

# 太平洋海浪场时空特征分析

李靖<sup>1,2</sup>, 周林<sup>1,2</sup>, 郑崇伟<sup>1,3</sup>, 韩晓伟<sup>1,4</sup>, 陈晓斌<sup>1,2</sup>

(1. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 全军海洋水文环境数值模拟研究中心, 江苏 南京 211101; 3. 92538 部队气象台, 辽宁 大连 116041; 4. 92858 部队水文气象中心, 浙江 宁波 315812)

**摘要:** 为了深入了解太平洋海浪场特别是涌浪场的时空分布特征, 利用 44 a(1958~2001 年)ERA-40 海浪再分析资料对南、北太平洋风浪和涌浪的波高和波向进行了统计分析, 结果表明: 北太平洋海浪场比南太平洋具有更明显的季节变化特征, 四季中南太平洋涌浪均有明显的越赤道北传过程。南、北半球西风带海浪波高随时间呈线性增长趋势, 且涌浪分别存在 2.4~3.7 a 和 2.9 a 左右的显著周期, 风浪和混合浪波高存在 6.5 a 和 5.2 a 的共同周期。

**关键词:** 太平洋; 风浪; 涌浪; 季节变化

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)06-0094-07

海浪是海洋表面最基本的现象之一, 构成了海洋表面的小尺度几何形态。太平洋是地球上四大洋中面积最大、深度最深的一个大洋, 深入研究其海浪的空间分布特征和时间变化规律, 对于太平洋海域海气相互作用和海上航运、石油开采及其他海上各种活动有重要的意义和应用前景<sup>[1]</sup>。

林琿等<sup>[2]</sup>利用 TOPEX 卫星高度计资料, Chelton<sup>[3]</sup>和 Sandwell<sup>[4]</sup>利用 Seasat 和 GEOS 高度计资料分析了全球海面风速和有效波高的季节变化特征, Chen<sup>[5]</sup>通过定义风浪和涌浪指数, 研究了全球海洋的主要风浪和涌浪分布区。Semedo 等<sup>[6]</sup>利用 ERA-40 资料分析了全球风浪和涌浪的年际变化。韩树宗等<sup>[7-8]</sup>使用 75 个月高度计资料通过波高分分析强调了大西洋涌浪的重要性, 并指出太平洋波高与风速分布特征具有良好关系。孙群等<sup>[9]</sup>利用 TOPEX 卫星高度计资料分析了东中国海的风浪场特征。但由于卫星高度计资料长度有限且风浪和涌浪尚未分开, 无法对风浪和涌浪分别进行研究, 其结论成果具有一定的局域性。本文采用风浪和涌浪时间序列较长的分离资料重点对太平洋风浪和涌浪的时空特征进行分析研究。

## 1 资料及方法

本文采用的数据为 1958~2001 年的 ERA-40 海浪资料 (ECMWF40 year re-analysis data), 其范围覆盖

全球海域, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。ERA-40 海浪再分析资料是全球第一份耦合海浪(WAM)和大气环流模式模拟结果并同化观测资料得到的再分析产品。在 WAM 模式<sup>[6]</sup>中, 其通过能量平衡方程获得能谱  $F(f, \theta)$ , 其中  $f$  为频率,  $\theta$  为波向,  $H_s = 4.04\sqrt{m_0}$ ,  $m_n$  为海浪谱  $n$  阶矩, 
$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^n F(f, \theta) df d\theta$$
。谱方向  $\theta_m = a \tan(S_F / C_F)$ , 其中  $S_F = \iint \sin(\theta) F(f, \theta) df d\theta$ ,  $C_F = \iint \cos(\theta) F(f, \theta) df d\theta$ , 通过分离一维谱即可得到风浪和涌浪的有效波高和平均波向。

与浮标观测资料相比, ERA-40 再分析海浪资料的有效波高普遍存在低的波高被高估, 高的波高被低估现象<sup>[10-12]</sup>。Caires 等<sup>[13]</sup>按照同化资料不同所带来的误差特征将其分为 4 个不同时期: 无同化资料(1957 年 9 月~1991 年 12 月, 1993 年 6 月~12 月)、同化 Faulty ERS-1 FDP(fast-delivery product)波高资料(1991 年 12 月~1993 年 5 月)、同化 Uncalibrated ERS-1 FDP 波高资料(1994 年 1 月~1996 年 5 月)及同化 ERS-2 FPD 资料(1996 年~2002 年 8 月)。但由于

收稿日期: 2010-09-28; 修回日期: 2012-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41106014)

作者简介: 李靖(1986-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: canshang200503@yahoo.com.cn; 周林(1963-), 通信作者, 电话: 025-80831621, E-mail: zhou\_lin4458@163.com

目前缺乏大量波浪谱的浮标观测资料,要获取海域长期风浪和涌浪的资料,ERA-40 海浪再分析资料的风浪和涌浪资料目前仍是唯一的选择<sup>[14]</sup>。

本文选取的太平洋海域为 90°S~90°N, 99°E~60°W, 对南北太平洋海浪的年变化和季节变化进行了统计分析,并计算了南北半球西风带下海浪波高的年际变化及其线性趋势,后采用功率谱对其波高进行了周期估计。

## 2 南北太平洋海浪波高年变化规律

由于南北太平洋海陆分布的差异,对海浪波高有较大影响,因此本文对南北太平洋分别进行研究。通过对南太平洋(-90°S~0°S, 99°E~300°W)和北太平洋(0°N~90°N, 99°E~300°W)的风浪(由当地风引起且直到观测时仍处于风力作用下的海面波浪)、涌浪(风浪离开风的作用区域后,在风力甚小或无风水域中依靠惯性维持的波浪统称为涌浪)和混合浪(不同来源的波系叠加的现象)波高进行多年区域月平均后绘制成图 1,其中距平为原变量减去其在某一时期内的均值。

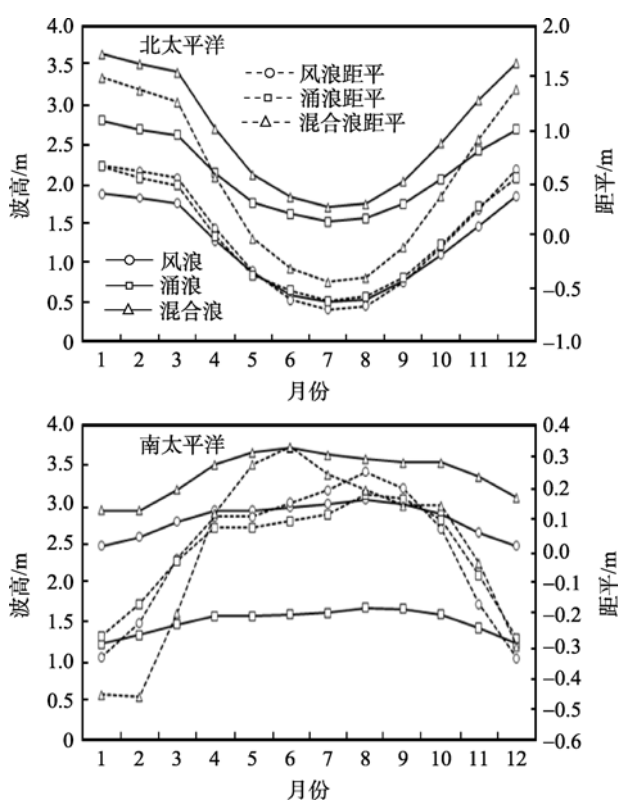


图 1 太平洋风浪、涌浪和混合浪波高年变化

Fig. 1 Variations of monthly mean wave heights of wind sea, swell and overall waves in the Pacific Ocean

可以看出,整个太平洋海域涌浪波高均大于风浪波高,涌浪在混合浪中占主要地位。南太平洋海浪终年波高变化不明显(变化幅度最大为 0.5 m),风浪、涌浪和混合浪均在 6~8 月(南半球冬季)达到最大值。北太平洋 1~7 月风浪、涌浪和混合浪波高逐渐减小,7~12 月波高逐渐增大(变化幅度最大为 1.4 m),北太平洋波高随时间呈现周期性的变化规律明显,最大值出现在北半球的冬季,夏季最小。

从距平来看,南、北太平洋风浪和涌浪波高变化趋势均近似一致。但混合浪波高变化幅度较大,南太平洋在 6 月份波高可增长 0.3 m,1 月份减少最明显,达 0.5 m。北太平洋 1 月份波高可突增 1.4 m,7 月份最大降幅为 0.5 m。可见北半球受陆地、季风等影响,波高年变化明显,而南半球海域较广,常年受西风带控制,近海面风速可较好维持,波高年变化不明显。

## 3 南北太平洋海浪波高季节变化规律

### 3.1 风浪的季节变化

从图 2 可以看出,春季(3~5 月),北太平洋风浪波高大值中心位于阿留申群岛附近达 1.4 m,夏威夷岛附近为中心超过 1 m 的高值中心。南太平洋西风带可达 2 m,赤道地区最小,不足 0.4 m。夏季(6~8 月),北太平洋整个区域偏小,最大值位于夏威夷岛附近达 0.8 m,南太平洋稍有减弱,小于 2 m。秋季(9~11 月),阿留申群岛风浪波高开始增长,波高中心达 1.4 m。受南太平洋西风带影响,南半球西风带风浪波高可达 2 m 以上。冬季(12~2 月),北太平洋风浪波高达到最大值,阿留申群岛附近达 2 m,南太平洋西风带明显减小,不足 1.6 m,这与刘金芳等<sup>[15]</sup>得到的北太平洋冬季平均浪高 1.0~2.0 m 结论一致。总体来看,受西风带影响明显,北半球春冬季,北太平洋中高纬的中太平洋海域风浪波高为极大值区,南太平洋中高纬海域一年四季均为大值区。四季中,赤道北侧中太平洋(夏威夷群岛附近)均存在一个强度约为 1 m 的风浪相对大值区。

### 3.2 涌浪的季节变化

由图 3 可以看出,春季,南半球整个西风带涌浪波高达 3 m 以上,赤道附近为 2 m 左右,由赤道向北递增至北太平洋阿留申群岛附近可达 2.4 m,西太平洋海域小于 1.5 m。夏季,北太平洋阿留申群岛高值中心消失,波高均小于 2 m,南太平洋波高有所加强,

波高均在 2 m 以上, 其中, 澳大利亚西南侧波高可达 3.5 m 以上。秋季, 南半球西风带有所减弱, 北太平洋阿留申群岛附近出现 2.4 m 波高中心。冬季, 南半球西风带涌浪波高降至 2.7 m 以下, 北太平洋阿留申

群岛附近波高超过 3 m, 而西太平洋海域波高仍小于 1.8 m。四季中, 赤道中太平洋海域涌浪明显越赤道北传, 向北分为两支, 一支向东流向东太平洋, 一支向西流回新几内亚岛。

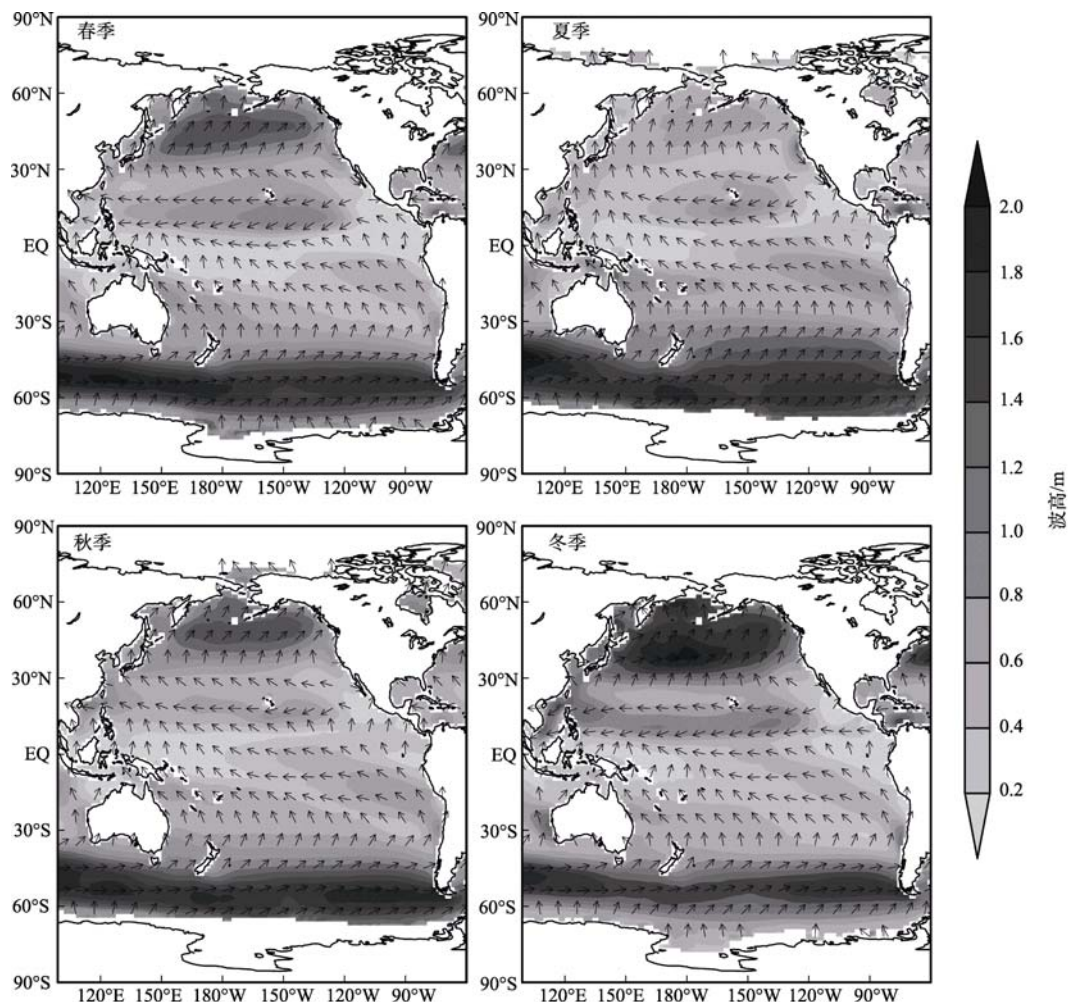


图 2 太平洋风浪波高和波向的多年平均

Fig. 2 Season averages for the wind sea significant wave heights and wave directions in the Pacific Ocean

整体上, 北半球冬春季, 与风浪不同, 北太平洋中高纬度的东北太平洋涌浪波高存在一个极大值区, 可达 3 m, 且冬季最强, 夏季最弱。南太平洋中高纬度地区四季均为涌浪波高的大值区, 可达 3.5 m, 赤道地区常年均小于 2.1 m, 与邓冰等结论相一致。四季中, 赤道 160°W 以东涌浪均为由南向北传播且强度较强, 可传至北太平洋中纬度海域, 甚至到达中高纬度, 与此海域风浪由东向西传明显不一致。邓冰等<sup>[16]</sup>曾指出在南太平洋, 夏季西风带位置为全年最南, 偏西向浪出现在 40°S 以南, 冬季偏西向浪北抬至全年最北, 可达 30°S。这种 S~N 走向摆动可能与南半球涌浪的北传有一定关系, 还需进一步研究。

### 3.3 混合浪的季节变化

由图 4 可以看出, 太平洋混合浪波高的空间分布变化规律整体呈现为南北强中间弱的特征, 其中夏季(北半球)为北弱南强。四季中, 40°S 以南的海域混合浪波高均达 3 m 以上, 赤道附近最小, 均在 2.5 m 以下, 赤道地区常年始终保持为低值海况, 与赤道附近为全球的无风带有密切关系。从赤道往中高纬方向, 受西风带影响明显, 波高逐渐增大至南北纬 50°附近海域达到最大值。北半球高纬洋面多为反气旋, 南半球高纬地区因同纬度多为海洋, 波高变化较为平直。

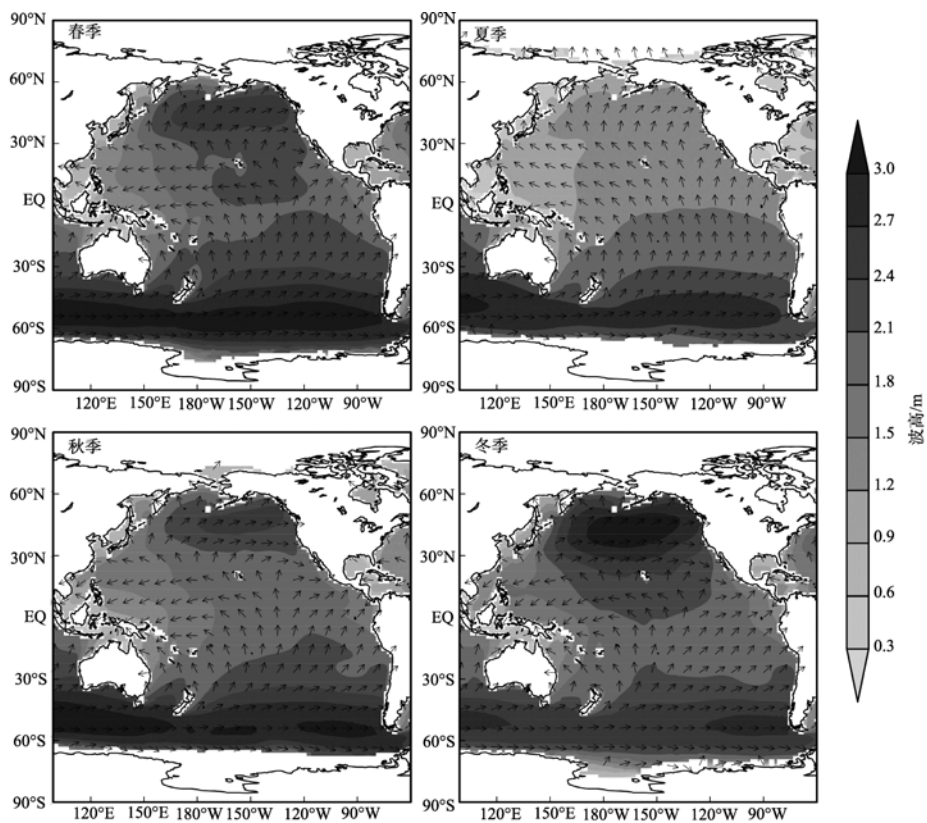


图 3 太平洋涌浪波高和波向的多年平均

Fig. 3 Season averages for the swell significant wave heights and wave directions in the Pacific Ocean

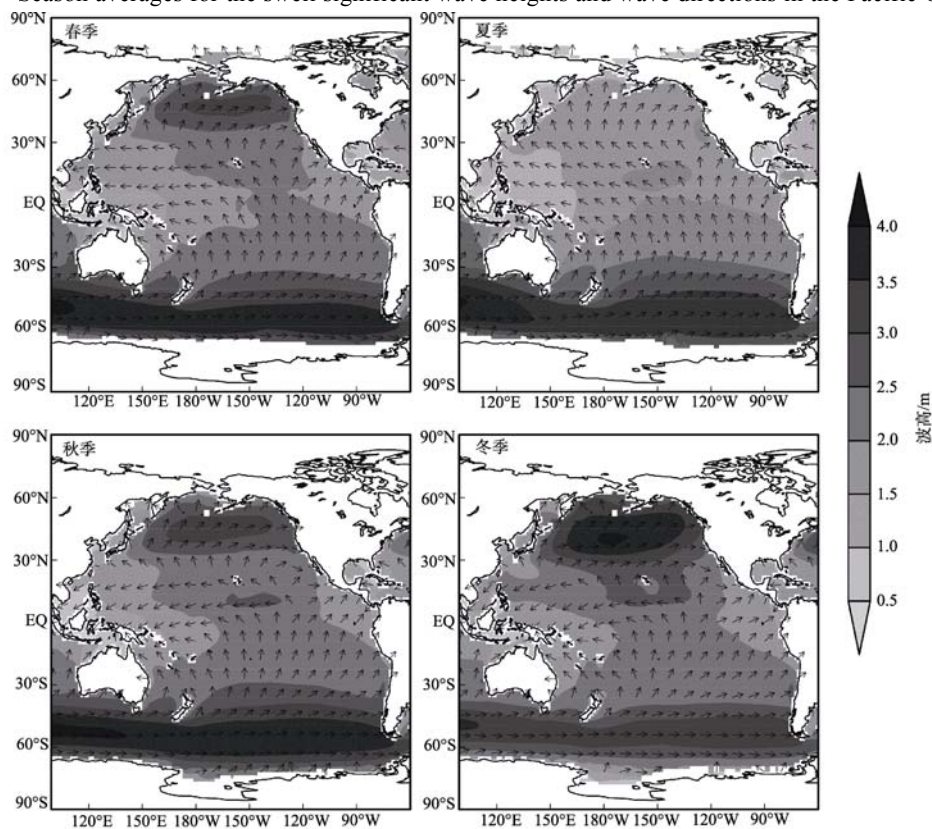


图 4 太平洋混合浪波高和波向的多年平均

Fig. 4 Season averages for the overall significant wave heights and wave directions in the Pacific Ocean



#### 4 南北半球西风带下海浪波高年际变化及线性趋势

近年来,一些研究者认为全球平均近海面风速没有明显的变化趋势<sup>[17]</sup>,热带北大西洋<sup>[18]</sup>和北太平洋高纬度海区风速呈增加趋势<sup>[19]</sup>,而赤道、南大西洋热带和北太平洋亚热带呈减小趋势<sup>[17]</sup>。对于北太平洋高纬度至亚热带的中间海域,近海面风速变化规律尚不清楚,海浪波高与近海面风速有密切关系,其变化趋势应一致。四季中风浪和涌浪的大值区多出现在南北半球西风带中,海浪变化特征也最为明显,因此了解西风带海浪变化规律有重要意义。

这里北半球西风带取为 30°N~60°N, 160°E~120°W, 南半球西风带为 40°S~60°S, 100°E~60°W。图 5 分别给出了南北半球西风带下风浪、涌浪和混合浪的波高变化及线性趋势,可以看出,南

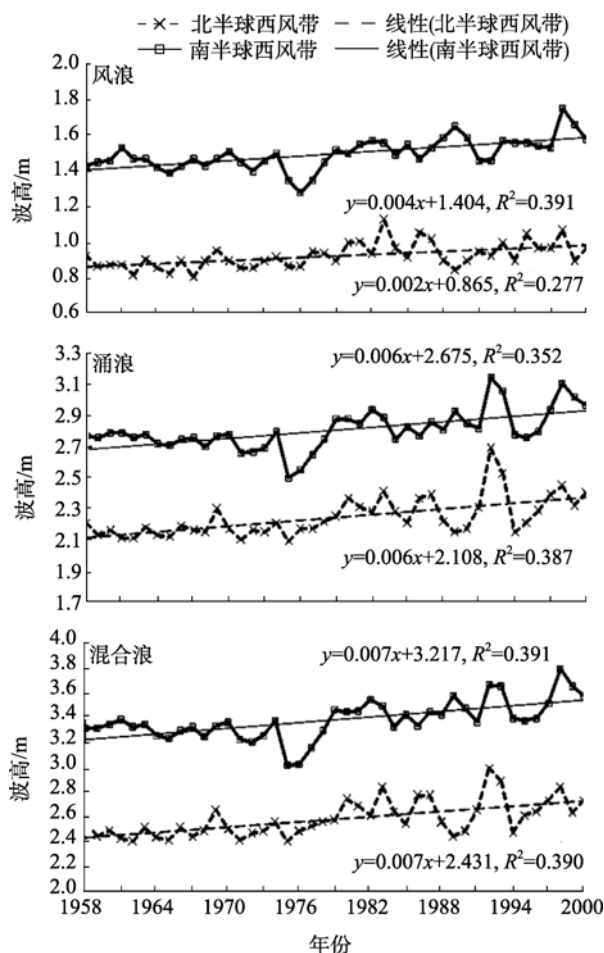


图 5 南、北半球西风带下波高变化及线性趋势

Fig. 5 Variation of wave heights and trend lines of linear regression between the westerlies of the southern and northern hemispheres

风带风浪、涌浪和混合浪均比北半球大,这与其很少受陆地阻挡有关,但南北半球不论风浪、涌浪还是混合浪其整体波动变化近乎一致,且都为增长趋势,均通过了 95%的信度检验,有可能反映高纬至亚热带海域的近海风速也应为增加趋势。

#### 5 南北半球西风带下海浪波高功率谱分析

功率谱分析可将时间序列的总能量分解到不同频率的分量,根据不同频率的方差贡献诊断出序列的主要周期,从而确定周期的主要频率,即序列隐含的显著周期。图 6 中通过对波高年平均功率谱进行计算,将功率谱估计和标准谱绘成曲线图(若功率谱估计曲线的峰点超过标准谱,则说明峰点所对应的周期是显著的),得到了南、北半球西风带下涌浪波高分别存在 2.4~3.7 a 和 2.9 a 左右的显著周期;南、北太平洋西风带风浪和混合浪波高存在 6.5 a 和 5.2 a 的共同周期(见表 1),这与韩树宗等<sup>[7]</sup>曾得到太平洋混合浪波高变化的显著周期为 5.2 a 相一致。此外,南、北半球混合浪波高还存在 2.2~2.4 a 左右的另一显著周期。

表 1 南北半球西风带海浪波高变化周期

Tab. 1 Period of significant wave heights between the westerlies of the southern and northern hemispheres

海浪	周期(a)			
	南半球西风带		北半球西风带	
	第一周期	第二周期	第一周期	第二周期
风浪	6.5	2.9	5.2	—
涌浪	2.4	3.7	2.9	—
混合浪	6.5	2.4	5.2	2.2

#### 6 结论

(1)北太平洋较南太平洋风浪、涌浪具有更明显的年变化和季节变化特征,其波高随时间呈现周期性的变化规律,最大值出现在北半球的冬季,夏季最小。

(2)整体上,南太平洋风浪和涌浪均强于北太平洋,涌浪在混合浪中占主要地位。太平洋风浪、涌浪和混合浪波高受西风带影响明显,波高呈现南北高纬海域强、赤道弱的空间分布特征。北半球冬春季,风浪在中太平洋有明显的大值中心,而涌浪波高极大值区位于东北太平洋海域。四季中,赤道北侧

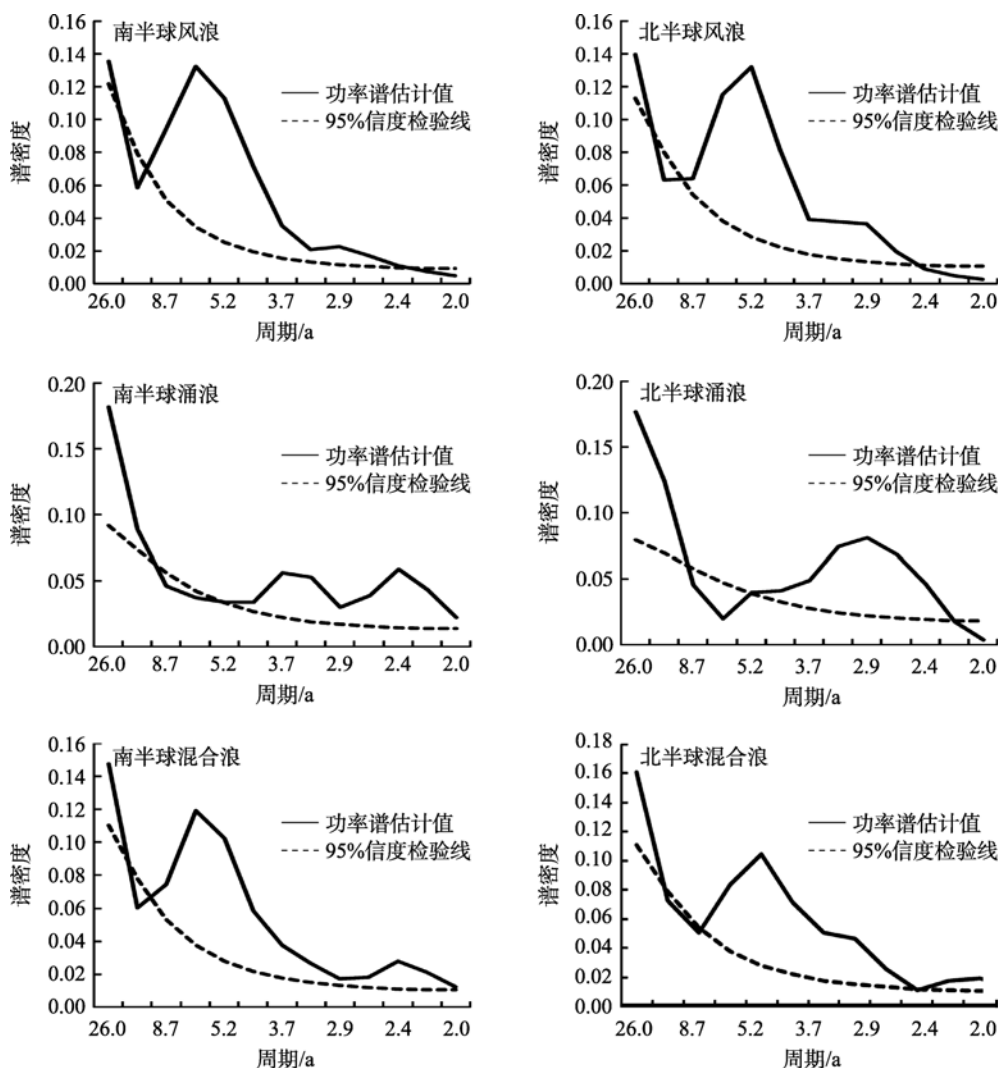


图 6 南、北半球西风带下波高年平均谱分析

Fig. 6 The power spectrum analysis of region annual mean significant wave heights between the westerlies of the southern and northern hemispheres

中太平洋(夏威夷群岛)都存在一个波高约为 1 m 的风浪相对大值区,赤道 160°W 以东涌浪均为由南向北传播且强度较强,可传至北太平洋中纬度海域,甚至到达中高纬度,与此海域风浪由东向西传明显不一致。

(3)南、北半球西风带下的风浪、涌浪和混合浪波高波动变化一致,且均为线性增长。南、北太平洋西风带下的涌浪波高分别存在 2.4~3.7 a 和 2.9 a 左右的显著周期,风浪和混合浪存在 6.5 a 和 5.2 a 的共同周期。此外,南北半球混合浪波高还存在 2.2~2.4 a 左右的另一显著周期。

参考文献:

[1] 郭佩芳, 孙孚. 海浪波高场熵及其在西北太平洋的年内变化[J]. 海洋学报, 1996, 18(6): 18-25.

[2] 林琿, 陈戈. 利用 TOPEX 卫星高度计观测全球海面风速和有效波高的季节变化[J]. 科学通报, 2002, 45(4): 411-415.

[3] Chelton D B, Hussey K J, Parke M E. Global satellite measurement of water vapour, wind speed and wave height [J]. Nature, 1981, 294: 529-532.

[4] Sandwell D T, Agreen R W. Seasonal variation in wind speed and sea state from global satellite measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(C2): 2041-2051.

[5] Chen Ge. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19: 1849-1855.

- [6] Alvaro S, Kay S A R, Andreas S. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(5): 1461-1479.
- [7] 韩树宗, 朱大勇, 郭佩芳, 等. 太平洋波高分布及变化规律研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(6): 825-832.
- [8] 韩树宗, 郭佩芳, 赵喜喜, 等. 大西洋波高成份研究[J]. *海洋科学*, 2003, 27(12): 50-54.
- [9] 孙群, 宋金宝, 陈小刚. 利用 TOPEX 卫星高度计资料分析东中国海的风、浪场特征[J]. *海洋科学*, 2006, 30(4): 10-15.
- [10] Caires S, Sterl A. A new nonparameteric method to correct model data: Application to significant wave height from the ERA-40 Re-Analysis [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22: 443-459.
- [11] Gulev S K, Zolina O, Grigotieva S. Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L24302, doi:10.1029/2004GL021040.
- [12] Sterl A, Caires S. Climatology, variability and extrema of ocean waves—The Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas[J]. *Journal of Climate*, 2005, 25: 963-977.
- [13] Caires S, Sterl A. On the estimation of return values of significant wave height data from the reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [C]//Bedford T, van Gelde P. *Safety and Reliability*. Netherlands: Swets & Zeitlinger, 2003: 353-361.
- [14] Caires S, Sterl A. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2003, 108, 3098, doi: 10.1029/2002JC001491.
- [15] 邓冰, 刘金芳, 刘春笑, 等. 南太平洋海浪特点的统计分析[J]. *海洋通报*, 2002, 21(5): 1-9.
- [16] 刘金芳, 江伟, 俞慕耕, 等. 北太平洋海浪场时空变化特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(3): 64-69.
- [17] Ward M N, Hoskins B. Near surface wind over the global ocean 1949-1988[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 1877-1895.
- [18] Gulev S K, Hasse L. Changes of wind waves in the north Atlantic over the last 30 years [J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19: 1091-1117.
- [19] Gower J F R. Temperature, wind and wave climatologies and trends from marine meteorological buoys in the northeast pacific [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 3709-3718.

## Spatial-temporal variation analysis of sea wave field in the Pacific Ocean

LI Jing<sup>1,2</sup>, ZHOU Lin<sup>1,2</sup>, ZHENG Chong-wei<sup>1,3</sup>, HAN Xiao-wei<sup>1,4</sup>, CHEN Xiao-bin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Meteorology, University of Science and Technology of the People's Liberation Army, Nanjing 211101, China; 2. The People's Liberation Army for Ocean Environment and Numerical Modeling Research Center, Nanjing 211101, China; 3. 12 Unit, NO. 92538 Army of People's Liberation Army, Dalian 116041, China; 4. The hydro meteorological Center of troop 92858 Army of People's Liberation Army, Ningbo 315812, China)

**Received:** Sep., 28, 2010

**Key words:** the Pacific Ocean; wind sea; swell; seasonal variation

**Abstract:** The seasonal characteristics of wave field in the Pacific Ocean from the year 1958 to 2001 were analyzed with ERA-40 wave data obtained from ECMWF. The seasonal variations of significant wave height and wave direction in the north Pacific Ocean were more salient than those in the south Pacific Ocean. The wave height grew linearly with trend line of linear regression between the westerlies of the southern and northern hemispheres. According to the spectral analysis of swell and the overall significant wave height in the Pacific Ocean, the northern and southern hemispheres changed periodically and had equal cycle lengths. The cycle lengths were about 6.5 years and 5.2 years, about 2.4~3.7 years and 2.9 years (wind sea) in the southern and northern hemispheres, respectively.

(本文编辑: 刘珊珊)