北太平洋环流振荡形成机理的数值研究

吕庆平1,张 瑰2*,张东凌3,张胜军4

(1. 中国人民解放军 91001 部队,北京 100143; 2. 中国人民解放军陆军工程大学 基础部,江苏南京 211101;
3. 中国科学院 大气物理研究所,北京 100029; 4. 中国人民解放军 92192 部队,浙江 宁波 315122)

摘 要:利用大洋环流模式,探讨海洋对大气强迫的响应及北太平洋环流振荡模态(NPGO)形成的直接原因。对 控制试验模拟的海表温度异常(SSTA)进行经验正交函数(EOF)分解,发现第二模态类似于经典 NPGO 模态,说明 采用该模式研究海洋对大气强迫的响应是可行的。在控制试验基础上,通过改变大气强迫场设计了一系列敏感试 验,发现大气强迫场为 NPGO 模态正强年的合成场时,所得 SST 异常场能较好再现 NPGO 空间特征,说明海洋状 态强烈依赖于大气强迫,大气强迫是造成 NPGO 的直接原因;对大气强迫场中的动力强迫、热力强迫等物理量进行 不同配置进行试验,发现风场动力强迫对 NPGO 的影响最大,是形成 NPGO 的关键强迫,其中又以纬向风应力的 影响居首。

关键词:大洋环流模式;NPGO;大气强迫;海洋响应

中图分类号:P732.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-6647(2020)04-0582-09

doi:10. 3969/j.issn.1671-6647.2020.04.004

引用格式:LÜQP,ZHANGG,ZHANGDL, et al. Numerical study on the formation mechanism of the North Pacific gyre oscillation[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 582-590. 吕庆平,张瑰,张东凌,等.北太平洋 环流振荡形成机理的数值研究[J].海洋科学进展, 2020, 38(4): 582-590.

随着海洋观测资料的长时间积累和数据同化产品的不断推出,20世纪90年代后,10 a 及以上年代际尺度的海洋气候变化成为国际气候学研究中的热点问题。2008年,Di Lorenzo^[1]对东北太平洋海域的海表面高度(Sea Surface Height,SSH)定义了一个新的气候模态,北太平洋环流振荡(North Pacific Gyre Oscillation,NPGO),即东北太平洋(180°~110°W,25°~62°N)SSHA EOF 分解第二模态。NPGO 模态不仅很好地反映了风应力和海表面盐度距平的变化,而且与东北太平洋中生物变量的变化趋势相关性很高。由于海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)和 SSH 的变化趋势相关较高^[2],所以 SST 的年代际变化也能反映 NPGO 模态^[3]。

NPGO 和北太平洋年代际振荡模态(Pacific Decadal Oscillation, PDO)都是中纬度北太平洋 SST 的主要模态,观测和海洋环流模式均揭示出 NPGO 模态和 PDO 模态分别对应于特定的大气强迫场^[4-6]:PDO 模态对应于阿留申低压(Aleutian Low, AL)异常强迫,而 NPGO 则对应于北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)的异常强迫。AL 异常是北太平洋海平面气压(Surface Level Pressure, SLP)异常变率的 EOF (Empirical Orthogonal Function)分解第一模态,而 NPO 是北太平洋 SLP 异常变率的 EOF 分解第二模态。 NPGO 模态和 PDO 模态及其对应的特定大气异常强迫可以从长时间序列的观测资料中得到^[7],这一结果得到了 IPCC AR4 海气耦合模式结果的验证^[8]。然而,以往的工作大多采用统计学方法^[9-10],难以解释 NPGO 模态形成的物理机制,本文利用大洋环流模式来探索 NPGO 的形成机理,这样物理意义更加明确。

收稿日期:2019-10-28

资助项目:国家重点研发计划项目——地球系统模式的改进、应用开发和高性能计算(2016YFB0200800)

作者简介:吕庆平(1986-),女,工程师,博士,主要从事海气相互作用方面研究. E-mail: qingping860405@sina.com

(李 燕 编辑)

^{*} 通信作者:张 瑰(1973-),女,副教授,博士,主要从事数学物理方法方面研究. E-mail: zhanggui73@163.com

1 资料与方法

1.1 资料

研究使用的纬向风速、经向风速、海面风速、海平面气压、海表气温、相对湿度、净短波辐射和总云量等资料来自于美国国家环境预报中心(NCEP/NCAR),空间分辨率为 2.5°× 2.5°,时间范围为 1948 年 1 月至 2006 年 12 月,共计 708 个月;月平均 SST 资料来自于美国国家气候数据中心(National Climatic Data Center, NCDC)^[11],空间分辨率为 2°× 2°。此外,本文还引入了 NPGO 指数^[11],该指数反映了 NPGO 的强弱。 月平均 SST 资料和 NPGO 指数的时间范围均为 1958 年 1 月至 2006 年 12 月,共 588 个月。

1.2 场相似度概念

本文引入了曾庆存等^[12-14]提出的场相似度概念,用以表示 2 个物理量场空间分布结构的相似(相关)程 度。2 个物理量场 F_1, F_2 的场相似度为 $R = (F_1, F_2)/(||F_1|| \cdot ||F_2||), (F_1, F_2)$ 表示 $F_1 与 F_2$ 的内积, $||F_1||$ 和 $||F_2||$ 分别是 F_1 和 F_2 的范数,且 $-1 \le R \le 1$ 。当 R = 1时,场 F_1 与场 F_2 的空间分布结构相 同;当 R = -1时,场 F_1 与场 F_2 空间分布态势一样,但空间位相配置相反;当 R = 0时这 2 个场正交,即两者 不相关。| R | 越大,则表示这两个场相关程度越高,其空间场的分布态势也越接近。

1.3 大洋环流模式简介

我们使用的海洋环流模式是李东辉^[17]在L30T63大洋环流模式^[15-16]基础上改进的准全球海洋环流模 式,并将其命名为OGCM1。OGCM1提高了L30T63大洋环流模式的水平分辨率,将原有的纬向网格加密 到1.5°,经向网格加密到1°;垂直分辨率则保持不变,仍为不等距的30层,其中最上面300m有12层,各层 间距都是25m,这使温跃层内的分辨率得以提高。该模式最大海深为5600m。除个别地方外,该模式保留 了L30T63OGCM的动力框架和物理过程。该模式不考虑北冰洋,北边界取到65°N,南边界取到68°S,全 球海洋除北冰洋外几乎为该模式所包含。在南北边界取刚壁边界条件,温盐法向导数取为0。模式海底地 形场从美国海军海洋办公室(Naval Oceanographic Office)的DBDB5(Digital Bathymetric Data Base 5 min) 的海洋深度资料中提取,DBDB5的分辨率则为(1/12)°×(1/12)°。

使用数值模式进行试验前,首先要得到模式的稳定状态。王力群等^[18]使用气候态强迫场,对 OGCM1 模式从静止状态积分至1000年结束,然后将模拟结果与 SODA 海洋同化资料气候平均值进行比较分析,结 果与实况基本一致,可认为此时模式达到了稳定状态。本文的数值模拟和试验均在该稳定状态上进行。

模式的强迫场包括纬向风速、经向风速、海面风速、海平面气压、海表气温、相对湿度、净短波辐射和总云 量等,其中通过纬向风速、经向风速、海面风速、海平面气压和海表气温可分别计算得到纬向风应力和经向风 应力;通过海平面气压、海面气温和相对湿度可得到饱和水汽压;而模式初始的温盐场则使用 Levitus 气候 平均温盐资料,在本文的数值实验中,初始温盐场均照此选取,不再赘述。

本文在模式稳定状态的基础上,加进各物理量强迫场,进行数值模拟(控制试验)以及气候敏感性试验。 在控制试验中,强迫场采用各年12个月各物理量的理想(假想)场或实际场,并积分至指定年数,此时的强迫 场具有月际、年际、年代际变化。在气候敏感性试验中,一年12个月的强迫场则按照需要构造,这种按需构 造的强迫场只有月际变化,而无年际、年代际变化。这两种情况在该模式中可分别用开关 EXP 和 CLM 来 控制。当进行控制试验时,打开 EXP 开关;当进行气候控制试验时,打开 CLM 开关。

在本文的数值模拟(控制试验)中,取1948—2006年的 NCEP/NCAR 的月平均资料作为大气强迫场,积分 59 a;并取后 49 a 的模式输出结果作为 1958—2006年实际大洋状态的模拟场,而前 10 a 的结果舍弃不用。

该大洋模式将第一层(水深 12.5 m)作为海表层,本文针对模式输出场中的 SST,对北太平洋海域模拟 的冬季 SSTA 进行 EOF 分析(这里 SSTA 场由每年 SST 场减去多年气候平均场得到),以探讨模拟场中 NPGO 模态是否存在;此后,设计一系列敏感试验,以探讨海洋对大气强迫的响应和海洋中 NPGO 模态形成 的直接原因。本文北太平洋海域均指(110°E~110°W,24°~62°N)海域,而冬季则指 1—3 月的平均。

2 控制试验

为揭示北太平洋海域经典 NPGO 模态的空间结构,利用研究海域内 1958—2006 年冬季 SSTA 与 NPGO 指数进行回归分析。图 1 为回归系数场分布图,可见:北太平洋上 SSTA 呈南北向的偶极子分布,其 北部的负值中心位于(165°~140°W,42°~48°N),南部的正值中心位于(180°E~165°W,27°~34°N),零线位 于 40°N 附近,这意味着北、南部的 SST 分别有冷、暖异常,属于经典 NPGO 的暖位相,图中的正、负值区域 为暖、冷异常的范围。

为揭示模拟 SST 场中 NPGO 模态的存在性,对模拟的北太平洋海域冬季 SSTA 做 EOF 分析,第一、第 二模态的方差贡献分别为 33.68%和19.56%,均通过了 North 检验。图 2 为模拟的第二模态空间场,可以看 出:SSTA 呈南负北正的偶极子分布,偶极子的正值中心位于(160°~150°W,40°~45°N),负值中心位于 (170°E~165°W,24°~32°N),零线位于 37°N 附近。模拟的第二模态空间场与经典 NPGO 模态空间场(图 1)基本一致,均呈偶极子分布,正、负中心位置也基本一致,只是正、负中心相反,类似于经典 NPGO 模态的 冷位相。



此外,对模拟 SSTA EOF 第二模态时间系数与 NPGO 指数进行相关分析发现,相关系数绝对值为

0.72,相关性较高;随后,对其进行小波分析发现,存在主周期为13 a 的年代际变化(图略),这与 NPGO 模态的周期一致^[9]。上述结果表明,OGCM1 模拟 SSTA EOF 第二模态的时间系数与空间场,能够重现 NPGO 模态的空间结构和时间演变,这说明该模式对 NPGO 的模拟是成功的。

3 气候敏感性试验

采用数值模式,进一步进行大气强迫的气候敏感性试验,主要探讨海洋对大气强迫的响应和海洋中 NPGO模态形成的直接原因。

在进行气候敏感性试验之前,首先进行气候控制试验。将大气实况场中的各物理量进行 59 a(1948—2006 年)的月气候平均,将气候月平均场作为大气强迫场,称之为气候态强迫场;打开 CLM 开关,进行 59 a 的积分,并称之为气候控制试验。此时每年的强迫均相同,也即强迫场只有月际变化,而无年际、年代际变化。

在气候控制试验中发现,输出的第 10 年与第 20 年的冬季北太平洋 SST 场相似度可达 0.999 5,表明输 出结果在积分约 10 a 后便可应用;故在下面的气候敏感性试验中,均只积分 10 a,并取第 10 年的结果来做 分析。

3.1 试验方案

图 3 为进行 18 个月高斯滤波后的 1958—2006 年间的 NPGO 指数。将滤波后 NPGO 指数超过+1 的 年份定义为 NPGO 的正强年;反之,NPGO 指数低于一1 的年份则定义为 NPGO 的负强年。由此定义可 知,NPGO 的正强年为 1961 年、1975 年、1976 年、1977 年、1988 年、1989 年、1999 年、2000 年、2001 年、2002 年和 2003 年,共 11 a。为揭示在 NPGO 正强年期间,海洋对大气的响应特征;将 NPGO 正强年的各月大气 强迫场分别做合成后,可得到相应气候正强年各月平均的大气强迫场,用之进行气候敏感性试验,并记为 EXP1,该试验的强迫场只存在月际变化,而无年际、年代际变化。



Fig.3 NPGO index filtered with the Gaussian Filter

3.2 结果分析

图 4 为 EXP1 的 SST 异常场的空间结构,这里 SST 异常场为试验输出 SST 场与气候控制试验中 SST 场的差值,后续试验 SST 异常场与此相同。由图 4 可见,该异常场的空间结构与控制试验 SSTA EOF 分析 第二模态(图 2)的空间场基本一致,也表现为北太平洋偶极子分布,与典型 NPGO 模态的冷位相类似,只是 该偶极子的正、负值中心偏西,零线略偏北(位于 42°N 附近)。



以上结果表明,使用 NPGO 气候正强年的大气强迫场来强迫该海洋模式,其 SST 场的异常场能较好再现 NPGO 的空间场特征。这说明采用该大洋环流模式研究海洋对大气强迫的响应是可行的。大气强迫场的改变对 NPGO 有非常明显的影响,也即海洋的响应强烈依赖于大气的强迫,大气强迫是造成 NPGO 现象的直接原因。

4 动力与热力强迫的影响

为进一步探讨强迫场中究竟何物理量对 NPGO 模态的影响更显著,本节将对 NPGO 正强年强迫场的物理量进行不同配置后,再进行敏感试验。

大气强迫场中纬向风应力、经向风应力和海面风速的强迫属于动力强迫,海平面气压及海面气温属于热力强迫,饱和水汽压由海平面气压及海表气温计算而得,而净短波辐射及总云量亦属热力强迫范畴。对于热力强迫,可将海平面气压、海表气温和饱和水汽压称为热通量强迫,而将净短波辐射和总云量称为其他热力强迫,简称为其他强迫。现为考察动力强迫、热通量强迫和其他强迫中各个物理量对 NPGO 模态的不同影响,分别设计了2组敏感性试验,各积分了10 a,并对积分第10年后的结果进行分析讨论。该2组试验除物理量强迫的选取不同外,其他试验流程和处理方案都与上节的气候敏感性试验相同。

4.1 第一组试验

第一组敏感性试验共有 3 个,分别称之为 EXP2,EXP3 和 EXP4,其试验方案见表 1。表中物理量取 1 值,表示采用试验 EXP1 中的强迫场,即 NPGO 气候正强年的强迫场;物理量取 0 值,表示采用气候控制试验中的强迫场,即气候态强迫场。这就表明,若某物理量取 1 值,则该物理量带有 NPGO 正强年的信息,若取 0 值,则不带此信息。

图 5a~5c 为试验 EXP2~EXP4 输出的 SST 场异常场,由图 5 可知:EXP2~EXP4 的 SST 异常在北太 平洋均存在偶极子分布,只是当风场动力强迫取气候态时(EXP2),SST 异常场(图 5a)在西海岸处与典型 NPGO 模态(图 4)有所差异;当热通量强迫取气候态时(EXP3),SST 异常场(图 5b)的北太平洋偶极子中心 值较弱,且西海岸处出现一个负异常中心;当只有其他强迫取气候态时(EXP4),SST 异常场(图 5c)类似于 典型 NPGO 模态的冷位相,与图 4 基本相同。

为进一步定量化上述试验与 NPGO 模态的差异,分别计算了 EXP2~EXP4 中的各 SST 异常场与 EXP1 中的 SST 异常场的场相似度。结果显示:动力强迫(EXP2)对 NPGO 模态的影响最大,其场相似度最 小,仅为 0.644 7;热通量强迫(EXP3)对 NPGO 模态的影响次之,其场相似度为 0.793 0;而其他强迫对 NPGO 模态的影响很小,其场相似度高达 0.997 4,接近于 1。

表1 敏感性试验方案设计

Table1 Configuration of sensitivity experiments										
大气物理量	EXP2	EXP3	EXP4	大气物理量	EXP2	EXP3	EXP4			
纬向风应力	0	1	1	经向风应力	0	1	1			
海面风速	0	1	1	海平面气压	1	0	1			
海面气温	1	0	1	饱和水汽压	1	0	1			
净短波辐射	1	1	0	总云量	1	1	0			



Fig.5 SST anomaly fields of the first group of experiments

4.2 第二组试验

由第一组试验可知,净短波辐射和总云量对 NPGO 模态几乎无影响,故在第二组试验中均取 EXP1 中的合成异常场。为进一步揭示强迫场中哪个物理量对 NPGO 模态的影响更大,根据大气强迫场中的 6 个物理量,即纬向风应力、经向风应力、海面风速、海平面气压、海面气温及饱和水汽压,设计了 6 个敏感性试验。 6 个气候敏感性试验分别改变强迫场中的 6 个物理量场,并记为 EXP5~EXP10。表 2 为这些试验的设计方案,表中值取 0 和 1 的意义与第一组试验相同,不再赘述。

物理量	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8	EXP9	EXP10
纬向风应力	0	1	1	1	1	1
经向风应力	1	0	1	1	1	1
海面风速	1	1	0	1	1	1
海平面气压	1	1	1	0	1	1
海面气温	1	1	1	1	0	1
饱和水汽压	1	1	1	1	1	0
净短波辐射	1	1	1	1	1	1
总云量	1	1	1	1	1	1

表 2 敏感性试验方案设计 Table 2 Configuration of sensitivity experiments

为判定表 2 中各物理量对形成 NPGO 模态的相对重要性,这里也分别计算了 EXP5~EXP10 中的 SST 异常场与 EXP1 中的 SST 异常场的场相似度,其值分别为 0.760 0,0.978 8,0.960 2,0.999 2,0.965 3 和 0.944 6。由场相似度的大小可知: 年向风应力(EXP5) 对 NPGO 模态的影响最大,其场相似度值最小,为 0.760 0。饱和水汽压(EXP10)、海面风速(EXP7)、海面气温(EXP9)的影响次之,场相似度值分别为 0.944 6, 0.960 2,0.965 3。海平面气压(EXP8)的影响最小,其场相似度值为 0.999 2。尽管单独年向风应力对 NPGO 模态的影响最大,但仍不如整个风场的动力强迫作用大,因 EXP2 与 EXP1 的场相似度为 0.644 7,其值更 小;不过单独的年向风应力对 NPGO 模态的影响仍较第一组试验中的热通量强迫要大,因前者的场相似度 值为 0.760 0,后者为 0.793 0。上述事实表明,大气强迫场中的多个物理量必须协同作用,相互配合才能强 迫得到海洋中的 NPGO 模态,NPGO 现象是大气动力强迫和热通量强迫相互配合的结果。

最后要指出的是:对于气候尺度的真实大气,因其具有准地转、准静力的性质,故动力强迫与热力强迫两 者不是独立的;当存在动力强迫异常时,必然存在热力强迫的异常,反之亦然。由此可知,在如表2所示的敏 感性试验中,有些在实际中可能是很难或不会出现的,因其仅给出了动力或热力异常,而其他强迫则取正常 (气候值),故这些试验中的强迫场在实际中可能并不存在。然而,利用这些敏感性试验可探讨某些实际现象 与所研究问题的内在联系,并揭示其物理机制,而这正是这些敏感性试验的必要及有意义之处。当然,也要 看到这些敏感性试验局限的一面,在分析时合理对待。

5 结 语

本文使用大洋环流模式 OGCM1 做了控制试验、气候控制试验和气候敏感性试验,并与实况资料做了 对比分析,探讨了海洋对大气强迫的响应及 NPGO 模态形成的直接原因,所得主要结论有:

1) 对数值模拟的 SSTA 场做了 EOF 分解后,发现其第二模态的空间场在北太平洋呈南北偶极子分布, 类似于经典的 NPGO 模态;时间系数具有 13 a 的年代际变化周期,与 NPGO 指数的相关系数达 0.72,这表 明对 NPGO 的模拟是成功的。

2)使用 NPGO 模态正强年的合成强迫场来强迫该模式,SST 场的异常场能较好再现 NPGO 的空间场特征;故采用该模式来研究海洋对大气强迫的响应是可行的,且发现海洋状态强烈依赖于大气强迫。

3)风场动力强迫对 NPGO 模态的影响最大,其中更以纬向风应力居首,大气强迫场中的各物理量必须 共同作用,相互配合才能强迫得到海洋中的 NPGO 模态,NPGO 现象是海洋对大气各物理量综合强迫的直 接响应。

参考文献(References):

- [1] DI LORENZO E, SCHNEIDER N, COBB K M, et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L08607.
- [2] CUMMINS P F, LAGERLOEF G S E, MITCHUM G. A regional index of Northeast Pacific variability based on satellite altimeter data [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L17607.
- [3] LÜ Q P, LU K C, ZHANG M. NPGO mode of the upper sea temperature anomalies in the North Pacific during winter[J]. Climate and Environmental Research, 2013, 18(2): 210-220. 吕庆平, 路凯程, 张铭. 北太平洋冬季上层海温异常的 NPGO 模态[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 210-220.
- [4] CEBALLOS L, DI LORENZO E, HOYOS C D. North Pacific Gyre Oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems[J]. Journal of Climate, 2009, 22(19): 5163-5174.
- [5] CHHAK K, DI LORENZO E. Forcing of low-frequency ocean variability in the Northeast Pacific[J]. Journal of Climate, 2009, 22(5): 1255-1276.
- [6] LUK C, YU J, LÜ Q P, et al. Main modal analysis of combined EOF diagnosis to wind stress and flow field anomalies in North Pacific
 [J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(4): 467-481. 路凯程, 于杰, 吕庆平, 等. 北太平洋风应力与流场联合 EOF 的主模态分析
 [J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 467-481.
- [7] QIU B, CHEN S M. Eddy-mean flow interaction in the decadally modulating Kuroshio Extension system[J]. Deep-Sea Research II, 2010, 57(13-14): 1098-1110.
- [8] FURTADO J C, DI LORENZO E, SCHNEIDER N, et al. North Pacific decadal variability and climate change in the IPCC AR4 models [J]. Journal of Climate, 2011, 24(12): 3049-3067.
- [9] LÜ Q P, ZHANG L F, DAI W H. Coupling feature between the NPO mode and NPGO mode in North Pacific in winter[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(6): 19-25. 吕庆平, 张立凤, 戴文灏. 冬季北太平洋 NPGO 模态和 NPO 模态的耦合特征分析[J]. 海洋预报, 2015, 32 (6): 19-25.
- [10] ZHANG L F, ZHANG M, LÜ Q P. Research of North Pacific Gyre Oscillation in winter[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015. 张立凤,张铭, 吕庆平. 冬季北太平洋环流振荡之研究[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [11] SMITH T M, REYNOLDS R W, PETERSON T C, et al. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006)[J]. Journal of Climate, 2008, 21: 2283-2296.
- [12] ZENG Q C, ZHANG D L, ZHANG M, et al. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons Part I: basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observations[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(3): 285-302. 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 大气环流的季节突变与季风的建立 I: 基本理论方法和气候场 分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 285-302.
- [13] ZHU J, ZHANG L F, ZHANG M. Similarity and distance for verification of global numerical models[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 38(2): 86-93. 朱娟, 张立凤, 张铭. 检验全球数值预报模式的相似度等指标[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 86-93.
- [14] ZHANG D L, ZHAO Y L, ZHANG M. Analyses of wind similarity in onset of Asia tropic summer monsoon[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(5): 102-109. 张东凌, 赵艳玲, 张铭. 亚洲热带夏季风建立时风场相似度的分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(5): 102-109.
- [15] ZHOU T J, JIN X Z, ZHANG X H. Technical document of 30 layer ocean general circulation model[M]. Beijing: State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, 2000. 周天军,金向泽,张学洪. 三十层大洋环流模 式技术文件[M]. 北京:大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 2000.
- [16] LIU H L, YU Y Q, LI W, et cl. Reference manual for LASG/IAP Climate System Ocean Model (LICOM1.0)[M]. Beijing: Science Press, 2004. 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM1.0)参考手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

- [17] LI D H. Establishment and application of ocean circulation model[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2005. 李东 辉. 大洋环流模式的建立及其应用[D]. 南京: 解放军理工大学, 2005.
- [18] WANG L Q. Response of the tropical Pacific to persistent atmospheric forcing in mid-latitude[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009. 王力群. 热带太平洋对中纬度持续大气强迫的响应[D]. 南京: 解放军理工大学, 2009.

Numerical Study on the Formation Mechanism of the North Pacific Gyre Oscillation

LÜ Qing-ping¹, ZHANG Gui², ZHANG Dong-ling³, ZHANG Sheng-jun⁴

(1. People's Liberation Army 91001, Beijing 100143, China;

2. Basic Department, Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China;

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. People's Liberation Army 92192, Ningbo 315122, China)

Abstract: An oceanic general circulation model is adopted to study the oceanic response to atmospheric forcing and the formation mechanism of the North Pacific Gyre Oscillation (NPGO). The control experiment shows that the numerical model can successfully simulate the spatio-temporal features of the NPGO, suggesting that the model can be used to study the formation mechanism of the NPGO. The SST anomaly fields simulated by the model being forced with composed atmospheric fields of positive strong NPGO years are similar to the spatial pattern of the NPGO mode, suggesting that the atmospheric forcing is the direct mechanism of NPGO fromation. Sensitivity experiments reveal that the dynamic effect of wind is most important to the formation of NPGO, especially the effect of zonal wind stresses. **Key words**: oceanic general circulation model; NPGO; atmospheric forcing; oceanic response

Received: October 28, 2019