在接近格陵兰岛时受陆地边界阻挡，会造成该处海水下沉；这样看来在北大西洋，热盐环流与风应力的强迫或许也是有关系的。该两海域（本州岛和格陵兰岛以东的海域），可能是风应力驱动热盐环流的关

键海域。当然以上只是我们的主观分析推断，实际情况是否如此，尚要待更多的观测研究来证实。

#### 4.3 该异常的性质

由计算得到的第一、二模态涡度场的空间分布知（图略），上述第一、二模态同时出现反气旋涡旋的海域为北太平洋最明显的涡度异常源区，且涡度异常大于散度异常（图略）<sup>[16]</sup>。因该气旋偶或气旋列中单个涡旋的直径在500 km左右，属海洋中的大尺度系统，故该异常的性质应该是风应力强迫下Rossby波的异常，我们的解析研究也表明了这一点。

#### 4.4 该异常与热带太平洋的比较

文献[25]研究了5月份热带太平洋上层流场的异常。此处将本文的赤道外北太平洋上层流场的异常与其作一比较。

从明显异常的水平范围看，前者包含了整个赤道地区，后者则仅位于日本本州岛的以东、以南海域，前者异常的范围与整个EOF分析的海域的相对比例要较后者大得多。正因如此，前者第一、二模态的方差贡献(32.66%，9.32%)也较后者大，特别是第一模态前者较后者要大许多。后者其第一模态方差贡献明显偏小的原因正是因其明显异常的范围仅占整个北太平洋很小一部分的缘故。为此我们对 $27.5^{\circ} \sim 39.6^{\circ} \text{N}$ ， $134.5^{\circ} \sim$

154.5°E的范围,即后者出现明显流场异常的海域作了复 EOF 分析(其他条件不变),此时其第一、二模态的方差贡献分别上升到 21.75 %和 11.88 %,且该海域中第一模态的空间场与图 1 中对应海区内的空间场相似(图略)。该结果验证了我们以上对后者方差贡献偏小的分析。

从流场异常影响的大气、海洋系统看,前者主要影响大气的 Hadley 环流和 Walker 环流,并通过这两个环流影响热带和副热带的气候,且对我国气候异常影响明显;如前者的异常与我国江淮梅雨的多寡密切相关<sup>[26]</sup>。后者因处中纬度西风带,我国位于该异常的上游,故其对我国气候的影响没有前者那样大;然而正如上面所述,后者可能会影响到全球海洋热盐环流系统,故其影响或许具有潜在性、长期性和全球性,故其对全球气候异常的可能影响就更值得我们重视和研究。

从异常的性质看,前者是赤道海洋 Kelvin 波的异常,其表现为  $v$  分量近于 0 的赤道俘获波形式;而后者是中纬度海洋 Rossby 波的异常,其表现为涡旋偶或涡旋列的形式。

## 5 结语

本文采用复 EOF 分析方法,对春季(4月份)赤道外北太平洋海域的上层流场异常做了统计动力诊断,得到了以下主要结论:

(1) 赤道外北太平洋海域上层流场的明显异常主要发生在日本本州岛以东、以南范围不大的海区(27.5°~39.6°N, 134.5°~154.5°E)内;异常的第一、二模态分别表现为东东北至西西南走向的涡旋偶和涡旋列;

(2) 该两模态时间系数的辐角均分别有两个状态,相应的偏差流场则分别与其空间场相同或相反;其模的大小决定了其偏差流场偏离以上两个状态的程度,模值越大则异常越大;该两模态的时间系数均有非常明显的 20 年左右的年代际变化,这可能与北太平洋年代际涛动(PDO)有关;

(3) 该两模态均反映了黑潮延伸体以南回流漩涡的异常,其分别为回流漩涡异常的主模态和次模态,其性质是海洋 Rossby 波的异常;

最后要说明的是,本文主要工作是诊断分析,故很难确定在海气相互作用中海气两者谁是

矛盾的主要方面;也许随着空间尺度和时间尺度的不同,矛盾的主要方面也会发生改变和转换;故而必须进一步做理论和数值研究,才能对该问题做出满意的回答;这也是我们今后进一步要做的工作。

## 参考文献:

- [1] 巢纪平.厄尔尼诺和南方涛动动力学[M].北京:气象出版社,1993.
- [2] 张东凌,曾庆存.大气环流中 ENSO 循环的动力统计分析[J].自然科学进展,2007,17(10):1401-1409.
- [3] 王在文,李晓东.太平洋海温演变的时刻特征[J].北京大学学报(自然科学版),2002,38(3):350-357.
- [4] Worthington L V. On the North Atlantic circulation[J]. Johns Hopkins Oceanogr Stud, 1976, 6: 110.
- [5] Richardson P L. Averaged velocity and transport of the Gulf Stream near 55°W[J]. Mar Res, 1985: 43, 83-111.
- [6] Kawai H. Hydrography of the Kuroshio Extension. Kuroshio Its Physical Aspects[M]. University of Tokyo Press, 1972: 235-354.
- [7] Mizuno K, White W B. Annual and interannual variability in the Kuroshio Current system[J]. Phys Oceanogr, 1983, 13: 1847-1867.
- [8] Wijffels S E, Hall M M, Joyce T M, et al. Multiple deep gyres of the western North Pacific: A WOCE section along 149°E[J]. Geophys Res, 1998, 103: 12985-13009.
- [9] Spall M A. Dynamics of the Gulf Stream/deep western boundary current crossover. Part II: Low-frequency internal oscillations[J]. Phys Oceanogr, 1996, 26: 2169-2182.
- [10] Qiu B, Miao W. Kuroshio path variations south of Japan: Bimodality as a self-sustained internal oscillation[J]. Phys Oceanogr, 2000, 30: 2124-2137.
- [11] Schmeits M J, Dijkstra H A. Bimodal behavior of the Kuroshio and the Gulf Stream[J]. Phys Oceanogr, 2001, 31: 3435-3456.
- [12] Dewar W K. Nonlinear midlatitude ocean adjustment[J]. Phys Oceanogr, 2003, 33: 1057-1082.
- [13] Hogg A M, Killworth P D, Blundell J R, et al. Mechanisms of decadal variability of the wind-driven ocean circulation[J]. Phys Oceanogr, 2005, 35: 512-531.
- [14] Pierini S, Kuroshio A. Extension system model study: Decadal chaotic self-sustained oscillations[J]. Phys Oceanogr, 2006, 36: 1605-1625.
- [15] Berloff P, Hogg A M, Dewar W K. The turbulent oscillator: A mechanism of low-frequency variability of the wind-driven ocean gyres[J]. Phys Oceanogr, 2007, 37: 2362-2386.
- [16] 路凯程. 北太平洋海温流场异常分析[D]. 解放军理工大学, 2010.
- [17] Katharyna A, Caruso M J, Singh S. Observations of atmosphere/ocean coupling in western boundary currents[J]. Geophys Res submitted, 1994.
- [18] Chen S, Qiu B, Hacker P. Profiling float measurements of the

- recirculation gyre south of the Kuroshio Extension in May to November 2004[J]. *Geophys Res*, 2007, 112.
- [19] Waterman S N, Hogg N G, Jayne S R. Eddy-mean flow interactions in the Kuroshio Extension and their relation to a simplified dynamical model[J]. *Phys Oceanogr*, 2008.
- [20] Mu M, Duan W S. A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (10): 1045-1047.
- [21] 张东凌. 亚洲夏季风空间结构与时间演变动力统计分析[D]. 中国科学院大气物理研究所, 2006.
- [22] 曲维政, 黄菲, 赵进平等. 北太平洋年代际涛动与太阳活动的联系[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(6): 552-560.
- [23] Qiu B, Chen S. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales[J]. *Phys Oceanogr*, 2005, 35: 2090-2103.
- [24] Guan Y P, Huang R X. Stommel's Box Model of Thermohaline Circulation Revisited-The Role of Mechanical Energy Supporting Mixing and the Wind-Driven Gyration, *Journal of Physical Oceanography*[J]. 2008, 38(4): 909-917.
- [25] 卢炯, 张东凌. 热带太平洋 5 月份上层洋流的动力统计诊断[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 22-30.
- [26] 卢炯. 热带海气环流异常有关研究[D]. 解放军理工大学, 2009.