

1993—2011 年北大西洋与北太平洋的波浪变化及其原因探究*

石永芳¹ 杨永增² 吴克俭¹ 尹训强²

(1. 中国海洋大学海洋 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

提要 基于 1993—2011 年的 7 套卫星高度计数据, 分析北大西洋和北太平洋的波浪变化趋势; 利用 NCEP/NCAR 提供的月平均风场及 SLP(Surface Level Pressure)数据, 分析风场和 SLP 的空间变化特征, 并通过主成分分析进一步考察了波浪变化与 SLP 的相关关系。结果表明: 北大西洋波浪变化趋势的空间分布呈偶极子形态, 西南区域为增大趋势, 东北区域为减小趋势; 而北太平洋波浪变化的主要特征是在中纬度带呈明显的减小趋势; 比较而言, 波浪变化趋势的空间形态与 SLP 变化的空间分布特征更接近, 波浪主要模态的空间分布及时间系数与 SLP 距平场的震荡特征十分吻合, 大尺度背景场 SLP 的变化对波浪的长期变化趋势有重要的影响。

关键词 波浪变化趋势; SLP(Surface Level Pressure); 主成分分析; 北大西洋; 北太平洋
中图分类号 P731.22 **doi:** 10.11693/hyhz20130600077

近岸和近海工程建筑物处于严酷的海洋环境下, 要保证建筑物在此环境中安全并能在使用期内发挥其应有功能, 波浪常常是最主要的环境影响因素, 对波浪严重性估计过低将导致近岸和近海工程被破坏, 而估计过高又将导致很大的浪费。另一方面, 波浪作为海气界面一种重要的运动形式, 时刻影响着海气界面水汽、热量、动量的交换, 对大尺度海气相互作用也起着不可忽视的作用。

Bacon 等(1991)利用所有可用的船测走航数据和浮标数据, 揭示了 1962—1986 年整个北大西洋和北海波浪的增加趋势。Bouws 等(1996)收集超过 2 万张的手绘波图, 利用波图分析了 1960—1985 年北大西洋波浪的变化趋势, 研究结果表明: 在此期间波浪并没有明显的长时间尺度变化。Allan 等(2000)和 Seymour (2011)利用浮标观测资料分别分析了 1980—2000 年、1984—2007 年东北太平洋波浪的变化趋势, 他们的工作一脉相承, 结果都显示出东北太平洋波浪的增大趋势, 并分别运用不同的方法探究引起海浪变化的原因, 定量的计算了海浪的变化与北太平

洋涛动指数(EP)、南方涛动指数(MEI)、太平洋十年涛动指数(PDO)的相关关系。Woolf 等(2002)利用 1991 年 8 月—2000 年 2 月的实测卫星高度计资料对波浪随时间的变化进行了分析, 结果表明, 在北大西洋区域, 除了个别点有效波高有明显的下降或上升, 总体变化趋势并不明显。

随着数值计算和波浪模式的发展, 越来越多的工作利用后报和预报的波浪数据来研究波候。波候是某个时期内波浪要素(波高、波向、周期、极值等)的总体统计特征。Kushnir 等(1997)首次使用 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的 1000hpa 风场驱动模式, 利用所得的月平均有效波高分析北大西洋(0—70°N)10a(1980—1989 年)的波浪变化趋势。Günther 等(1997)和 The WASA Group (1998)通过模式得到了 1955—1994 年共 40a 的波浪后报数据, 利用线性回归方法分析了北大西洋的波候。黄勇(2008)利用第三代海浪模式构建了历时 45a 的西北太平洋地区的波候资料, 研究发现: 由于该地区的东亚夏季风正慢慢减弱, 使得东中国海北部地区的极值

*国家重点基础研究发展规划项目, 2010CB950404 号, 2007CB816002 号。石永芳, E-mail: yongfang37@163.com

通讯作者: 吴克俭, 教授, E-mail: kejianwu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2013-06-13, 收修改稿日期: 2013-09-06

波高存在缓慢的衰减现象。Guillaume 等(2010)利用再分析资料驱动波浪模式, 计算了过去 60a (1953—2009 年)北大西洋的波浪要素, 包括有效波高、波向和周期, 并分析了同一经度不同纬度的 3 个点的波浪要素时间序列及其线性变化趋势。李训强等(2012)和郑崇伟等(2012a, b)都利用第 3 代海浪数值模式 WAVEWATCH-III, 分别得到南海-北印度洋和中国海的海浪场, 并分析其变化特征。

综上所述, 一方面, 由于观测手段和技术的限制, 利用数值模式后报和预报的数据研究波浪变化的工作较多, 时间跨度长, 而使用实测数据研究波浪变化的工作较少, 并且时间跨度短; 另一方面, 国内外学者的研究工作大部分集中在北大西洋及近岸的区域, 对其他几大洋乃至全球的研究较少。以此为切入点, 考虑到现有的数据条件, 本文使用了 1993—2011 年的 7 套卫星高度计数据(表 1)、NCEP(美国气象环境预报中心)提供的月平均风场及 SLP(Surface Level Pressure)的再分析数据, 分析近 20a 北大西洋与北太平洋的波浪变化趋势及可能的原因。

通过计算本文得到近 20a 北大西洋与北太平洋最新的波浪变化趋势, 并讨论了其与大气调制作用的相关关系, 对北大西洋和北太平洋的不同变化形态进行相应分析。与前人的研究方法不同, 本文将全球划分为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格, 直接统计了卫星高度计的轨道数据在不同时刻落在每个网格点的观测值, 通过线性趋势分析及显著性检验, 得到有效波高的变化趋势。在分析波浪变化的物理机制时, 所用的方法也略有不同, 首先运用主成分分析(PCA)的方法分别得到波浪和 SLP 的主要变化模式, 再进一步讨论影响波浪变化的主要因素。

1 数据与方法

1.1 数据来源

主要研究区域为北大西洋($80^{\circ}\text{W}—20^{\circ}\text{E}$, $0—66^{\circ}\text{N}$)和北太平洋($99^{\circ}—280^{\circ}\text{E}$, $0—66^{\circ}\text{N}$)。对每个区域, 主要采用的数据包括: (1)卫星高度计数据(表 1); (2)由 NCEP 和 NCAR(美国国家大气研究中心)数据库提供的 1993 年 1 月—2011 年 12 月平均风场的再分析数据; (3)NCEP 和 NCAR 数据库提供的 1993 年 1 月—2011 年 12 月平均海表面气压的再分析数据。风场和海表面气压数据的分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

1.2 研究方法

不同卫星的周期不同, 经过 1 个周期, 数据覆盖

表 1 不同卫星的基本信息

卫星	数据时间	卫星周期
ERS-1	1992 年 10 月—1996 年 6 月	35
T/P	1992 年 10 月—2005 年 6 月	10
ERS-2	1995 年 5 月—2003 年 7 月	35
GFO	2000 年 1 月—2008 年 10 月	17
Jason-1	2002 年 1 月—	10
Envisat	2002 年 10 月—	10
Jason-2	2008 年 7 月—	10

全球, 但并不同步。本文直接统计了星下点轨道数据在不同时刻落到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点的观测值。图 1 显示, 超过 70% 网格的观测点数在 10000 个以上, 以任意两个网格点为例, 图 2 给出了每个格点数据的时间序列。基于上述方法所得的各网格点数据的信息量丰富, 能充分反映该网格点的波浪变化特征。

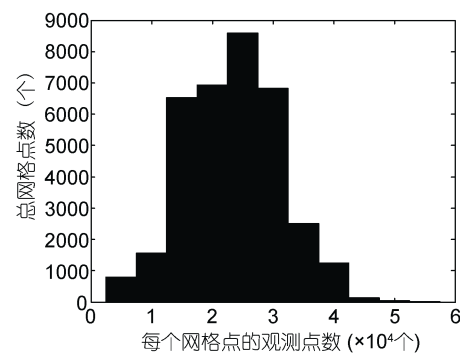


图 1 观测点数统计

Fig.1 Statistics of observation grids

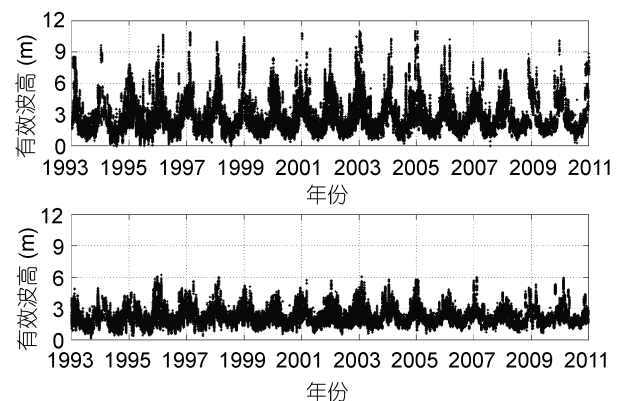


图 2 任意两网格的有效波高统计

Fig.2 Statistics of significant wave height of any two grids

通过 PCA 将波浪的变化与大气的调制作用联系起来, PCA 可以将变量场的信息集中在几个主要的模式上, 分离出的空间结构具有一定的物理意义, 正因

为如此, 通过这一方法可以更清晰地显示波浪主要变化与 SLP 的密切关系。

2 波浪的变化趋势及原因探究

这部分主要分析了 19a(1993—2011 年)中有效波高的变化趋势及与其对应的风场、SLP 的变化, 每个变量的变化率都高于 95% 的置信水平。

2.1 北大西洋

2.1.1 波浪、风场及 SLP 的变化 图 3 为 1993—2011 年北大西洋有效波高的变化趋势, 波浪的增大趋势占据了北大西洋的大部分, 在美国和加拿大东岸存在 2 个增大中心, 并向东南方向延伸至整个纬度带。亚述尔群岛西部是一个明显的波高递增区域, 自 1993 年以来, 大约每年增加 0.03m, 与此增大趋势伴随的减小趋势主要位于法韦尔角和比斯开湾连线东北部的北大西洋区域, 在过去的 19a 中约减小了 0.2m(递减率为 0.01m/a)。总体看来, 波浪在北大西洋的西南区域呈增大趋势, 而在东北大西洋区域呈减小趋势, 这种相反的变化趋势是一种偶极子的形态, 与北大西洋涛动(NAO)形态相似。

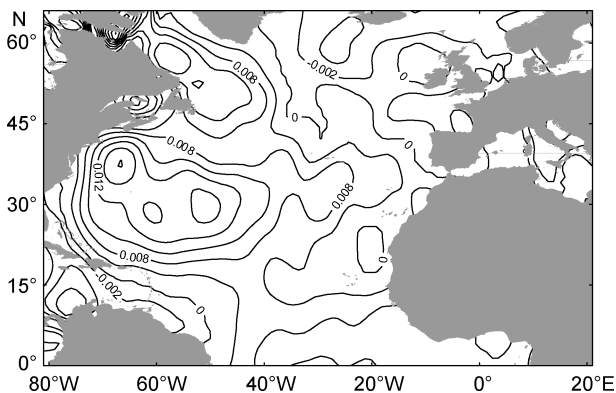


图 3 北大西洋波浪变化趋势的空间分布(单位: m/a)

Fig.3 Spatial distribution of wave trend in North Atlantic (unit: m/a)

风速、风暴数、风区等因素都能直接影响波浪强度, 要探究引起波浪变化的可能性原因, 应该了解过去 19a 风场的变化特征, 而风场的变化与整个北大西洋大气背景场的变化又是密不可分的。因此, 利用 NCEP 提供的月平均风场和 SLP 数据, 进一步统计比较北大西洋风速和 SLP 的变化趋势。

图 4、图 5 分别给出了 19a(1993—2011 年)风速和 SLP 的变化趋势。风速变化趋势的主要特点为: 在低纬度区域存在一个风速减小的纬度带(5°—20°N); 在 20°—45°N 左右的中纬度地区, 风速呈增大趋势;

与此增大趋势相对应的是风速在东北大西洋区域的减小趋势。总体来看, 风速变化的空间分布特征与波浪并不相同, 但二者增大和减小的主要区域都位于美国东岸和东北大西洋的冰岛一带。图 5 显示了 SLP 在 1993—2011 年的变化趋势, 以图中黑色加粗的 0 等值线作为界线, SLP 的减小趋势分布在北大西洋的大部分地区, 与此对应的增大趋势主要位于北大西洋东北部的冰岛一带。SLP 变化的空间分布特征与波浪相近, 相位相反。

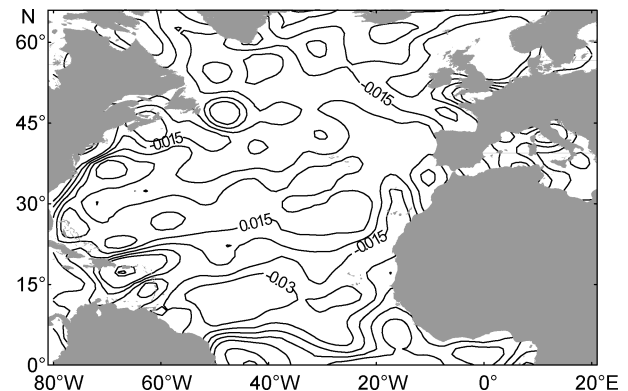


图 4 北大西洋风场变化趋势的空间分布(单位: m/a)

Fig.4 Spatial distribution of wind trend in North Atlantic (unit: m/a)

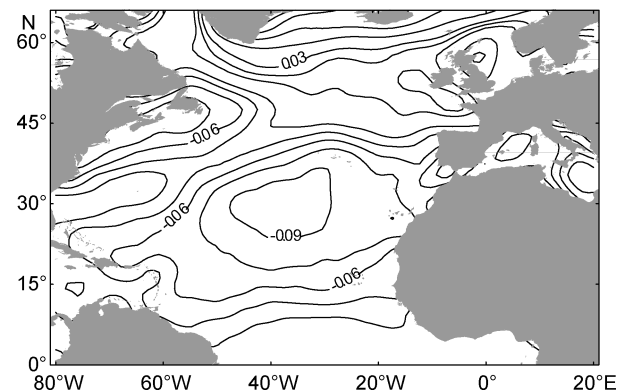


图 5 北大西洋 SLP 变化趋势的空间分布(单位: hPa/a)

Fig.5 Spatial distribution of SLP trend in North Atlantic (unit: hPa/a)

一般认为, 波浪直接由风场驱动, 主要受风速大小的影响, 特别是局地海区的波浪, 主要受到当地风的影响。由以上的分析可知, 波浪变化的空间分布特征与 SLP 的变化更接近, SLP 的减弱趋势对应着波浪的增大, SLP 的增强趋势对应着波浪的减小, 二者变化相位相反。我们有理由推测: 就整个北大西洋波浪的长期趋势而言, 其决定因素很有可能是大洋深处大尺度的气压震荡。为了探究波浪变化与 SLP 变化的相关关系, 对过去 19a 的波浪和 SLP 进行 PCA。

2.1.2 波浪和 SLP 的 PCA 北大西洋 SLP 和波浪的 PCA 结果表明: SLP 前 2 个模态的方差贡献率分别为 47.56%和 15.48%; 波浪前 2 个模态的方差贡献率分别为 28.13%和 23.53%, 二者其他模态的方差贡献率均小于 10.%。选取 2 变量前 2 个模态代表其主要的变化, 分析二者时空变化的相关关系。

SLP 第一模态的空间分布(图 6a)表现为北大西洋南北区域的反相位震荡, 以 55°N 为分界, 正值变异区位于此线以南, 负值变异区分布在此线以北的高纬度区域; 第一模态对应的时间系数有明显的年际变化, 对时间系数进行滑动平均, 如图 6b 所示, 虚线为图 6a 对应的时间系数, 实线为滑动平均曲线, 其中, 1996、2001、2010 年的时间系数为较小的负值, 此时南北气压变异区的气压差变小, 而 1994、2000 年的时间系数则为较大的正值, 它对应着南北气压变异区的气压差增强。SLP 这一模态的空间分布特征与北大西洋震荡的形态相近, 其中时间系数与 NAO 指数的相关系数达 0.8, 可以认为这是北大西洋涛动的主要形态。

由图 7a 可以看到, 波浪第一模态的空间结构在北大西洋的南北区域也呈反相位震荡, 由于波浪受陆地边界的限制和影响, 其空间特征与 SLP 略有不同, 波浪正负值变异区中心分别位于较高纬度的冰岛一带和中纬度区域的亚述尔群岛附近; 图 7b 的结果表明, 波浪的时间系数在 1996、2001、2010 年为负值, 而 1994、1999、2000 年则为正值。波浪距平场震荡的时间序列特征与 SLP 的变化特征相近, 特别是波浪变化较剧烈的几个年份与 SLP 一致(图 6b, 图 7b 的黑色小方框表示), 这表明波浪的变化与大气环流的异常震荡可能存在着内在联系。

SLP 第二模态的空间分布(图 8a)与第一模态截然不同, 其距平场从北大西洋的西南向东北方向延伸, 呈现为“负-正-负”的 3 级结构。负值变异区分别位于北大西洋的西南区域和 60°N 以北的东北区域, 正值变异区分布于北大西洋的中纬度区域。从时间系数(图 8b)可以看到, 负值主要出现在 1994、1995、1999、2001、2007 年, 而在 1996、2005、2011 年则为正值, 第二模态时间系数的振幅总体较小。

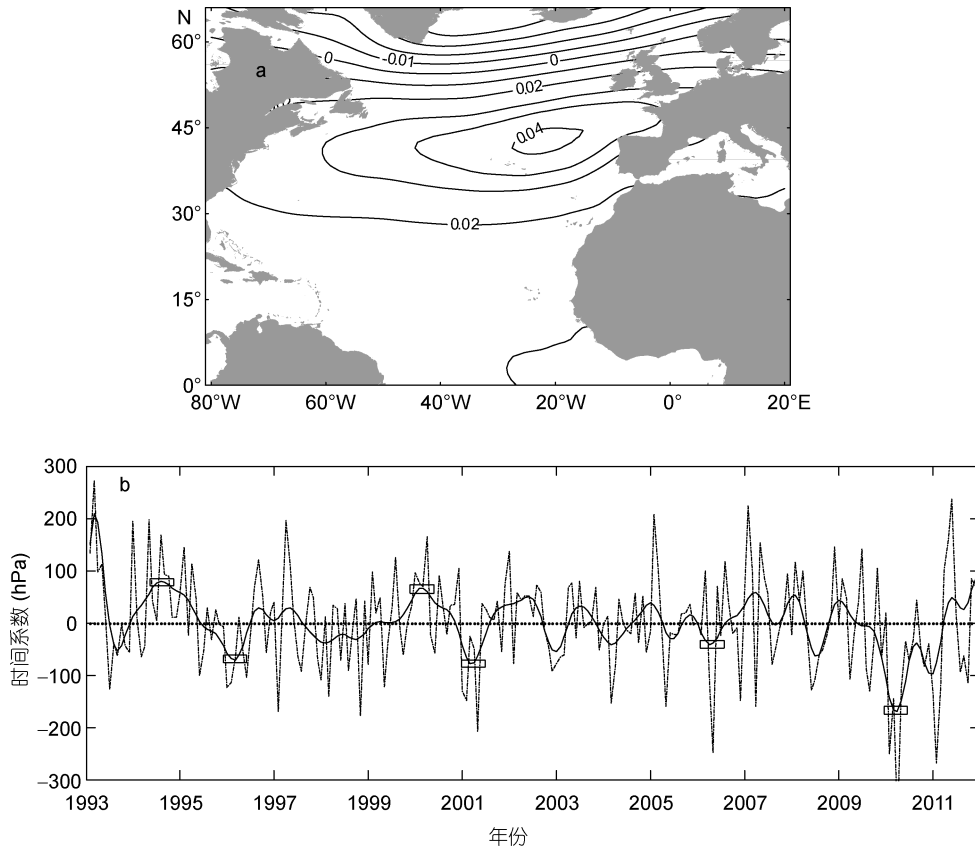


图 6 北大西洋 SLP 第一模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.6 Spatial distribution of the first EOF mode (a) and the time factor (b) for the SLP in North Atlantic
b 中虚线: 时间系数; b 中实线: 滑动平均曲线(图 7—图 9、图 14—图 17 同)

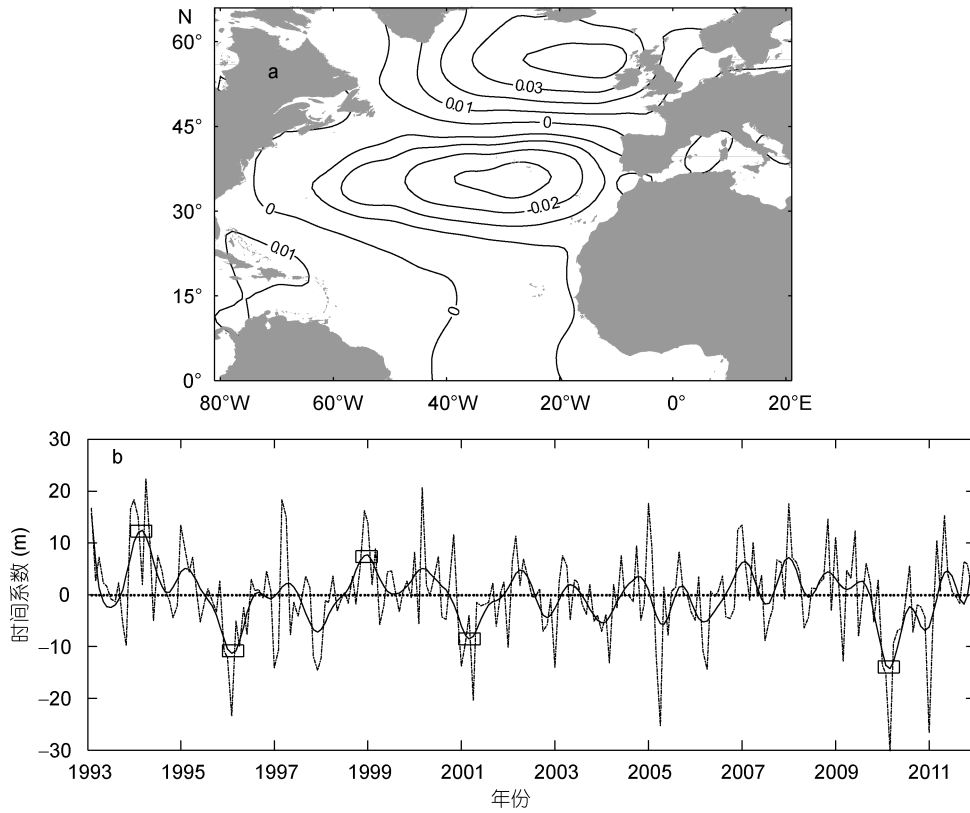


图 7 北大西洋波浪第一模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.7 Spatial distribution of the first mode (a) and the time factor (b) for the wave in North Atlantic

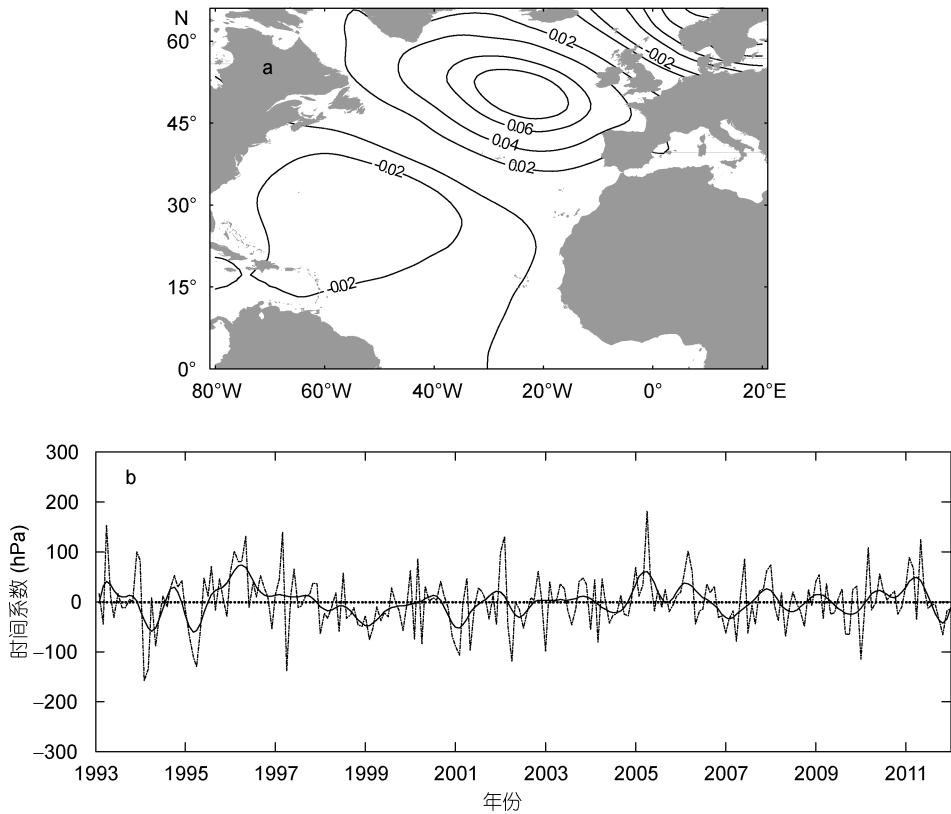


图 8 北大西洋 SLP 第二模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.8 Spatial distribution of the second mode (a) and the time factor (b) for the SLP in North Atlantic

如图 9a 所示, 波浪第二模态的空间分布呈现出“正-负-正”的三级结构, 其正负值变异区与 SLP 第二模态的空间位置相同, 相位相反, 其较明显的负震荡主要出现在 2001、2007、2010 年份, 而在 2000 年则为较明显的正震荡(图 9b)。

比较而言, 波浪和 SLP 第二模态时间系数的变化特征不同, 而其较明显的正负震荡年份与北大西洋涛动模态的变化特征更吻合(以图 9b 中的黑色小方框表示)。SLP 第一模态的大尺度震荡可能是影响波浪长期变化的主导因素。图 10 为 SLP 第一模态时间系数的趋势图, 可以清楚地看到, 时间系数呈减小趋势, 递减率为 -2.343hPa/a , 这表明南北气压变异区的

气压差总体变小, 在较大的正时间系数年, 冰岛低压和亚速尔高压偏强, 中纬度西风带加强, 北大西洋中部为强的高压脊控制, 向西移动的飓风容易受高压脊的影响转向偏北, 从北美东北部沿岸到大不列颠岛直至斯堪得纳维亚半岛, 风暴活动加强, 此时东北大西洋的波浪值较大; 而较大的负时间系数年, 冰岛低压和亚速尔高压都减弱, 西风带偏弱, 风暴主要在北美东北沿岸和中纬度海区活动。在过去 19a, 第一模态的时间系数总体呈减小趋势, 特别是在 1997—2000 年及 2007—2011 年的 2 个时间段, 负时间系数占优, 这一方面抑制了东北大西洋波浪的增大, 另一方面也有利于北大西洋西南方向波浪的成长。

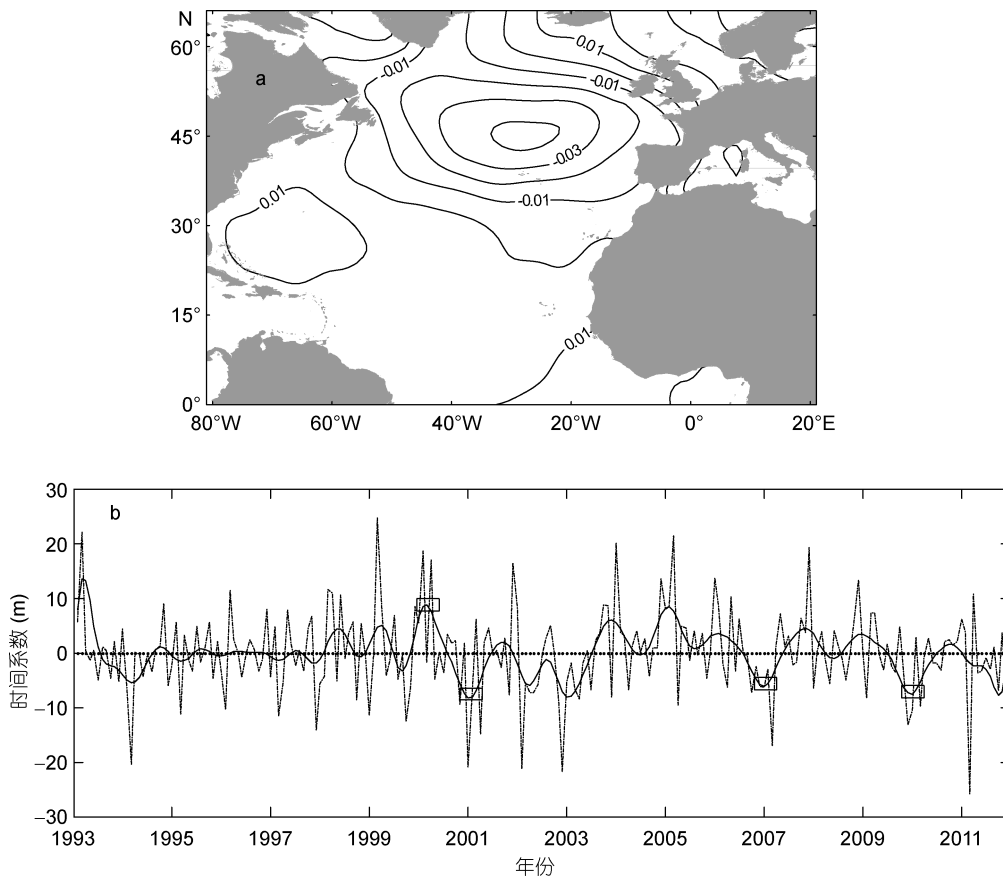


图 9 北大西洋波浪第二模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.9 Spatial distribution of the second mode (a) and the time factor (b) for the wave in North Atlantic

2.2 北太平洋

2.2.1 波浪、风场及 SLP 的变化

图 11 显示了 1993—2011 年有效波高在北太平洋的变化趋势, 其空间分布的主要特点是在 30° — 45°N 的北太平洋中纬度区域呈明显的减小趋势, 递减率约为 0.01m/a ; 在北太平洋东北和西南方向的小区域呈增大趋势, 在

过去 19a 约增大了 0.4m (递减率为 0.02m/a)。

类比于北大西洋波浪的研究方法, 利用 NCEP 提供的月平均风场和 SLP 数据, 统计比较了 1993—2011 年北太平洋风场和 SLP 的变化。

如图 12 所示, 风速的减小趋势主要分布在北太平洋的中纬度(30° — 45°N)区域, 并由中纬度带向南、

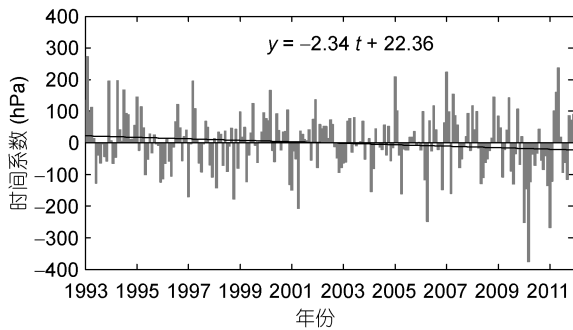


图 10 北大西洋 SLP 时间系数(第一模态)的变化趋势
Fig.10 The trend of SLP time factor (the first mode) in North Atlantic

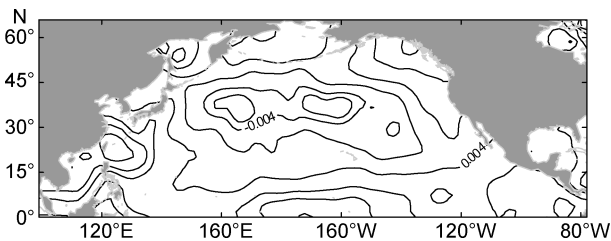


图 11 北太平洋波浪变化趋势的空间分布(单位: m/a)
Fig.11 Spatial distribution of wave trend in North Pacific (unit: m/a)

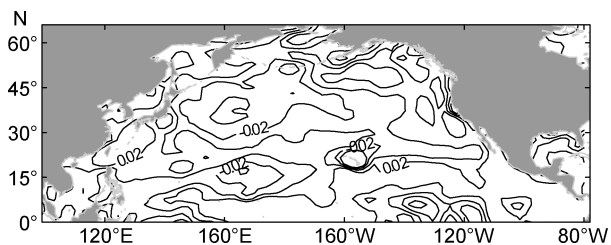


图 12 北太平洋风速变化趋势的空间分布(单位: m/a)
Fig.12 Spatial distribution of wind trend in North Pacific (unit: m/a)

北方向扩展至北太平洋的其他部分,与此减小趋势对应的是北美西岸及我国东部沿海岸线的增大趋势。图 13 显示了 SLP 在 1993—2011 年的变化特征,其递增区主要分布在北太平洋的中高纬地区,递减区位于北太平洋的西南区域,与风速变化的空间分布相比,SLP 变化的等值线更平滑并且与波浪多年变化的空间形态更相近,相位相反,此特点与北大西洋的统计结果一致。

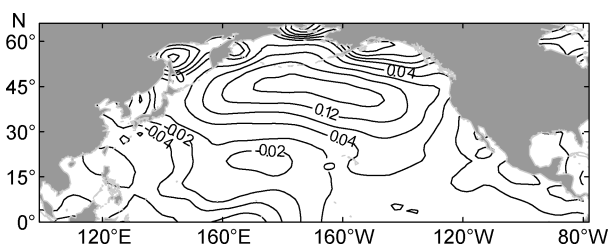


图 13 北太平洋 SLP 变化趋势的空间分布(单位: hPa/a)
Fig.13 Spatial distribution of SLP trend in North Pacific (unit: hPa/a)

2.2.2 波浪和 SLP 的主成分分析 1993—2011 年北太平洋波浪和 SLP 的 PCA 结果显示,二者前 2 个模态的贡献率分别为 40.33%、12.00% (SLP) 和 24.87%、12.93% (波浪),其余模态的方差贡献率均小于 9.6%,因此,下面主要分析 SLP 和波浪前 2 个模态的主要变化特征。

如图 14 所示,SLP 的第一模态在整个北太平洋呈同相位变化,最大的正值变异中心位于北太平洋的中纬度区域(约 45°N)。其对应的时间系数有显著的年际变化,其中,在 1998、2001、2003 和 2010 年的时间系数为负值,北太平洋气压场为整体减弱型,而在 1995、2002、2003、2009 年则为正值,此时,北太平洋的气压场整体增强。波浪第一模态空间分布的主要特征是在北太平洋中纬度区域有一个明显的负值变异中心(图 15a),由图 15b 可以看出,波浪的负值时间系数主要出现在 1998、2001、2003 和 2010 年,正值时间系数出现在 1994、2002、2009 年。

北太平洋 SLP 第二模态的空间分布(图 16a)与第一模态不同,其空间结构呈现南北反相位变化,以 40°N 纬线作为分界,正值变异区分布在此线南,负值变异区分布在此线以北,中心位置在阿留申群岛附近。从时间系数(图 16b)可以看到,负值主要出现在 1997、2003、2009、2011 年,此时北太平洋正负值变异中心的气压差变小,而在 1999 和 2008 则为正值,此时,南北变异中心气压差增大。与第一模态的时间系数相比,SLP 第二模态时间系数的变化较平缓。图 17a 给出了波浪第二模态的空间分布,波浪的空间变化也呈现出南北“正-负”的 2 级结构,其正负值变异区与 SLP 第二模态空间分布的位置相同,相位相反。波浪较明显的负震荡主要出现在 1997、2003、2011 年,而在 1999 和 2008 年则为较明显的正震荡(图 17b)。SLP 和波浪第二主模态的变化是一种偶极子形态,2 个变异中心分别对应着阿留申低压区(北)和夏威夷高压区(南),从二者时间系数的变化看,波浪和 SLP 震荡较强的年份出现在 1997、1999、2003、2008、2011 年(以图 16b、17b 的小黑框标示)。

综上所述,北大西洋和北太平洋波浪距平场变化的主要空间形态及时间系数与 SLP 的变化相近,特别是波浪变化较剧烈的年份(1996、2001、2010(北大西洋),1998、2003、2010(北太平洋))。由此可以定性地看出,大气环流场的异常震荡可能是引起波浪长期变化的重要原因。

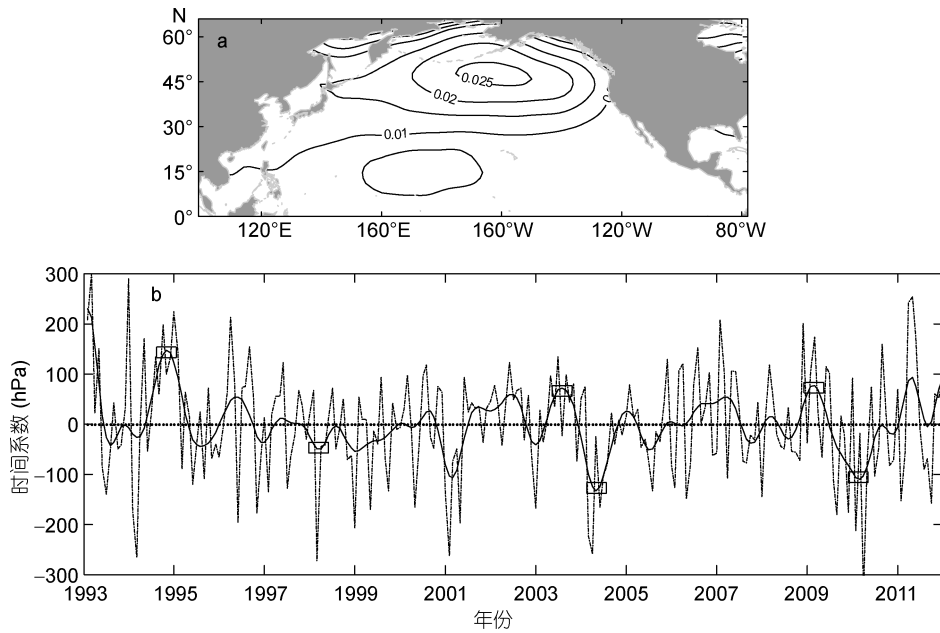


图 14 SLP 第一模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig. 14 Spatial distribution of the first mode (a) and the time factor (b) for the SLP in North Pacific

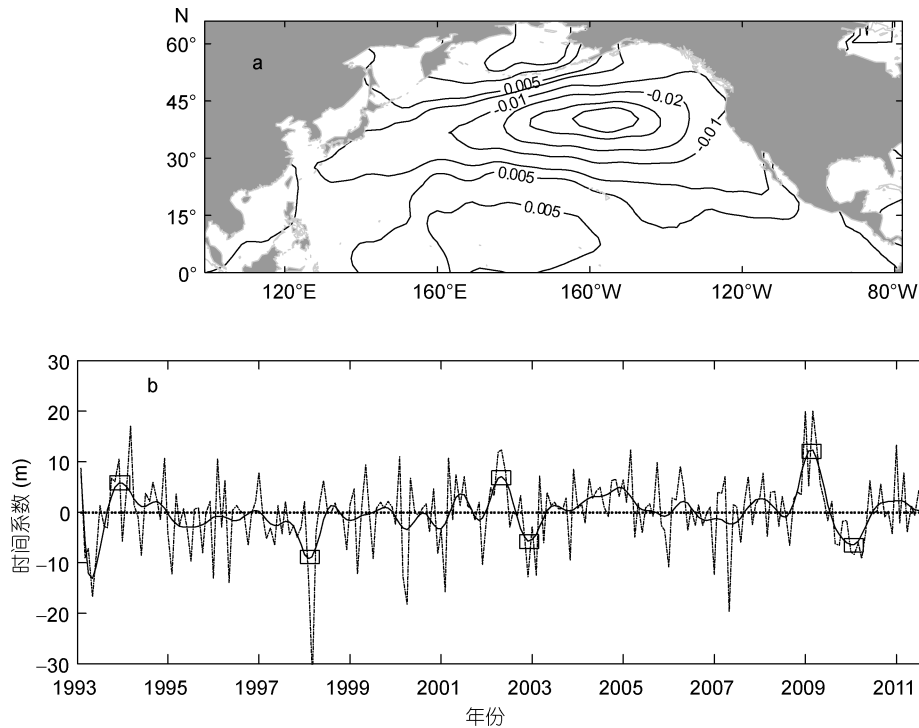


图 15 波浪第一模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig. 15 Spatial distribution of the first mode (a) and the time factor (b) for the wave in North Pacific

3 结果与讨论

本文利用高质量的卫星高度计数据直接统计了波浪的变化趋势,并由波浪的变化追根溯源到风场的变化,进一步研究了大尺度背景场-SLP 的变化,通过 PCA 得到了 SLP 和波浪主要变化信息的空间形

态,从而揭示它们之间的相关关系。基于 7 套卫星高度计数据分析了北大西洋和北太平洋波浪在过去 19a(1993—2011 年)的变化趋势,利用 NCEP/NCAR 月平均风场和 SLP 的再分析资料,统计比较了波浪、风速、SLP 的变化关系。并进一步利用 PCA 方法,分析比较波浪和 SLP 的主要变化模态及时间系数,从而

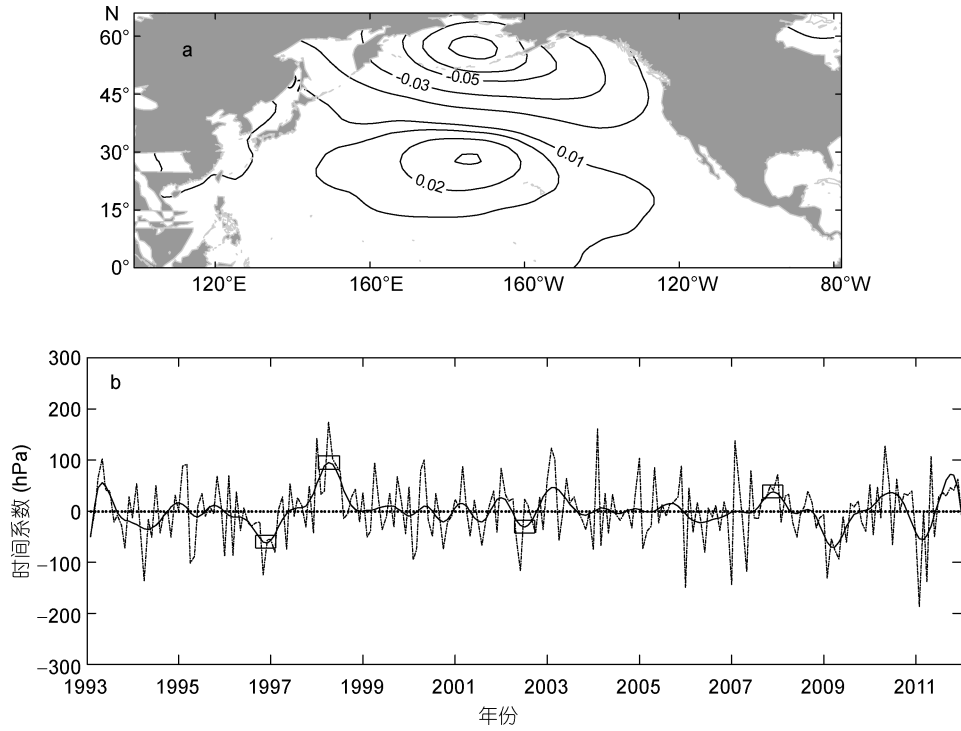


图 16 SLP 第二模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.16 Spatial distribution of the second mode (a) and the time factor (b) for the SLP in North Pacific

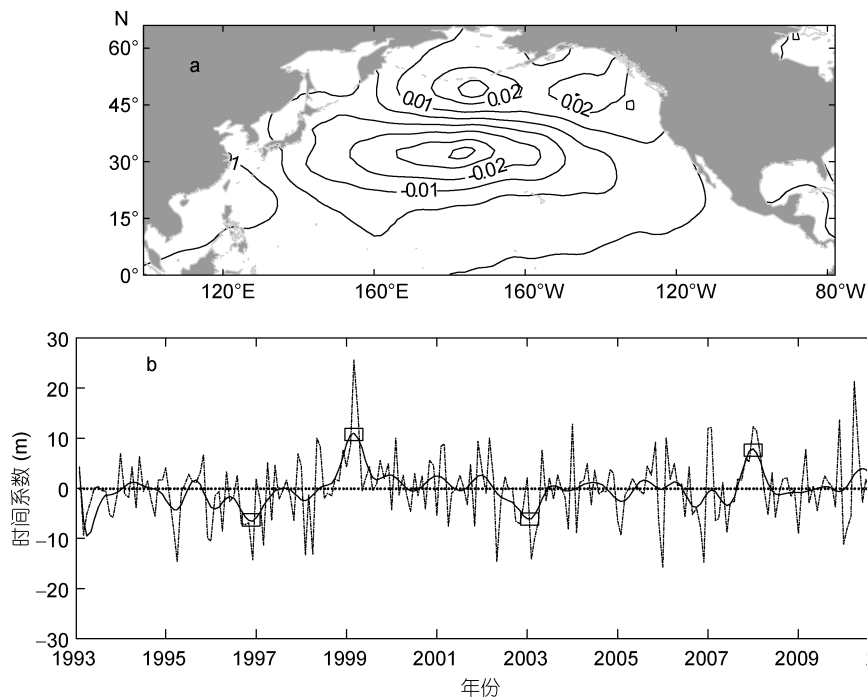


图 17 波浪第二模态的空间分布(a)及对应的时间系数(b)

Fig.17 Spatial distribution of the second mode (a) and the time factor (b) for the wave in North Pacific

得到了波浪变化与大气环流变化相关关系的清晰图像。

通过资料分析可以得到北大西洋和北太平洋波浪变化的如下特征:

1) 波浪的增大趋势主要分布在北大西洋的西南

区域, 自 1993 年以来, 约以 0.03m/a 的比例增加, 与此增大趋势伴随的减小趋势主要位于法韦尔角和比斯开湾连线东北部的北大西洋区域, 递减率为 0.01m/a。这种相反的变化趋势是一种偶极子的形态。

北太平洋波浪变化的最显著特征是中纬度带的明显减小趋势, 递减率约为 0.01m/a, 波浪在北太平洋东北和西南方向的小区域呈增大趋势, 在过去 19a 约增大了 0.4m(递减率为 0.02m/a)。

2) 通过统计比较波浪、风场及 SLP 的变化特征得出: 与风速变化的空间分布相比, SLP 变化趋势的等值线更平滑并且与波浪大尺度变化的空间形态更相近, 相位相反, 大气压的增强趋势对应着波浪的递减, 大气压的变弱趋势对应着波浪的递增。

3) PCA 方法揭示了 1993—2011 年北大西洋波浪的变化与北大西洋涛动有密切的联系, 具体地说: 波浪在北大西洋西南区域的增强和东北区域的减弱与 SLP 时间系数的减小趋势有关, 此时, 亚述尔高压和冰岛低压减弱, 2 个气压变异中心的气压差较小。北太平洋波浪变化的主要模态呈现整体同相位变化(第一模态)和南北反相位变化(第二模态), 时间系数震荡较剧烈的几个年份主要分布 1994、1998、2002、2009 年(第一模态)和 1997、1999、2003、2008 年(第二模态), 波浪的这种大尺度变化与 SLP 距平场的大尺度震荡特征十分吻合, 由此可以定性地看出, 大气环流场的异常震荡可能是引起波浪长期变化的重要原因。

参 考 文 献

- 李训强, 郑崇伟, 苏勤等, 2012. 1988—2009 年中国海波候、风候统计分析. 中国海洋大学学报, 42(9): 1—9
- 郑崇伟, 李训强, 潘静, 2012a. 近 45 年南海-北印度洋波浪能资源评估. 海洋科学, 36(6): 101—104
- 郑崇伟, 林刚, 孙岩等, 2012b. 近 45 年太平洋海浪特征分析. 热带海洋学报, 31(6): 6—12
- 黄勇, 2008. 东中国海波候对局地气候变化的响应研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文
- Allan J, Komar P, 2000. Are ocean wave heights increasing in the eastern North Pacific? *Eos Transactions American Geophysical Union*, 81: 561—567
- Bacon S, Carter D J T, 1991. Wave climate changes in the North Atlantic and North Sea. *International Journal of Climatology*, 11(5): 545—558
- Bouws E, Jannink D, Komen G J, 1996. The increasing wave height in the North Atlantic Ocean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(10): 2275—2277
- Günther H, Rosenthal W, Stawarz M *et al*, 1997. The wave climate of the Northeast Atlantic over the period 1955—1994: The WASA wave hindcast. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 6: 121—163
- Guillaume D, Xavier B, Rui T, 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31(3—4): 120—131
- Kushnir Y, Cardone V J, Greenwood J G, 1997. The recent increase in North Atlantic wave heights. *Journal of Climate*, 10: 2107—2113
- Seymour R J, 2011. Evidence for Changes to the Northeast Pacific Wave Climate. *Journal of Coastal Research*, 27 (1): 194—201
- The WASA Group, 1998. Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5): 741—760
- Woolf D K, Challenor P G, Cotton P D, 2002. Variability and predictability of the North Atlantic wave climate. *Journal Of Geophysical Research*, 107(10): 3145—3159

CHANGE OF WAVE AND ITS POSSIBLE CAUSES IN NORTH ATLANTIC AND NORTH PACIFIC DURING 1993—2011

SHI Yong-Fang¹, YANG Yong-Zeng², WU Ke-Jian¹, YIN Xun-Qiang²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract We studied the trends of significant wave height in 1993—2011 in the North Atlantic and North Pacific based on seven sets of satellite altimeter data, and analyzed the spatial variability of wind and SLP (surface level pressure), using monthly mean data provided by NCEP/NCAR. Furthermore, the link between wave and SLP is determined by PCA (principal component analysis). The results show that overall pattern of SWH (significant wave height) in North Atlantic is dipole-shaped. The increasing trend in SWH is in the southwestern North Atlantic and the decreasing trend in SWH in the northeastern Atlantic. In North Pacific, the wave variability features a significant decreasing trend in mid-latitudes. The spatial pattern of wave variability is very similar to the SLP's. The principal space and time modes of wave are consistent with the oscillation of the SLP anomaly field. The changes of large-scale background field-SLP play an important role in long-term change of wave.

Key words Trends of wave; SLP (Surface Level Pressure); PCA (principal component analysis); the North Atlantic; the North Pacific