

庄晓宵, 林一骅. 2014. 全球海洋海浪要素季节变化研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 251–260, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13109. Zhuang Xiaoxiao, Lin Yihua. 2014. Seasonal variation of global ocean wave [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 251–260.

全球海洋海浪要素季节变化研究

庄晓宵^{1,2} 林一骅¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 本文使用欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium Range Weather Forecasting, ECMWF) 近 30 年 (1982~2011 年) 全球再分析资料 (ECMWF 40 Year Re-analysis Interim) 中的风场及海浪场资料, 对全球海表 10 m 风场、有效波高、平均周期和平均波向进行了统计分析, 并定义了一种计算季节变率的方法。研究发现, 有效波高和平均周期均存在明显的季节变化, 且北半球大洋比南半球大洋季节变化更为明显, 印度季风区则例外。另外尝试用波龄揭示风浪、涌浪的分布特征, 证实了全球海洋为涌浪占主导及大洋东部存在涌浪强化, 同时发现了涌浪的分布在春夏季变化明显的特征。

关键词 全球海洋 风场 海浪场 季节变化 季节变率

文章编号 1006-9895(2014)02-0251-10

中图分类号 P731.22

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13109

Seasonal Variation of Global Ocean Wave

ZHUANG Xiaoxiao^{1,2} and LIN Yihua¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract In this study, we used the latest 30 years of wind and global wave field datasets of the European Center for Medium Range Weather Forecasting Reanalysis Interim (ERA-Interim) recorded from 1982 to 2011 to conduct statistical analyses of a 10-m wind field, significant wave height, mean wave period, and mean wave direction. Furthermore, we defined a method for calculating their seasonal variabilities. We determined that the significant wave height and mean wave period both have obvious seasonal variation and that the Northern Hemisphere ocean wave has greater variability than that of the Southern Hemisphere except for the Indian monsoon region. We then used wave age to determine the distribution of the wind sea and swell. The results indicate that the swell strengthened in the eastern part of the ocean and was dominant of the swell in the whole ocean. At last, we found obvious change in the distribution of swell in spring and summer.

Keywords Global ocean, Wind field, Wave field, Seasonal variation, Seasonal variability

1 引言

海洋是气候系统中的重要和关键的一个环节,

其对全球的气候变化具有深刻影响。海气界面作为海洋与大气相互作用发生的场所, 在海气相互作用过程中扮演了十分重要的角色, 海气间的物质和能

收稿日期 2013-01-09, 2013-04-17 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175058

作者简介 庄晓宵, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气边界层和大洋环流数值模拟研究。E-mail: henry_zhuang@hotmail.com

通讯作者 林一骅, E-mail: linyh@lasg.iap.ac.cn

量交换就是在该界面进行和完成。气象学家和海洋学家对此进行了大量研究，并取得不少进展。但由于海气界面物理、化学过程的复杂性，仍有许多基本问题尚未解决，其中海浪的气候学问题由于资料的缺乏，长期以来一直缺乏全面和整体的认识。在海洋表层，海浪的各种要素，包括有效波高、平均周期和平均波向，以及海洋表面的 10 m 风速，都会对海气间的相互作用产生重要的影响。此外海表反照率也会随海浪状况的改变而变化，所有这些因素及其长期变化都有可能影响气候系统的状态及其变化。另外，海浪的气候状况的变化对海上航运、石油开采及其他各种海上活动也存在重要影响。因此，研究全球海洋海浪的时空分布等气候特征具有重要理论意义和实用价值。

由于海浪处于海气相互作用的交界处，其发生发展的能量主要来自于海表风场，而风场的主要特征是季节变化特征显著，因此海浪的季节变化特征也应该如此。对于海浪要素的季节变化特征的研究近年来也有不少，Semedo et al. (2011) 利用 1957~2002 年共 45 年的 ERA-40 (European Center for Medium Range Weather Forecasting 40 Year Reanalysis) 海浪再分析资料，研究了全球风浪和涌浪的气候态特征。他们通过统计分析发现，无论是在南半球还是北半球，混合浪的有效波高均是赤道外地区大于赤道地区，并且都在各自半球的冬季达到最大，经过分离后得到的风浪和涌浪也同样如此。除此之外，Semedo et al. (2011) 还发现全球海洋主要由涌浪占主导。张婕 (2010) 也曾利用 1958~2001 年共 44 年的 ERA-40 海浪资料研究过全球海浪的分布特征，其主要结论为全球风速和有效浪高的最大值位于南大洋，并且这两个变量均是在北半球冬季时北半球高纬才会大于南半球高纬，其他季节则均为南半球较大。刘金芳等 (2002) 利用 1950~1995 年共 46 年的船舶气象报资料分析了北太平洋海浪场的时空变化特征，发现北太平洋海浪场的季节变化最为显著，并且冬季时海浪场为全年最大，夏季最小。李靖等 (2012) 利用 1958~2001 年共 44 年的 ERA-40 海浪场资料对南北太平洋的有效波高和海浪方向进行了统计分析，发现北半球季节变化大于南半球。可见海浪要素的季节变化特征的确显著，但以上研究只是定性的得到南北半球的季节变化特征，不能对不同区域的季节变化强弱进行比较。本文则定义了海浪要素季节变率的计算方法，

在一定程度上能够定量的表达海浪要素季节变化的强弱。另外，过去的研究所使用的资料主要分为两类：一类是基于海洋浮标、沿海和海岛的观测站以及走航的船舶，这类资料时空分布不连续，对于全球海洋海浪状况研究的代表性较差；另一类是基于 ERA-40 的海浪再分析资料，这套资料空间分辨率较低，而且在 1991 年 12 月至 1993 年 5 月这段时间内存在卫星遥感资料的错误，因此也不能很好的代表全球海洋海浪的状况。因此本文选用了最新的分辨率较高的海浪再分析资料，试图使研究的结果更加准确及可信。

2 资料及方法介绍

本文选用欧洲中尺度天气预报中心 (European Center for Medium Range Weather Forecasting, ECMWF) 最新研发的大气和海洋全球再分析数据集 ERA-Interim (Full Resolution 版本) 中的风场和混合浪海浪场数据。ERA-Interim 数据的时间长度为 1979 年至最近，且一直在更新中，其格点数据提供了大量的 3 小时地表参数，描述了海表和陆表的状况。ERA-Interim (Full Resolution 版本) 中的数据比早期的 ERA-40 数据空间分辨率更高，除了含有和 ERA-40 一样的 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ (国内不提供下载) 和 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 两种分辨率之外，还包括 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 、 $2^\circ \times 2^\circ$ 和 $3^\circ \times 3^\circ$ 在内的共七种空间分辨率。本研究提取了其中空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，时间分辨率为逐月平均的海表面 10 m 风场以及逐日 4 个时次的混合浪海浪场数据，并将海浪场数据处理成逐月平均的形式，其中具体的变量包括海表海表面 10 m 风速 (U_{10}) 和风向 (φ)、混合浪有效波高 (H_s) 和波向 (θ) 及混合浪平均周期 (T_m)。本研究的时间范围为 1982~2011 年。

ERA-Interim 再分析资料是继其早期产品 ERA-15 和 ERA-40 之后的新产品，其使用最新的四维变分同化技术，同化了大量的卫星高度计、浮标等观测数据以及海浪模式数据，作用在于提供 ECMWF 早期产品和新一代产品 ERA-70 之间的衔接，目的是对 ERA-40 和更早的数据进行完善，从而逐渐取代 ERA-40。ERA-Interim 作为 ECMWF 最新开发的同化数据集，从理论上来说应该比之前的 ERA-15 和 ERA-40 更加精确。Mooney et al. (2011) 发现 ERA-Interim 模拟的爱尔兰冬季气温与实际观

测气温之间的相关系数更高,且比 ERA-40 和 NNRP-1 模拟的结果稍好。Mooney et al. (2011) 认为 ERA-Interim 在重建气候观测的统计特征方面的表现比 ERA-40 和 NNRP-1 更加优异。ECMWF 的 Dee et al. (2011) 也曾验证过 ERA-Interim 数据的优越性。Dee et al. (2011) 指出早期的 ERA-40 再分析资料在同化过程中遇到了一些和卫星数据的使用有关的问题,而 ERA-Interim 在这些问题的解决上则取得了很好的进展。此外,Dee et al. (2011) 还指出近年来 ECMWF 在模式开发和数据同化方面取得了比较出色的成绩,ERA-Interim 在很多方面的表现都超出了预期值。综上所述,本文有理由相信选取的数据是可靠的,得到的结果也是值得相信的。

3 全球风场及海浪场季节特征

将上述月平均风场及海浪场格点资料分别处理成季节平均的资料,此处记 12 月至 2 月 (DJF) 为冬季,3 月至 5 月 (MAM) 为春季,6 月至 8 月 (JJA) 为夏季,9 月至 11 月 (SON) 为秋季。

3.1 全球海表 10 m 风速大小及风向分布

图 1 为全球 30 年平均的海表 10 m 风速及风向分布,从图中可见,南大洋风速整体大于北大洋,赤道外海区风速大于赤道附近海区,其中全球风速最大值位于南非至澳大利亚间的南极绕极流 (Antarctic Circumpolar Current) 处,风速大小为 $12\sim13 \text{ m s}^{-1}$,北大洋洋风速最大值位于北大西洋 60°N 附近,风速大小为 $10\sim11 \text{ m s}^{-1}$,北太平洋大致相同的纬度也有一个风速的大值区,但较北大西洋略小。全球风速的最小值则出现于赤道附近的陆地沿岸,最小风速为 $3\sim4 \text{ m s}^{-1}$ 。

图 2 为全球季节平均的海表 10 m 风速及风向分布从图中可见,在春季、夏季和秋季,全球风速的最大值出现在南大洋 ACC 处,呈现明显的南强北弱分布,但不同的是,冬季北太平洋和北大西洋都出现了风速的极大值,大小和南大洋相当,甚至北大西洋风速比南大洋还偏大。与 30 年平均的风速分布相似,赤道外海区风速大于赤道附近海区,全球风速的最小值出现于赤道附近的陆地沿岸。此外,图 2 还明显显示,北大洋洋的风速季节变化大于南大洋,北大洋洋在冬季风速达到最大,然后逐渐减小,在夏季达到最小,随后又逐渐增大;南大洋风速在南半球的冬季达到最大,在南半球的夏季则为最小,但是变化的幅度不如北半球大,原因可能是

南大洋海洋面积宽阔,而北半球陆地面积大,且分布杂乱,风速受到较大的影响。值得注意的是阿拉伯海地区,由于夏季季风的盛行,导致冬季风速小夏季风速大。

3.2 有效波高和平均波向分布

图 3 为全球 30 年平均的混合浪有效波高及波向分布,从图中可见,与风速分布相似,有效波高大体上也呈现南强北弱的态势。其中全球有效波高最大值出现于南非至澳大利亚之间的 ACC 处,有效波高大小为 $4.4\sim4.8 \text{ m}$,北半球的最大值出现在 60°N 附近的北大西洋和北太平洋,且北大西洋略大于北太平洋,有效波高大小为 $3.2\sim3.6 \text{ m}$,不仅如此,北大西洋最大值范围较大,位置也偏北。全球有效波高的最小值主要出现在印尼、马来西亚、澳大利亚北部、地中海、墨西哥湾等陆地沿岸海域,有效波高大小为 $0.8\sim1.2 \text{ m}$ 。波向方面,30 年平均的波向大体上与 30 年平均的风向较为一致。

图 4 为全球季节平均的混合浪有效波高及波向分布,从图中可见,季节平均的有效波高的分布和季节平均的风速的分布类似,波高的最大值出现在南大洋 ACC 处。除了冬季外,该海域均为波高的最大值之所在,冬季北大西洋和北太平洋的波高则比南大洋大。此外,北大洋洋有效波高的季节变化大于南半球大洋,北大洋洋在冬季有效波高达到最大,然后逐渐减小,在夏季达到最小,随后又逐渐增大;南大洋有效波高在南半球的冬季达到最大,在南半球的夏季则为最小,但是变化的幅度仍不如北半球大,这与风速的情况相似。值得注意的是,在阿拉伯海,有效波高冬季小夏季大,这和北半球整体趋势相反,可能因为阿拉伯海地区夏季季风强,而波高受风速影响较大的缘故。波向方面,季节平均的波向大体上与季节平均的风向较为一致。结合上文全球的情况及有效浪高与风速分布的相似性,这说明了有效波高场受风场影响巨大。

由以上分析可见,有效波高存在明显的季节变化特征,尤其是冬季与夏季之间存在巨大差异,而春秋两季则与 30 年平均的情况相似。为了更好的描述海浪场的季节变化特征,特别是冬夏季节间的差异,本文借鉴并改进了曾庆存和张邦林 (1998) 研究大气环流季节变化的成果,引入一种描述季节变化的方法。记冬夏间季节变率为 δ ,则:

$$\delta = \frac{F_w - F_s}{F_m}, \quad (1)$$

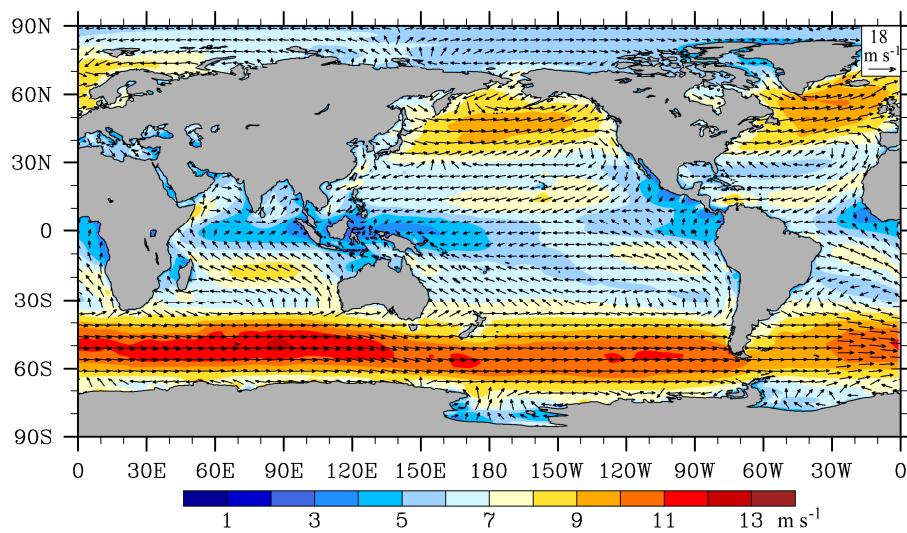


图 1 30 年平均的全球海表 10 m 风速 U_{10} (m s^{-1}) 和风向 φ 分布, 其中阴影部分代表海表 10 m 风速值大小, 箭头长度代表该处海表 10 m 风速的大小, 箭头方向代表该处海表 10 m 风向

Fig. 1 30-year mean 10-m wind speed U_{10} (m s^{-1}) and wind direction φ , the shaded region represents the wind speed, the arrows are scaled with the background fields and the arrow direction represents the wind direction there

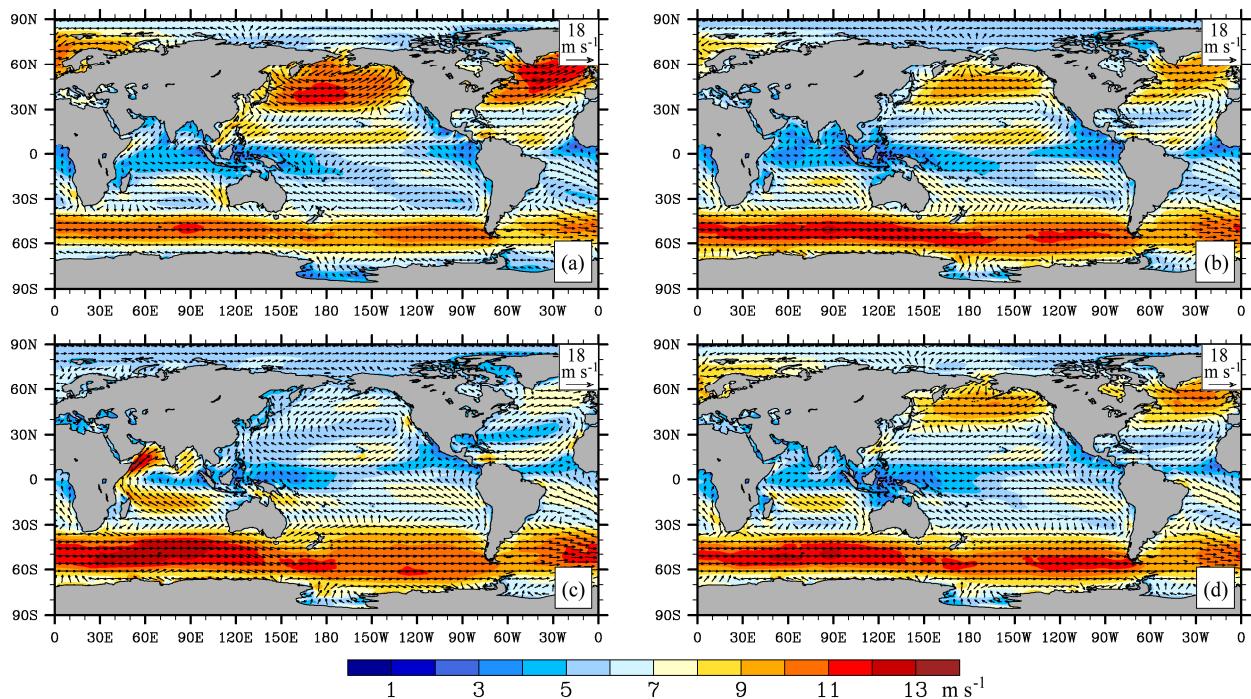


图 2 (a) 冬季、(b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季季节平均的全球海表 10 m 风速 U_{10} (m s^{-1}) 和风向 φ 分布, 其中阴影部分、箭头长度及方向含义与图 1 相同

Fig. 2 Seasonal averages of 10-m wind speed U_{10} (m s^{-1}) and wind directions φ for (a) DJF (Dec–Jan–Feb), (b) MAM (Mar–Apr–May), (c) JJA (Jun–Jul–Aug), (d) SON (Sep–Oct–Nov). The shaded region and arrows represent the same as Fig. 1

其中 F_w' 为冬季平均的海浪要素值, F_s' 为夏季平均的海浪要素值, F_m 为 30 年平均的海浪要素值, δ' 反映的是海浪要素的季节变率。季节变率亦可用 F_w' 及 F_s' 扣除年平均之后的距平值来定义, 即令:

$$F_w' = F_w - F_m, \quad (2)$$

$$F_s' = F_s - F_m, \quad (3)$$

于是有:

$$\delta' = \frac{F_w' - F_s'}{F_m}, \quad (4)$$

由于 F_w' 与 F_s' 中的 F_m 相互抵消, 使得 δ' 与 δ 相等。

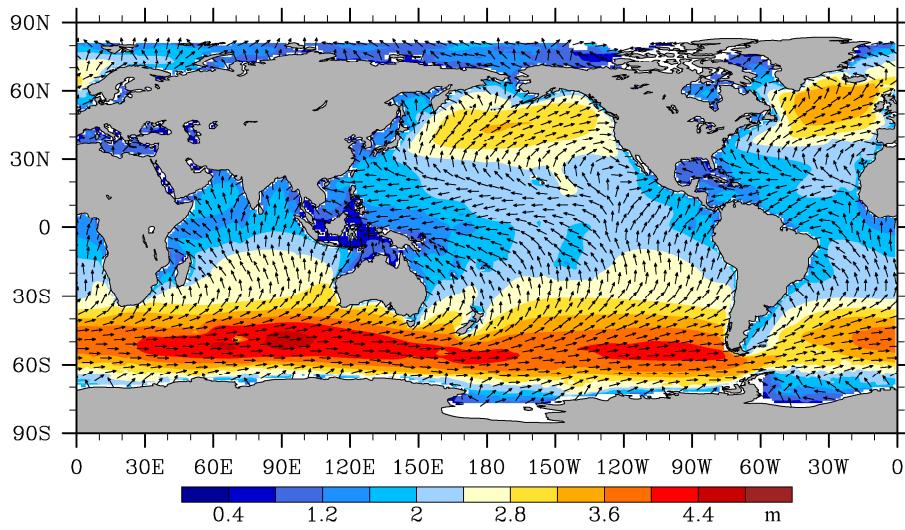


图 3 30 年平均的全球混合浪有效波高 H_s (m) 和波向 θ 分布, 其中阴影部分代表有效波高大小, 箭头方向代表该处 30 年平均波向, 但其长度不代表任何含义

Fig. 3 30-year mean significant wave height H_s (m) and wave direction θ , the shaded region represents the significant wave height, the arrow direction represents the 30-year mean wave direction, but its length is meaningless

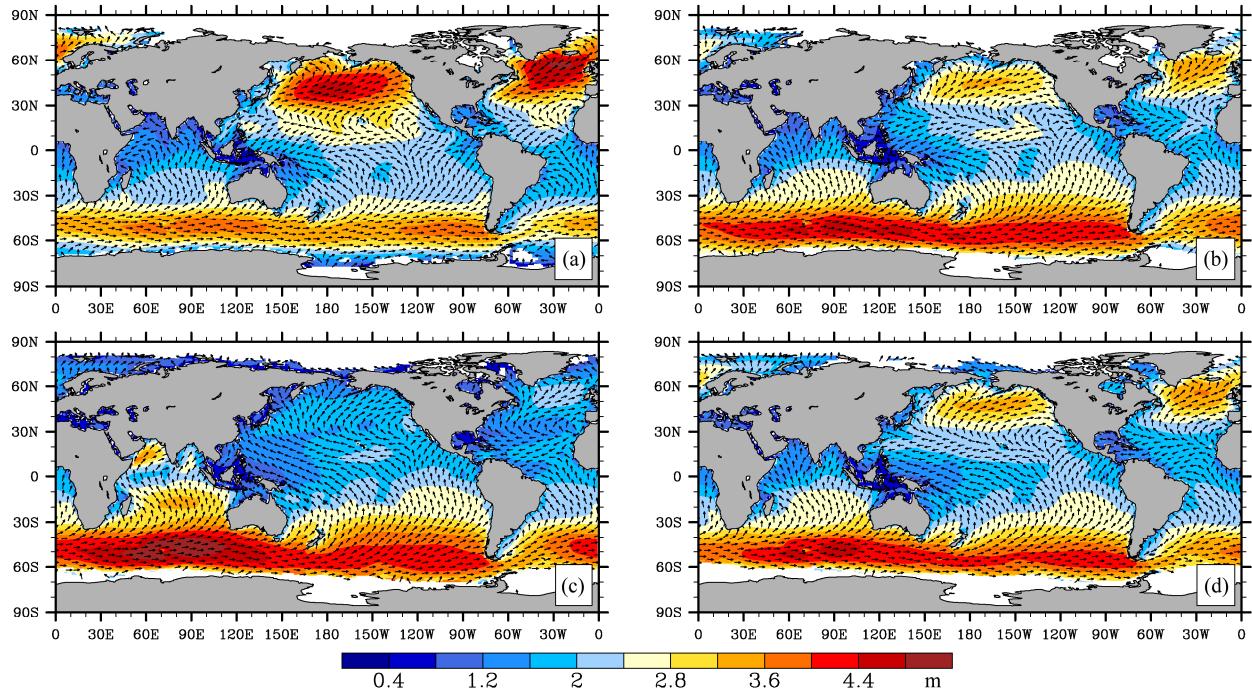


图 4 (a) 冬季、(b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季季节平均的全球混合浪有效波高 H_s (m) 和波向 θ 分布, 其中阴影部分及箭头含义与图 3 相同

Fig. 4 Seasonal averages of significant wave height H_s (m) and wave direction θ for (a) DJF (Dec–Jan–Feb), (b) MAM (Mar–Apr–May), (c) JJA (Jun–Jul–Aug), (d) SON (Sep–Oct–Nov). The shaded region and arrows represent the same as Fig. 3

图 5 反映的是有效波高冬夏间的季节差异, 从图中可见, 北大洋混合浪有效波高的季节变率明显大于南大洋, 而且北大洋基本上为正值区, 即是北大洋在北半球冬季有效波高大于北半球夏季有效波高。有效波高季节变率的几个正值中心分别位于北太平洋、北大西洋、日本海、南海南部以及地中

海地区。但在北半球的印度洋地区, 出现了两个大的负值中心, 分别位于阿拉伯海和孟加拉湾, 且阿拉伯海的季节变率在数值上来说为全球最大, 这可能是与北半球夏季盛行的强大的印度季风有关。此外在东太平洋的墨西哥、巴拿马和哥伦比亚沿岸, 也出现了微弱的负值区。相比之下, 南半球大洋有

效波高的冬夏间差异即季节变率较小，除了赤道中、西太平洋的附近海域出现了小部分正值区，其他广阔的海域基本上为负值区，即南大洋在南半球冬季有效波高大于南半球夏季有效波高，有效波高季节变率的负值中心出现在坦桑尼亚以东、马达加斯加岛以北海域以及班达海、阿拉弗拉海部分海域。值得注意的是，南半球印度洋冬夏差异比较均一且较大，且在30°S至45°S附近的太平洋和大西洋海域，有效波高的冬夏差异比周围海域为大。全球有效波高季节变率在不考虑正负的情况下，在赤道附近的太平洋和大西洋以及南大洋的大部分海域为最小。这可能是由赤道附近常年风速较小，且风速与风向变化均较小，而南大洋面积广阔，受陆

地影响较小，常年风速和风向稳定的原因造成的。

3.3 平均周期分布

从图6可见，整体上南半球大洋的平均周期比北半球大洋大，并且大洋东部平均周期比大洋西部大。平均周期的几个大值中心分别位于墨西哥以西、厄瓜多尔以西、智利以西、印尼以西、澳大利亚以西、以南及西北海域，平均周期大小为10.5~11 s。平均周期最小的区域位于大洋西岸的陆地沿岸，最小平均周期的大小在4 s左右。

从图7可见，春秋两季的平均周期分布和30年平均的平均周期分布相似，这说明相对于年平均状态，春秋两季变化较小，冬夏两季变化较大。其中变化较大的区域分别位于东北太平洋、东北大西

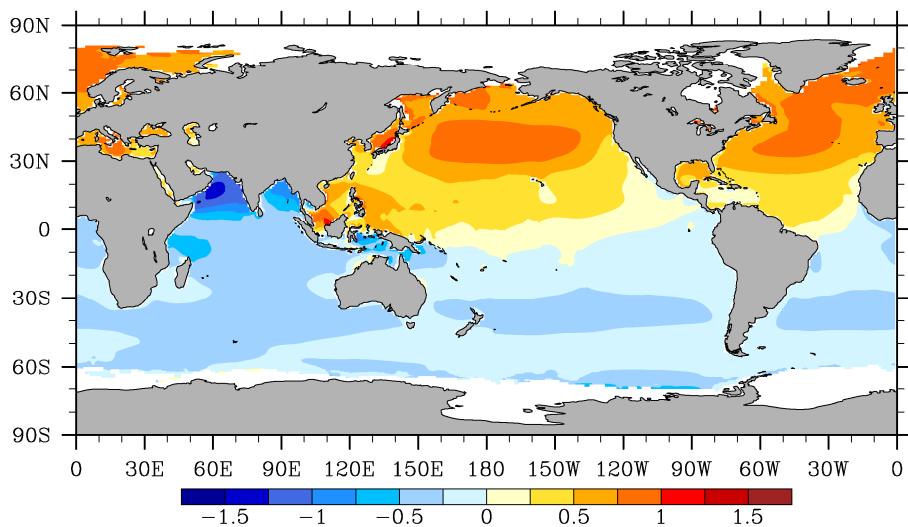


图5 全球混合浪有效波高的季节变率分布（无量纲）

Fig. 5 Seasonal variability (dimensionless) of significant wave height

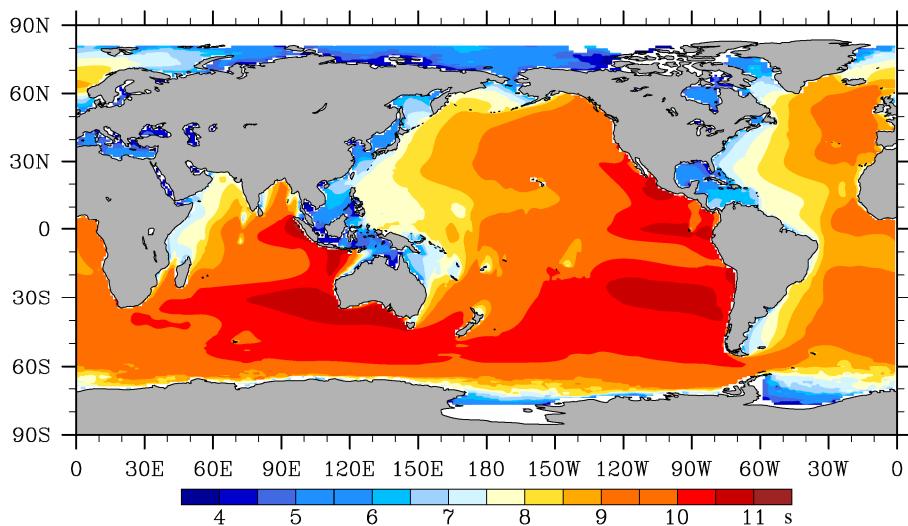


图6 30年平均的全球混合浪平均周期 T_m 分布

Fig. 6 30-year mean wave period T_m

洋以及中东印度洋, 北半球冬季东北太平洋和东北大西洋相对年平均状态周期偏大, 北半球夏季则偏小; 中东印度洋的情况类似, 在南半球冬季时偏大, 南半球夏季则偏小。

为了突出平均周期季节变化最大的区域, 再次使用前述季节变率定义, 计算了全球混合浪平均周期的季节变率, 计算结果由图 8 给出。从图中可见, 北大洋平均周期的季节变率总体上大于南大洋, 其中北半球太平洋和大西洋基本为正值区, 南半球太

平洋和大西洋基本为负值区, 说明北大洋在北半球冬季时周期比夏季大, 而南大洋在南半球冬季时周期比夏季大, 但印度洋的情况比较特殊, 整个大洋基本上为负值区, 这意味着北半球印度洋在北半球冬季时周期比夏季小, 南半球印度洋在南半球冬季时周期比夏季大。日本海、南海南部和印尼附近的马鲁古海以及摩洛哥沿岸为正值中心, 澳大利亚以西沿岸及阿拉伯海地区为负值中心, 但正值中心区的变化仍大于负值中心区。全球平均周期季节变率

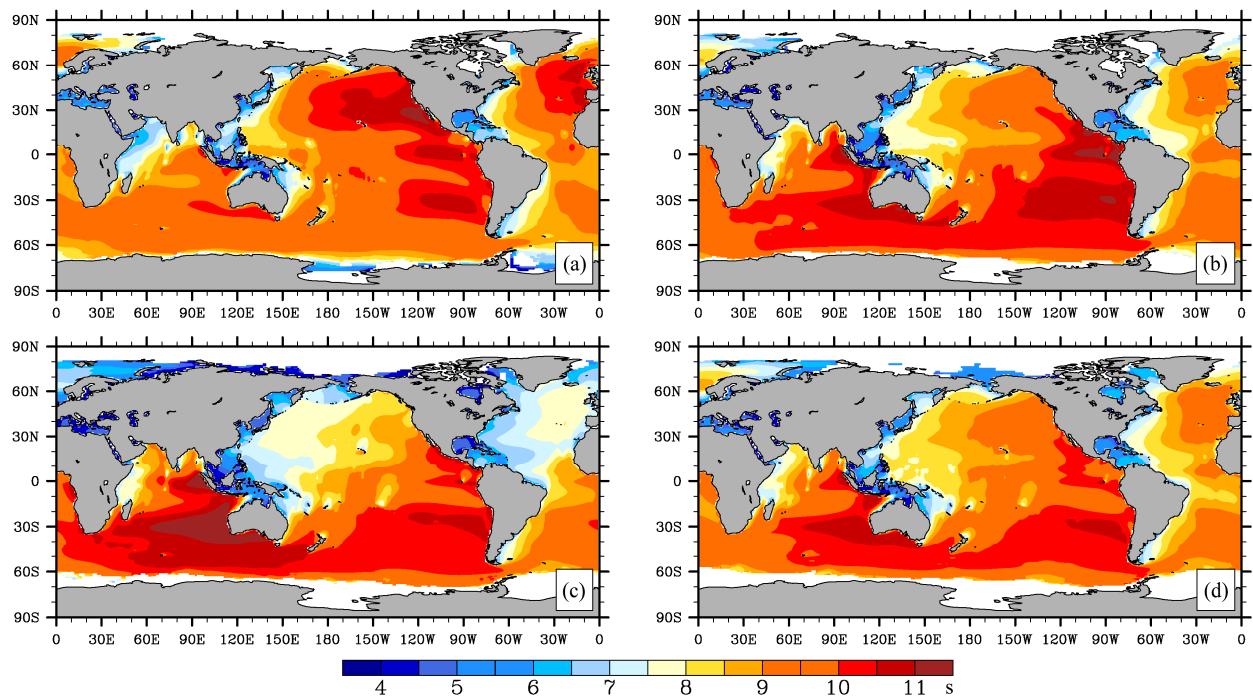


图 7 (a) 冬季、(b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季季节平均的全球混合浪平均周期 T_m 分布

Fig. 7 Seasonal averages of mean wave period T_m for (a) DJF (Dec–Jan–Feb), (b) MAM (Mar–Apr–May), (c) JJA (Jun–Jul–Aug), (d) SON (Sep–Oct–Nov)

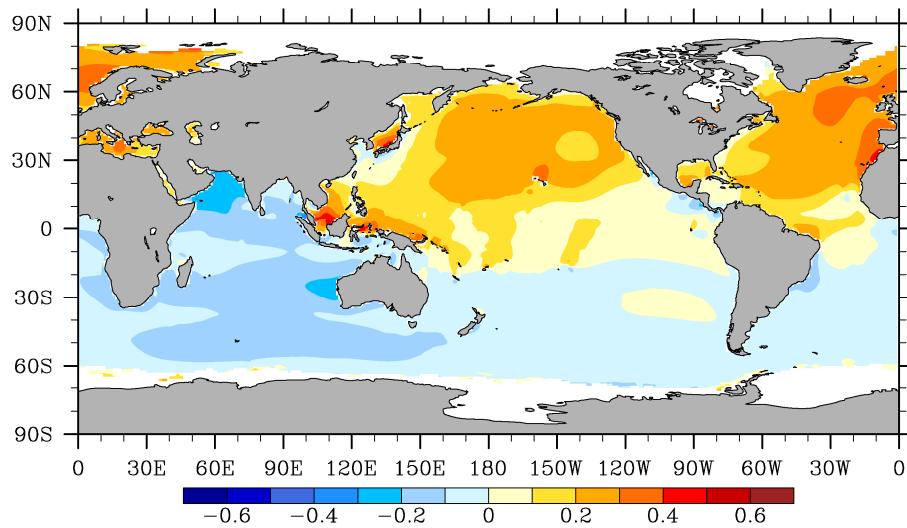


图 8 全球混合浪平均周期的季节变率分布 (无量纲)

Fig. 8 Seasonal variability (dimensionless) of mean wave period

在不考虑正负的情况下，在南半球太平洋和大西洋、中美洲以西沿岸、加勒比海、南海东北部、东海、黄海、日本以东的部分海区、孟加拉湾及赤道附近印度洋海区为最小。

4 全球风浪—涌浪季节变化特征

海浪按成因可以分为风浪、涌浪及混合浪三种。风浪，顾名思义，就是由本地风持续作用而产生的波浪，所谓“无风不起浪”指的就是这个意思。风浪的特征往往波峰尖削，在海面上的分布很不规律，波峰线短，周期小。涌浪则指由海面上其他海区传来的或者本地风力迅速减小、平息，或者风向改变后海面上留下来的波动，也即所谓“无风三尺浪”。涌浪的波面比较平坦，光滑，波峰线长，周期、波长都较大。涌浪一般具有巨大的能量，风浪虽然看似凶猛，但是更具摧毁力的还是看起来温和的涌浪。曾有报道称总有游人在风和日丽的日子突然被兴起的大浪卷入海中遇溺的事故，中国东南沿海部分地区的渔民称之为“疯狗浪”，这种“疯狗浪”即属于涌浪。另外还有报道称千吨货轮被涌浪拦腰折断的事件，可见涌浪能力之巨大。此外，Semedo et al. (2011) 指出，有效波高的变化更多的来自大洋中的涌浪变化。因此，如果能把风浪和涌浪分开，对于实际的生产生活都具有重大的意义。Semedo et al. (2011) 曾明确指出全球海洋主要由涌浪控制。在韩树宗等 (2003) 的研究中，也发现太平洋海域以涌浪为主，大西洋海域常年存在涌浪。另外，Chen et al. (2002) 发现大洋的东边存在涌浪的强化，张婕 (2010) 通过计算波龄对其进行了验证。

文圣常和余宙文 (1984) 曾在其著作《海浪理论与计算原理》中指出，平均波龄 $\bar{\beta}$ 可定义为：

$$\bar{\beta} = \frac{\overline{C_p}}{U_{10}} = \frac{g\overline{T_m}}{2\pi U_{10}}, \quad (5)$$

其中 $\overline{C_p}$ 为平均波相速， U_{10} 为海表 10 米风速， $\overline{T_m}$ 为平均周期， g 为重力加速度。但在张连新 (2011) 的研究中，他指出上式定义的波龄只能代表涌浪状态，随后他给出了其新定义的波龄 β_* 的计算方法，其表达式如下：

$$\beta_* = \frac{C_p}{u_*} = \frac{1}{1.82\pi} \left(\frac{gH_s}{Bu_*^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

其中 β_* 为新波龄， C_p 为波相速， $B=0.062$ 为常数，

u_* 为海表摩擦速度，其与海表 10 m 风速 U_{10} 的换算方法如下：

$$u_*^2 = C_D U_{10}^2, \quad (7)$$

其中 C_D 为风拖曳力系数，本文在计算 C_D 的时候参考了 Wu (1982) 的方法：

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & (U_{10} < 7.5 \text{ m s}^{-1}), \\ (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \geq 7.5 \text{ m s}^{-1}), \end{cases} \quad (8)$$

可以看到，新定义的波龄可以用有效波高和海表 10 m 风速计算得到。张连新 (2011) 认为新波龄不仅能代表涌浪状态，而且可以代表风浪条件，并且其通过 P-M 海浪谱得到当新波龄大于或等于 32 时，海浪为涌浪控制，即完全成长的状态。因此本文采用张连新 (2011) 的新波龄计算方法重新估计了全球混合浪波龄的分布，进而初步判断全球海洋风浪和涌浪分布的状况及其季节变化特征。

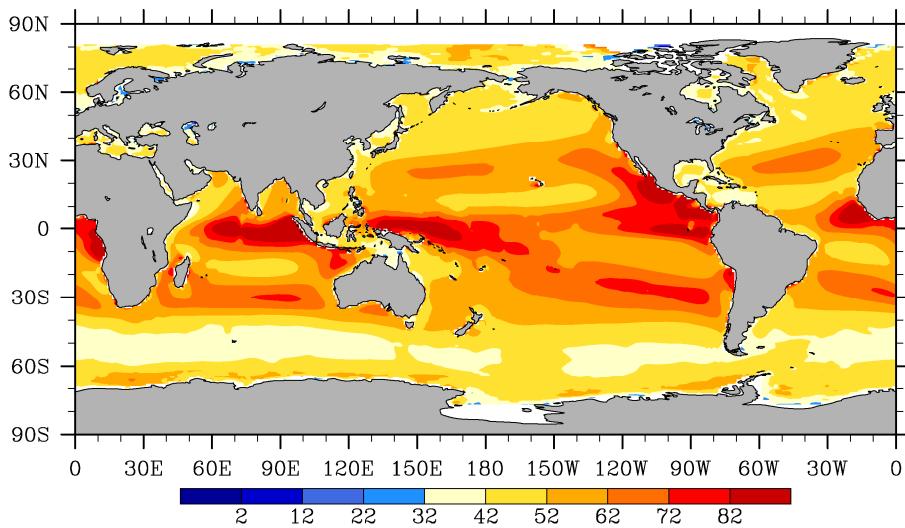
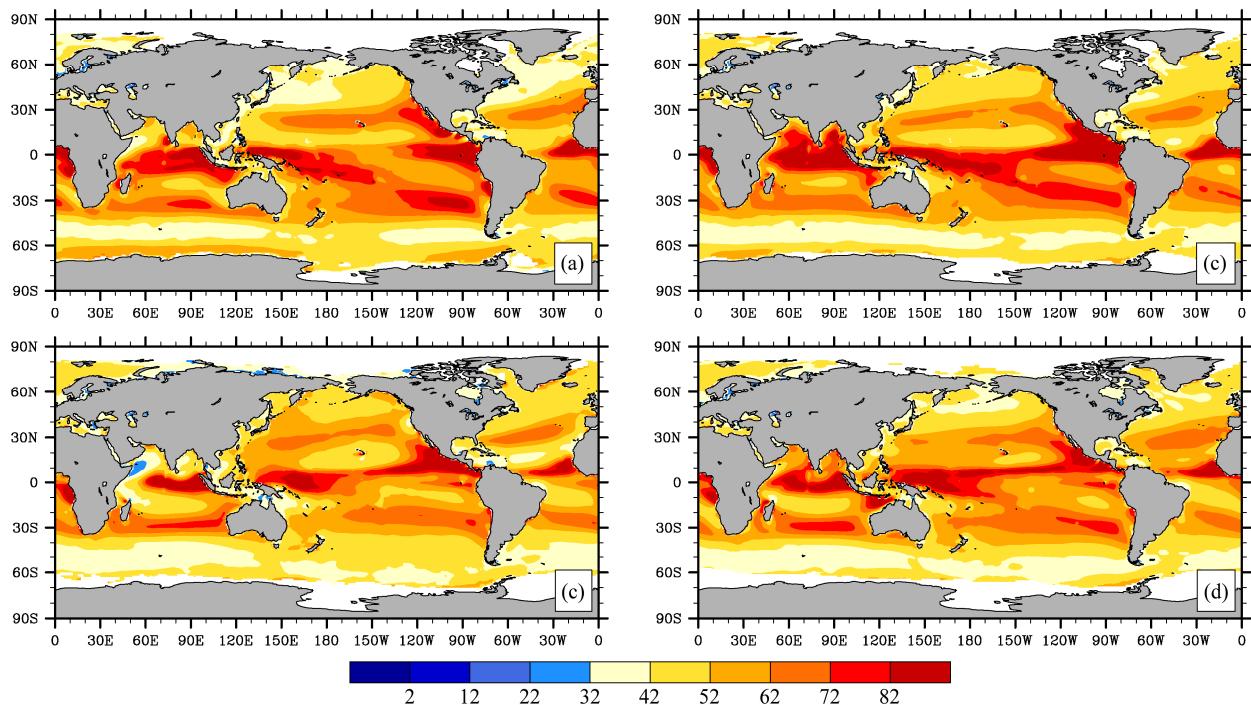
从图 9 中可见，几乎全球海浪的波龄均超过了 32，这说明全球海浪由涌浪占绝对主导，这与 Semedo et al. (2011) 研究的结果相同。全球波龄最大处主要出现在大洋的东岸，该结论与张婕 (2010) 基本一致，这再次证实了 Chen et al. (2002) 的发现，但与张婕 (2010) 不同的是赤道西太平洋波龄也较大，其原因有待进一步的研究。全球波龄最小处主要位于 ACC 处，这可能与此处常年盛行的西风带有关。

从图 10 可见，只在夏季时索马里附近海域出现了小部分波龄小于 32 的海区，其余季节全球海浪的波龄均大于 32，这说明了四季全球海洋均由涌浪主导，但夏季由于强劲的印度季风，使得索马里附近海域出现了一片风浪主导区。值得注意的是，夏季波龄的正值区范围也为全年最小，秋冬两季次之，春季为最大，并且秋冬两季波龄分布与 30 年平均的情况相似。全球波龄变化最大的区域位于印度洋，特别是在春夏两季，这说明相应的涌浪也在这两个季节存在明显的变化。

5 结论

本文使用 ECMWF 近 30 年 ERA-Interim 风场及海浪场再分析资料，分析了全球风场、混合浪有效波高、平均周期以及平均波向的平均态、季节分布和季节变化，主要结论如下：

(1) 无论是 30 年平均还是季节平均，有效波高的分布都与风速的分布较一致，均具有南强北弱

图 9 30 年平均的全球混合浪波龄 β_* (无量纲) 分布Fig. 9 30-year mean wave age β_* (dimensionless)图 10 同图 7, 但为全球混合浪波龄 β_* (无量纲) 分布Fig. 10 Same as Fig. 7, but for mean wave age β_* (dimensionless)

并且赤道外海域大于赤道附近海域的特征, 最大值区域位于南半球大洋南极绕极流即 ACC 海域, 北太平洋和北大西洋地区有效波高及风速在除了北半球夏季之外也较大。

(2) 有效波高和风速的分布具有明显的季节变化, 均为冬季大夏季小(各自半球), 且北半球的季节变率整体比南半球为大, 但印度季风区的阿拉伯海的有效波高和风速则为夏季大冬季小, 并且此

处的有效波高季节变率为全球最大。

(3) 平均周期在大洋东部比西部大, 北半球平均周期季节变率比南半球略大, 且均为冬季大夏季小(各自半球), 阿拉伯海地区的平均周期仍然为夏季大于冬季。全球海浪平均周期季节变率大部分较小, 最大处位于西北太平洋和东北大西洋。

(4) 由波龄的平均分布及季节分布可以证实, 全球大洋基本为涌浪主导, 大洋东部存在涌浪强化

的现象，相比而言，印度洋涌浪季节变化最明显，特别是在春夏两季。

本文仅对全球范围内波候的变化做了初步资料分析工作，但仍然发现了一些波候季节变化的特征，对于造成这种变化的物理机制，目前尚未做深入探讨。另外区分和鉴别风浪和涌浪的方法也过于简单粗糙，需要做进一步的研究和探索。

参考文献 (References)

- Chen G, Chapron B, Ezraty R, et al. 2002. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19 (11): 1849–1859.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (656): 553–597.
- Mooney P A, Mulligan F J, Fealy R. 2011. Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (4): 545–557.
- Semedo A, Sušeljet K, Rutgersson A, et al. 2011. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40 [J]. *J. Climate*, 24 (5): 1461–1479.
- Wu J. 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane [J]. *J. Geophys. Res.*, 87 (C12): 9704–9706.
- 韩树宗, 朱大勇, 郭佩芳. 2003. 太平洋波高分布及变化规律研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 33 (6): 825–832. Han Shuzong, Zhu Dayong, Guo Peifang. 2003. A study of distribution and variation rules of SWH in the Pacific Ocean by using the satellite altimetry data [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 33 (6): 825–832.
- 李靖, 周林, 郑崇伟, 等. 2012. 太平洋海浪场时空特征分析 [J]. 海洋科学, 36 (6): 94–100. Li Jing, Zhou Lin, Zheng Chongwei, et al. 2012. Spatial-temporal variation analysis of sea wave field in the Pacific Ocean [J]. *Marine Sciences* (in Chinese), 36 (6): 94–100.
- 刘金芳, 江伟, 俞慕耕, 等. 2002. 北太平洋海浪场时空变化特征分析 [J]. 热带海洋学报, 21 (3): 64–69. Liu Jinfang, Jiang Wei, Yu Mugeng, et al. 2002. An analysis on annual variation of monthly mean sea wave fields in North Pacific Ocean [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 21 (3): 64–69.
- 文圣常, 余宙文. 1984. 海浪理论与计算原理 [M]. 北京: 科学出版社. Wen Shengchang, Yu Zhouwen. 1984. Theory and computational principle of ocean wave (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 曾庆存, 张邦林. 1998. 大气环流的季节变化和季风 [J]. 大气科学, 22 (6): 805–813. Zeng Qingcun, Zhang Banglin. 1998. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 22 (6): 805–813.
- 张婕. 2010. 风—浪要素的全球分布特征研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Zhang Jie. 2010. Global distribution of wind and wave characteristics [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.
- 张连新. 2011. 风浪条件及飞沫对海气热通量的影响的研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Zhang Lianxin. 2011. Effects of sea spray and wind sea conditions on air-sea heat flux [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.