

## 风对南海波浪的能量输入及其长期变化

崔超然<sup>1,5</sup>, 管玉平<sup>1,5,6</sup>, 朱耀华<sup>2</sup>, 王辉<sup>3</sup>, 黄瑞新<sup>4</sup>

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;
2. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋环境与数值模拟研究室, 山东 青岛 266061;
3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;
4. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA02543, USA;
5. 中国科学院大学, 北京 100049;
6. 珠海区域气候-环境-生态预测预警协同创新中心, 广东 珠海 519078

**摘要:** 利用美国的全球海洋同化资料 SODA(simple ocean data assimilation)2.2.4(1871—2008)中的风应力数据, 估算了风输入给南海波浪的能量。结果表明, 风向南海波浪输入能量的年均值约为 0.2TW, 其空间分布冬季以南海北部为主, 夏季以南部为主且强度比冬季要弱得多; 风对南海波浪能量的输入一直呈减少趋势, 用欧洲中期天气预报中心的再分析资料 ERA-40(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts re-analysis-40)(1957—2002)和 ERA-20C(1900—2010)中的风场和海浪资料得到的趋势也是如此, 1950 年以来每年减少 0.43%。用 ERA-interim(1979—2014)中的有效波高数据可以把风给风浪和涌浪的能量输入区分开, 两者的空间分布皆以南海北部为主, 而给风浪的能量输入在南海南部还有一个高值区。尽管风输入给涌浪的能量略有增加, 但给风浪的能量输入在不断减少, 两者之和仍是减少。究其原因, 控制南海的东亚季风最近几十年一直在减弱。这些结果对认识南海波浪未来的变化及其预报具有意义。

**关键词:** 海浪; 南海; 风能; 东亚季风

中图分类号: P732.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2016)04-0021-10

## Wind energy input and its secular change of surface waves in the South China Sea

CUI Chaoran<sup>1,5</sup>, GUAN Yuping<sup>1,5,6</sup>, ZHU Yaohua<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>3</sup>, HUANG Ruixin<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China;
2. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;
3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China;
4. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA02543, USA;
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
6. Zhuhai Joint Innovative Center for Climate-Environment-Ecosystem, Zhuhai 519078, China

**Abstract:** The energy of winds into surface waves in the South China Sea during 1871–2008 was estimated by using the ocean reanalysis data of SODA (simple ocean data assimilation) 2.2.4 (1871–2008). The results showed that the annual wind energy input is about 0.2 TW, and that the spatial pattern of this kind of input is mainly located in the northern parts of the South China Sea during winter and in the southern parts in summer; and the intensity of summer input is much weaker than that of winter. Similar results were obtained by using the ERA-40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2016-01-20。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金(91228202); 国家重点基础研究发展计划(2013CB956201)

作者简介: 崔超然(1991—), 男, 山东省曹县人, 从事海洋能量研究。E-mail: crcui@sesio.ac.cn

通信作者: 管玉平, 研究员, 主要从事海洋环流与全球变化研究。E-mail: guan@scsio.ac.cn

Received date: 2015-07-20; Revised date: 2016-01-20. Editor: LIN Qiang

Foundation item: Chinese National Natural Science Foundation (91228202); the National Basic Research Program of China (2013CB956201)

Corresponding author: GUAN Yuping. E-mail: guan@scsio.ac.cn

re-analysis-40) (1957–2002) and ERA-20C (1900–2010) data sets. The secular trend of wind energy input into waves was reduced at the rate of 0.43% per year since 1950. We also studied the swells and wind waves, which are two categories of the waves, by using the ERA-interim data. The spatial pattern of wind energy input into the swells and wind waves is mainly located in the northern parts of the South China Sea, but there is also a high wind energy input into the wind waves area in the southern parts of the South China Sea. The secular trend of the wind energy input into swells was increasing, and the same trend of wind energy input into the wind waves was reducing; the total energy input was also reducing by the joint effect of swells and wind waves. All of this was thanks to the weakening East Asian monsoon, which dominated in the South China Sea, in recent decades. These results are significant for understanding the variation of the surface waves in the South China Sea.

**Key words:** ocean wave; South China Sea; wind power; East Asian monsoon

海浪是一个重要的海洋环境预报要素。一方面, 海洋的波浪能是可再生的新能源之一(郑崇伟等, 2012); 另一方面, 海浪尤其是灾害性波浪也可给海洋工程、海上航行、海上生产与作业带来危害。南海是全球最繁忙航道的海区之一(Tournadre, 2014), 随着我国对南海开发利用与日俱增, 对南海海浪的预报也提出了新的要求。齐义泉等(2003)和裘沙怡等(2013)的研究都表明南海作为边缘海其波浪场与风场变化具有很好的相关性, 由于南海受东亚季风控制且近几十年来呈减弱趋势(Wang et al, 2009), 那么, 从能量的角度研究风对南海海浪的长期影响具有重要理论意义和实用价值。

风向海洋波浪输入能量已有不少学者进行研究, 例如, Wang等(2004)用NCEP (National Centers for Environmental Prediction)(1998—2002年)的日平均风场数据估算出全球风输入给波浪的能量大约是60TW。Teng等(2009)用MASNUM(marine science and numerical modeling)海浪模式估算了2005年全球海浪的能量收支, 逐月量值的变化在51TW与62TW之间不等, 年均值约为57TW, 而波浪破碎消耗33TW。可见海浪从风获取的能量是巨大的, 即使大部分被波浪破碎耗散掉, 但通过波—流相互作用和波—波相互作用转化为其他形式的能量仍是不可忽视的(Wang et al, 2004)。最近, Liu等(2012)用遥感卫星高度计数据重新估算风向全球波浪能量输入约为80TW, 其中由风向表面波下传的能量通量约有24%发生在南大洋、西北太平洋和大西洋的风暴爆发海区, 约有7%的能量通量输入发生在热带海洋。上述研究是全球或洋盆尺度的, 由于风能输入区是非均匀的片状分布, 加之所用数据分辨率相对较粗, 如Wang et al(2004)用的NCEP资料的分辨率为 $2^{\circ}30'$ , 并没有给出南海区域的细节。尽管杨忠良(2007)讨论了波浪对南海 Ekman 层风能输入的影响; 凌征等(2012)利用2000—2007年的QuickSCAT风场数据估算了南海热带气旋对波浪输入能量约占风向波浪输入能量的5%~7%; 宗芳伊(2014)研究了近20年南海波浪及波浪能的分布。这些工作也没给出更多的风向

南海波浪输入能量的信息。因此本文试图利用较高分辨率的海洋数据使结果更具体。

## 1 数据与计算方法

### 1.1 资料来源

本文采用的全球海洋同化资料SODA(simple ocean data assimilation)2.2.4版(Carton et al, 2005, 2008)(数据来源: <http://soda.tamu.edu>)是由美国马里兰大学于20世纪90年代初开发的, 其目的是为气候研究提供一套能够与大气相匹配的海洋再分析资料。时间起止为1871年1月—2008年12月, 比上一个版本回溯了80多年, 数据包括水平速度、垂直速度、盐度、现场温度、纬向风应力(单位:  $N \cdot m^{-2}$ )、经向风应力。网格水平分辨率为 $30' \times 30'$ , 垂直方向上共40层, 纬度起止为 $75^{\circ}15'S \sim 89^{\circ}15'N$ , 经度起止为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}E$ , 即从 $0^{\circ}$  往东 $360^{\circ}$ 。SODA资料包括了所有能搜集到的剖面仪、海洋站点、锚定温盐、不同类型海表温度和盐度、夜间红外卫星SST等实测数据, 得到了全球海洋界的公认和广泛应用, 例如, Giese等(2011)用SODA2.2.4分析1871—2008年间的厄尔尼诺事件与重建海面温度一致; 最近Vargas-Hernandez等(2014)通过研究印度—太平洋十年变化, 如太平洋年代际振荡评估SODA2.2.4资料, 结论是SODA2.2.4数据能够准确地捕捉到区域海洋的年际变化特征。Du等(2010)用SODA2.0得到印尼贯穿流的三个路径之一流经南海; Yang等(2012)用SODA2.0.2的风场数据及NCEP风场数据计算了南海的风向地转流的能量输入。SODA资料用于研究本文所关注问题的优势在于有风应力数据。

风场资料: 欧洲中期天气预报中心的ERA-40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts re-analysis-40)数据, 是通过天气预报数据重新计算得到的模式数据, 由于使用的大气环流模式(general circulation model, GCM)除了天气预报数据外, 还利用了各种观测数据, 使该数据更接近实况。ERA-40数据的时间长度是1957年9月—2002年8月, 垂直分

层为23层, 涵盖了地面层和大气层多方面的资料, 本文使用的是其 $30' \times 30'$ 的10m风场的月平均数据。

ERA-20C数据是欧洲中心推出的ERA-20CM版本, 对大气、陆地和海浪进行耦合, 并对地面观测资料进行同化, 数据包括大气(91层), 陆地(4个土壤层)和海浪的数据, 时间长度为1900—2010年, 本文选用了 $7'30'' \times 7'30''$ 的10m风场进行风应力计算。

ERA-Interim数据是欧洲中心采用四维变分同化技术, 同化了大量的浮标、卫星高度计等观测数据以及海浪数据, 时间分辨率为逐月平均的海表面10m风场以及逐日4个时次的海浪场数据, 数据分辨率包括 $30' \times 30'$ ,  $7'30'' \times 7'30''$ 等多种分辨率, 数据库的变量包括海表面10m 风速和风向、混合浪有效波高和波向及混合浪平均周期, 本文采用 $7'30'' \times 7'30''$ 有效波高数据和风场数据, 时间跨度为1979—2014年, 这里的混合浪是指风浪与涌浪迭加在一起, 两者没有分离(李金洪, 1988; 庄晓宵 等, 2014)。

## 1.2 计算方法

### 1.2.1 计算区域

以SODA数据为例, 本文选取的南海区域是 $2^{\circ}15'N$ 到 $24^{\circ}30'N$ ,  $105^{\circ}15'E$ 到 $123^{\circ}15'E$ 之间的海域, 共计 $45 \times 37$ 个网格点。水团取法: 每个格点在水平方向左右取 $15'$ 、垂直方向上向下取0.5层为该点代表的水团, 例如坐标  $\langle 15^{\circ}N, 180^{\circ}15'E, 2125.0m \rangle$ 处的温盐流值代表了  $\langle 0^{\circ} \sim 30^{\circ}N, 180^{\circ}E \sim 180^{\circ}30'E, 2000.05m \sim 2250.0m \rangle$ 水团的温盐流值。水平方向上的距离采用球面距离的算法, 即:  $d(lon1, lat1, lon2, lat2) = R \times \arccos[\sin(lon1) \times \sin(lon2) + \cos(lon1) \times \cos(lon2) \times \cos(lat1 - lat2)]$  (1)  $R$  为地球半径(取  $6.371004 \times 10^6m$ ),  $lon$  和  $lat$  为经度和纬度。

### 1.2.2 风向波浪的能量输入

由于 SODA, ERA-20C 数据中缺少对应的波浪要素数据, 根据 Wang 等(2004), 采用的风向波浪的能量输入公式为:

$$W = \iint 3.5 \times \rho_a \times \left( \frac{\tau}{\rho_a} \right)^{3/2} dA \quad (2)$$

其中  $W$  为风向波浪输入的能量,  $A$  为面积,  $\rho_a$  为空气密度, 大小为  $1.2kg \cdot m^{-3}$ ,  $\tau$  为风应力。

对ERA-Interim数据, 根据Wang 等(2004)采用的另一种计算公式为:

$$W = \begin{cases} 0.5 \times H_*^{\frac{2}{3}} \times \rho_a \times \left( \frac{\tau}{\rho_a} \right)^{\frac{3}{2}} & H_* \leq 36 \\ 12 \times H_*^{\frac{2}{9}} \times \rho_a \times \left( \frac{\tau}{\rho_a} \right)^{\frac{3}{2}} & H_* > 36 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $H_*$  为无量纲化的有效波高, 其他符号代表意义与公式(2)相同

### 1.2.3 风浪和涌浪的划分

本文采用张连新(2011)定义的新波龄来区分波浪的涌浪状态和风浪状态, 庄晓宵 等(2014)用其定义的波龄方法研究了全球涌浪的季节变化特征, 其结论是全球海洋基本以涌浪为主。

$$\beta_* = \frac{1}{1.82\pi} \times \left( \frac{g \times H_s}{B \times u_*^2} \right)^{2/3} \quad (4)$$

其中  $\beta_*$  为新波龄,  $B=0.062$  为常数,  $H_s$  为有效波高,  $u_*$  为海表摩擦速度。当新波龄大于等于32时, 波浪认为是涌浪状态, 否则为风浪状态。

## 2 结果分析

### 2.1 风向南海波浪输入能量的空间分布

风向波浪输入能量主要是风通过应力对海面做功。图 1 给出了用 1871—2008 年间用 SODA 数据计算得到的南海海浪从风获得能量的月平均分布, 具体来说, 在 1 月, 风应力输入给波浪的能量主要分布在台湾与吕宋岛之间的吕宋海峡及其附近区域, 并向西一直延伸到海南岛附近, 最大值达到  $350mW \cdot m^{-2}$ , 位于中南半岛东部  $8^{\circ}N, 111^{\circ}E$ , 附近也有相对较强的风能对波浪的输入, 但风能对波浪的输入却只限于南海北部区域较为明显。从 2 月开始, 东北季风开始减弱, 所以风输入能量也开始减弱; 3 月、4 月和 5 月一直延续这种情况, 其中 4 月、5 月风应力输入的能量最弱。从图中可以看出, 这两个月最大值也只达到  $400mW \cdot m^{-2}$  左右, 但 4 月和 5 月风应力作用区域却是有很明显的不同; 4 月风输入区域主要位于台湾岛周围海域, 并且台湾岛附近海域风输入能量相对较低, 而稍远的海域则输入相对较高, 形成明显的环状, 而在 5 月份, 风输入则主要分布在海南岛东南海域, 以及台湾岛西南海域。

从六月开始, 由于西南季风(Fang et al, 2006; Wang et al, 2009), 并一直持续到 8 月, 到达鼎盛时期, 最高达约  $120mW \cdot m^{-2}$ , 风输入给波浪的能量的高值中心在能量输入主要是在中南半岛南部外海急流区域。原因是西南季风和越南东部安南山脉的相互作用, 西南季风在中南半岛南部外海形成一个风急流(Xie et al, 2003), 同时在海洋中也形成一个急流, 两者叠加从而形成了一个能量输入较大的区域; 9 月, 是夏季西南季风转换为冬季东北季风的时间, 所以风应力输入区域表现出西南季风和东北季风两种特征, 首先是在中南半岛东侧有一高

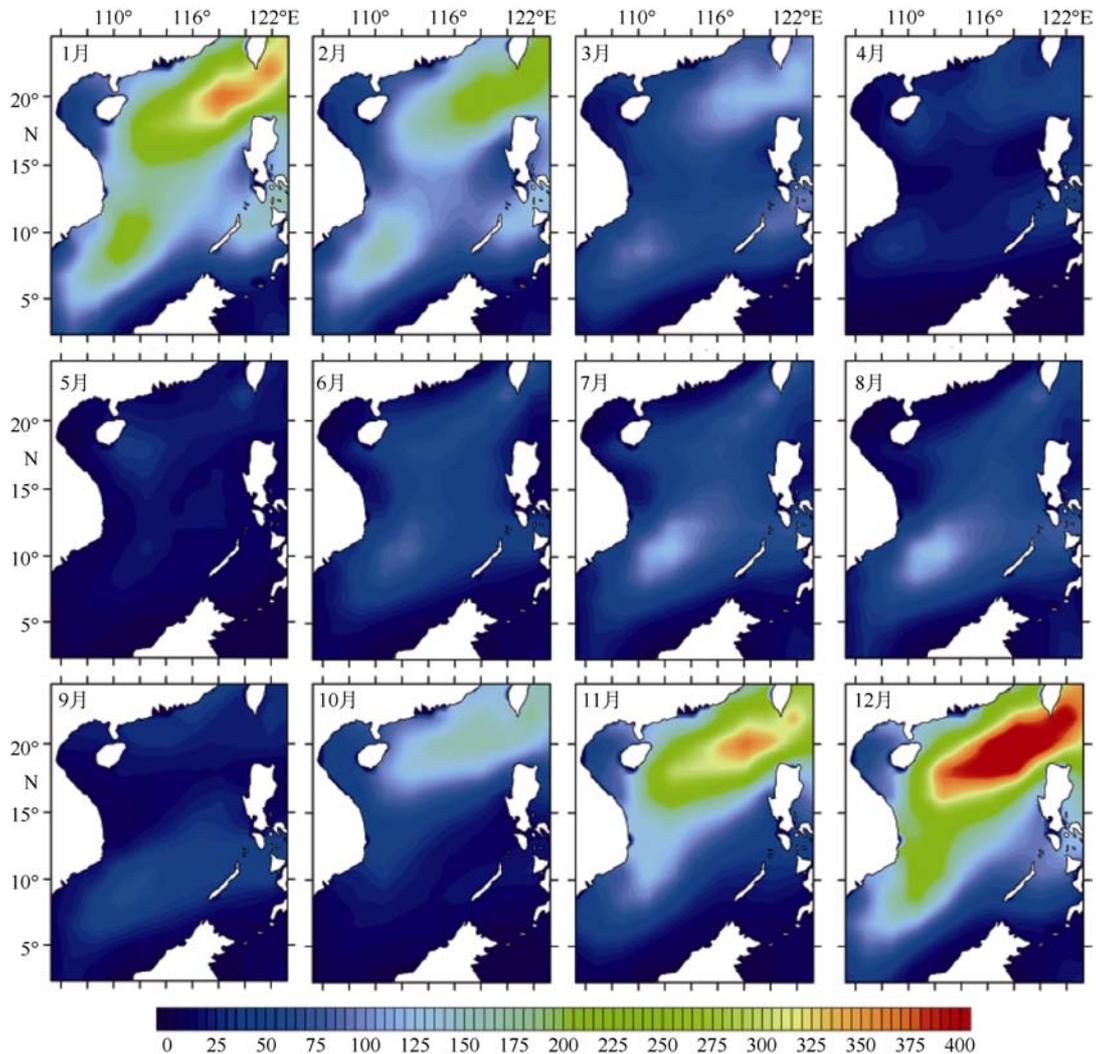


图 1 风向南海波浪输入能量的逐月分布图(单位:  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ )

Fig. 1 Spatial patent of monthly wind energy input into surface waves in the South China Sea

值区域,这一区域与西南季风爆发的高值区域相符合,另外在福建省外围海域也开始显现出高值区域;到了10月,强烈的东北季风(Shaw et al, 1998; Morimoto et al, 2000)正式开始,风能输入的高值区也转变到吕宋海峡西侧海域。接着11、12月开始不断增强,并在12月达到能量输入最大值 $450\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,我们还可以看出从12月开始,中南半岛南端外海区域就已经逐渐开始显示出能量输入高值区域。

凌征等(2012)用Quickscat风场数据考虑台风情况下南海5到12月的输入给波浪能量分布,夏季对波浪输入主要在中南半岛东南部海域,最大值为 $120\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,冬季主要是在南海北部吕宋海峡和台湾海峡附近海域,和中南半岛南部附近海域,最大值超过 $300\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。我们用SODA资料得到的结果与其一致。

正如前述,由于南海是季风控制区(Wang et al, 2009),图2(左列)给出了SODA资料风能输入给南海波浪的季节分布情况,其中冬季取为11、12、1月,其他季节以此类推。显而易见,冬季是风能输入南海的鼎

盛期,输入区域几乎集中在南海北部整个海区,单位面积输入高达 $300\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,向西一直达到我国的海南岛附近海域;其余海域并没有明显的能量输入情形,只有在中南半岛东部 $8^{\circ}\text{N}$ , $111^{\circ}\text{E}$ 附近才有相对较弱的风应力对波浪的输入形成一个小高值区。到了春季,冬季风开始减弱,也主要是在北部地区,表现出来的是冬季南海的遗留特征;在夏季,西南季风爆发,相对高值中心为中南半岛东南部海域中心偏东位置,大小最大约为 $120\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ;到了秋季,由于夏季风减弱,冬季风逐渐开始增强,是西南夏季风相东北冬季风的转变季,所以秋季表现出的是冬季和夏季两方面的特征。总的来说,风输入给南海波浪的能量受季风影响显著,冬季风的能量输入占据主导地位。

图2(右列)是用ERA-20C风场计算出的风向南海波浪的能量输入,其季节的空间分布格局与SODA的非常相像,只是量值比SODA的小。我们进一步用ERA-20C和ERA-40两个不同版本的资料进行比较可以看出,具有更高分辨率风场的ERA-

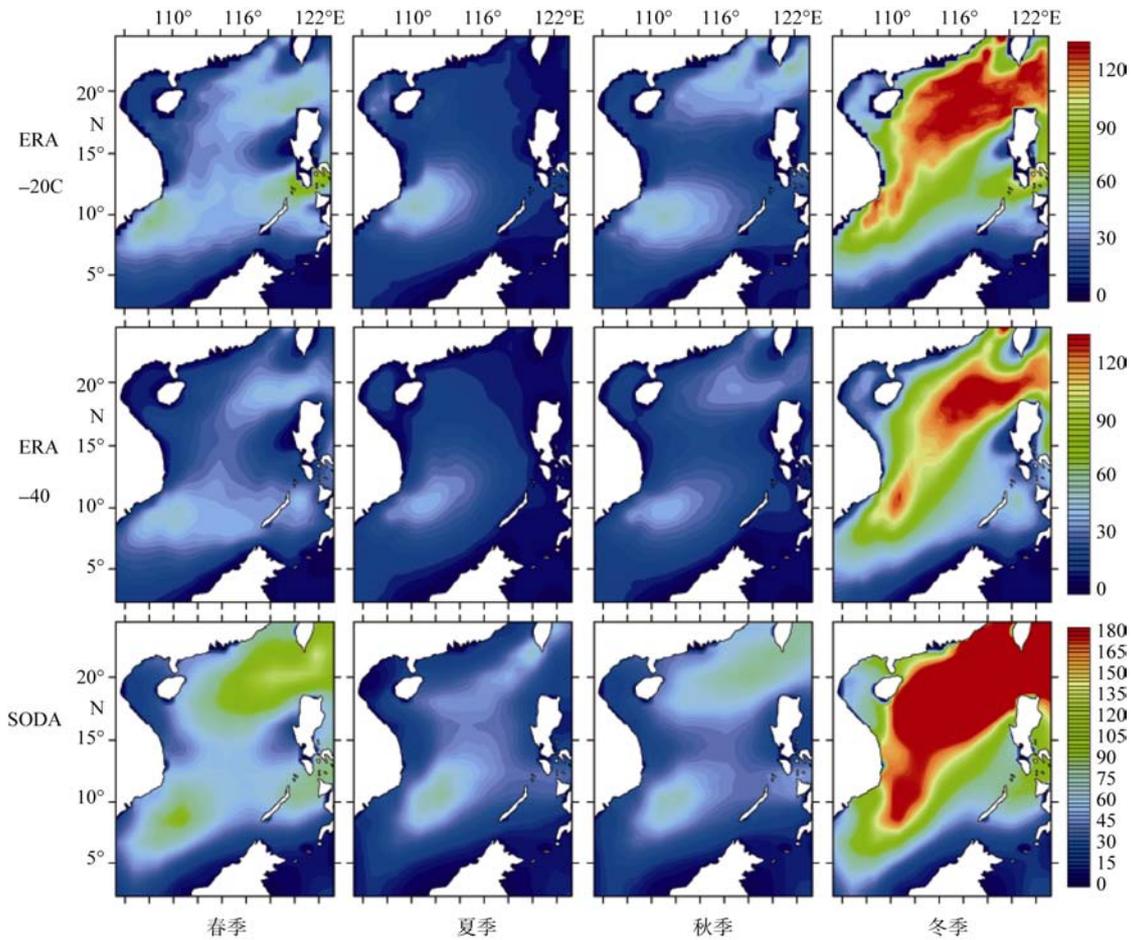


图 2 用 SODA、ERA-40 和 ERA-20C 三个数据得到的风向南海波浪输入能量的季节分布图(单位:  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ )

Fig. 2 Spatial patent of seasonal wind energy input into surface waves in the South China Sea using SODA, ERA-40 and ERA-20C

20C 数据得到的能量输入估值要比 ERA-40 的高; 这一点从后面图 4 的年际变化上也可以看出 ERA-20C 风场对南海波浪的年际输入值总体要比 ERA-40 的更高, 这与 Zhai 等(2012)得到的结论一致, 即风场的分辨率对风向海洋能量输入的估算有直接影响, 风场分辨率越高估算的能量输入值越大。

### 2.2 风向南海波浪输入能量的长期变化趋势

图 3a 是用 SODA 风应力数据得到从 1871 年到 2008 年之间年均输入给波浪的总能量一直在降低。总平均值大致是  $2.4171 \times 10^{11}\text{W}$ , 约为 0.24TW, 标准差为  $5.4712 \times 10^{10}\text{W}$ , 年降低率为 0.33%; 需要注意的是, 年平均值(图 3a)比冬季(图 3b)的要小, 主要由于冬季风能输入被其他月份参与平均而拉低的, 这一点从图 1 也可以反映出来。为了揭示冬季和夏季的区别, 将两者分别画图, 结果显示, 冬季(图 3b)的每年平均输入是  $5.0894 \times 10^{11}\text{W}$ , 约为 0.51 TW, 标准差为  $1.5643 \times 10^{11}\text{W}$ , 且每年的速度降低为 0.33%; 夏季(图 3c)的年平均输入是  $1.3954 \times 10^{11}\text{W}$ , 约为 0.14TW,

标准差为  $4.4274 \times 10^{10}\text{W}$ , 年降低率为 0.4%。从图 3b 和 3c 不难看出, 尽管把冬夏两季分开的总趋势是减少的, 但是夏季呈现出增减波动的状态, 相比冬季的 1997—2008 年间呈减少态势, 夏季的 2002—2008 年间反呈增加态势。

为什么南海的风能输入一直在减少呢? 主要因素是南海受季风控制, Wang (2001, 2002)和贺圣平等(2012)研究表明东亚季风从 1970 年开始呈减弱之势, 可能的解释之一是由于季风的减弱导致了南海风向波浪能量输入的减弱。Yang 等(2012)用 SODA2.0 以及 NCEP 风场数据估算风向南海地转流输入的能量在 1959 到 2008 年间呈不断降低的趋势, 两者是一致的。另外, 根据 1900—1984 年间船舶报的风速, 南海风场的实测历史数据表明, 至少从 1950 年以后南海船舶航线上的风速一直在减小(Cardone et al, 1990, 见该文图 3)。

为了印证用 SODA 得到的变化趋势, 进一步用 ERA-40 和 ERA-20C 风场资料做了估算。图 4 是

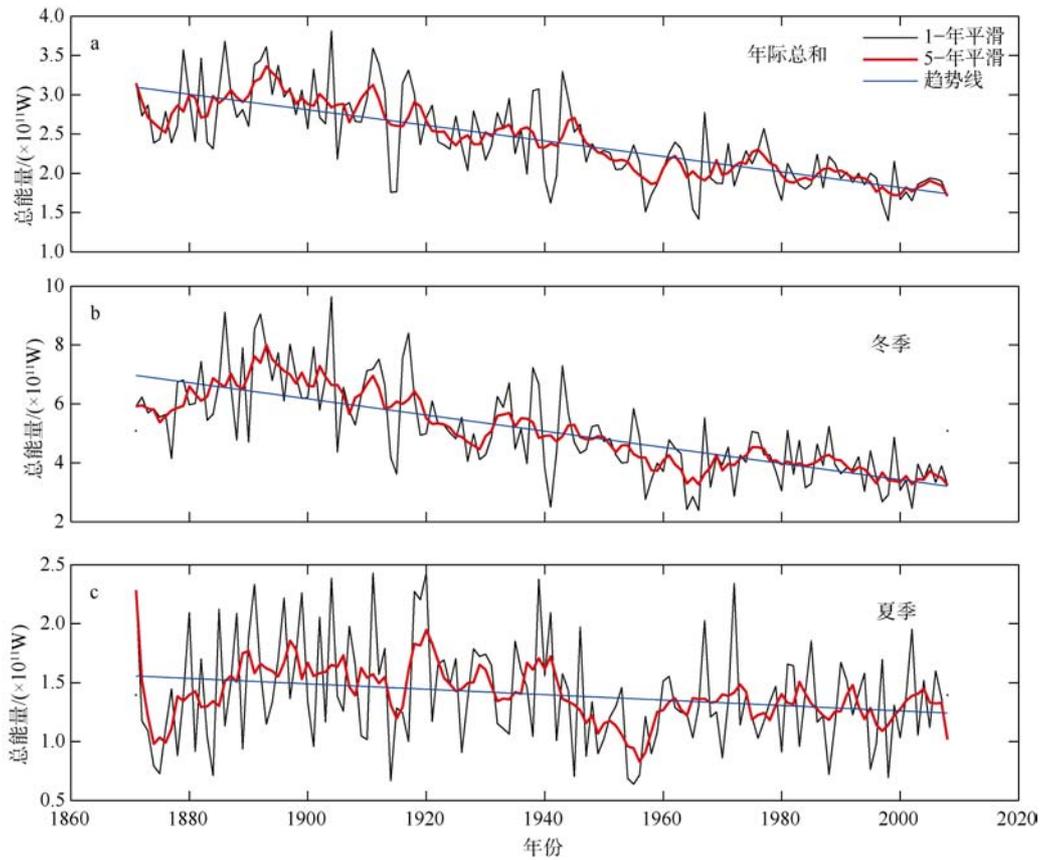


图 3 风向南海波浪输入能量的变化趋势,年平均(a)、冬季(b)和夏季(c)

Fig. 3 Secular trend of wind energy input into surface waves in the South China Sea

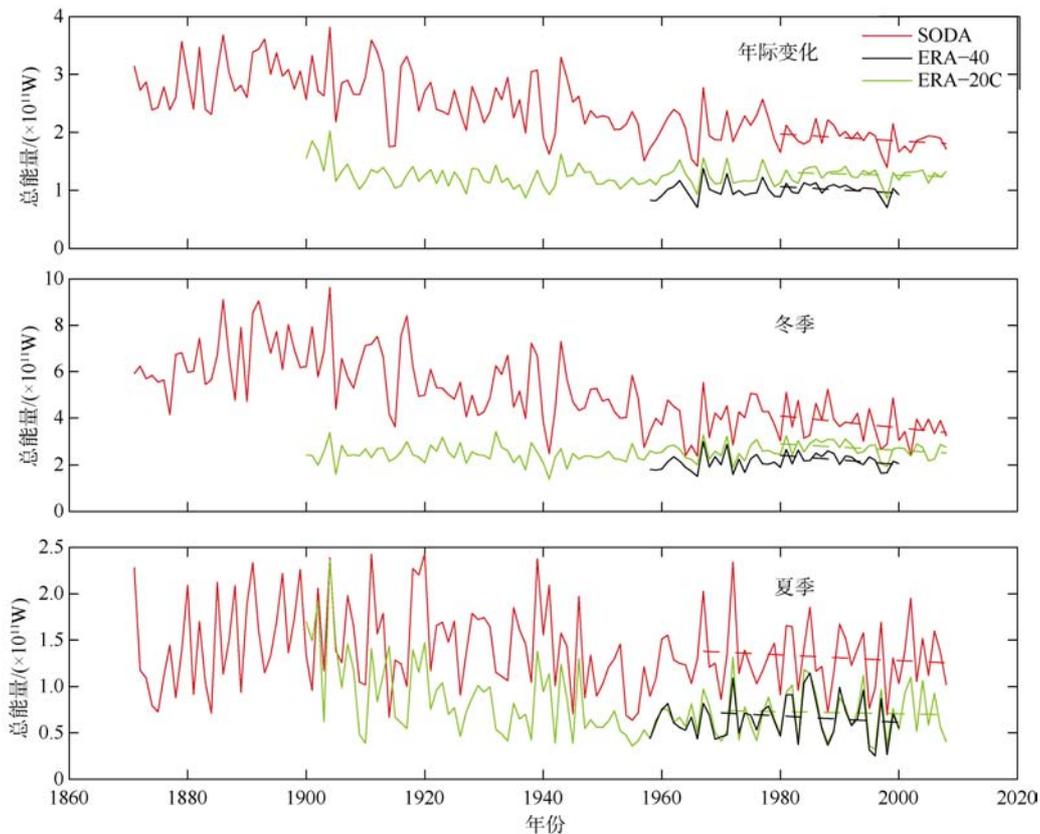


图 4 SODA 资料的风对南海波浪输入能量与 ERA-40、ERA-20C 资料的对比

Fig. 4 Comparison of wind energy input into surface waves in the South China Sea among SODA2.2.4, ERA-40 and ERA-20C data sets

ERA-40 和 ERA-20C 风场下风对南海波浪输入的年际变化图, 其中红线是用 SODA 风应力数据所得到的结果, 黑线和绿线是 ERA-40 和 ERA-20C 数据得到的结果, 从图中可以看出, 用 SODA 风应力资料计算出来的大小要比 ERA-40 等风场资料计算所得的结果稍微大一点, 而从变化趋势三者是一致的。由于这三个数据的有效时间长度不同, 在冬季选取了 1980 年以来的结果做趋势线, 在夏季选取了 1970 年以来的结果做趋势线结果表明三者无论冬夏都表现出了降低的趋势, 这也佐证了由于东亚冬季季风在 20 世纪 80 年代和夏季风在 20 世纪 70 年代开始变弱的事实(王会军 等, 2013), 使得风向南海海浪的能量输入在减弱。此外, 三者冬季的减弱趋势都比夏季的要显著。

### 2.3 风向南海涌浪和风浪输入能量的空间分布

利用 ERA-interim 数据可以计算得到风向南海的涌浪和风浪输入能量的空间分布图(图 5), 从图中可以看出我们利用公式 3 计算得到的风向波浪总输入的空间分布和利用 SODA、ERA-40 和 ERA-20C 三个数据使用公式 2 计算得到的结果十分相似; 从季节分布来看, 春季风向南海波浪的输入主要是输

入给涌浪为主, 输入给涌浪的能量主要分布在南海北部和中南半岛南端外海附近; 到了夏季, 可以看出在风输入给波浪的能量输入高值区主要是输入给风浪, 输入给涌浪的能量虽然比较小, 但涌浪的输入范围较广, 所以从图 5 可以看出夏季风输入给涌浪和波浪的能量很相近; 在秋季, 对涌浪输入依然保持在南海的大部分海域, 其中高值区在南海北部海域, 而对风浪的能量输入依然在中南半岛南端外海夏季风爆发海域, 除此之外, 由于冬季风的逐渐增强, 在吕宋海峡和台湾海峡也出现了风浪的能量输入高值区; 在冬季, 冬季风全面爆发, 风对涌浪输入的高值区主要是在南海北部海域, 对风浪的输入高值区主要是在吕宋海峡, 台湾海峡和中南半岛南端外海海域。

图 6 是利用 ERA-interim 资料计算得到的风向南海涌浪和风浪输入能量的变化趋势图, 与采用公式(2)计算的结果相比, 考虑了风应力和波高的公式(3)计算出来的结果要相对较高, 但在 1979—2014 年间的变化趋势上, 对总的波浪输入依然是在不断减少。总体来看, 全年输入给风浪的约占 40%, 对涌浪的输入约占 60%, 其中对风浪的输入是不断减少,

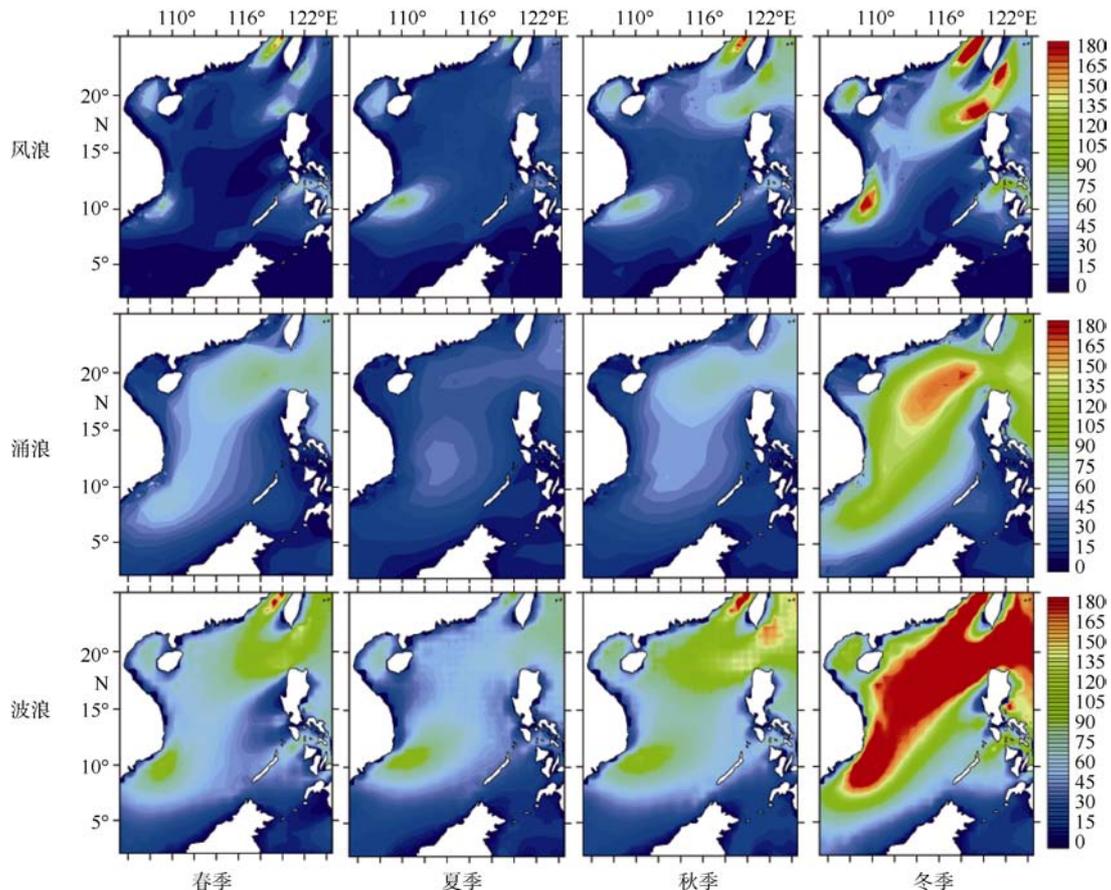


图 5 用 ERA-interim 数据得到的风向南海涌浪和风浪输入能量的季节分布图(单位:  $mW \cdot m^{-2}$ )

Fig. 5 Spatial patents of seasonal wind energy input into swells and wind waves in the South China Sea (ERA-interim)

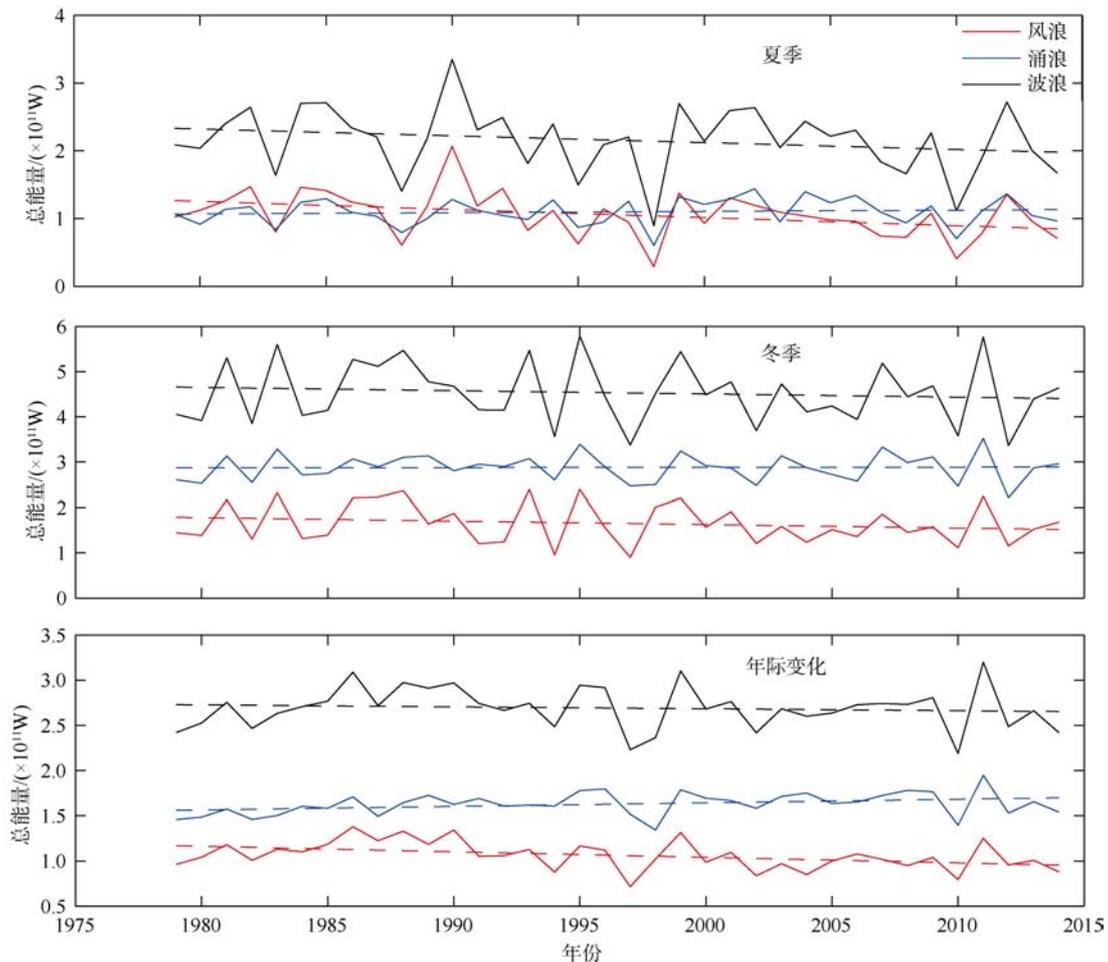


图 6 风向南海涌浪和风浪输入能量的变化趋势

Fig. 6 Secular trends of wind energy input into swells and wind waves in the South China Sea

但对涌浪的输入是在缓慢增加。在夏季,风对涌浪和波浪的输入大体一致,在冬季,风对涌浪的输入较高,占总输入的64%。郭佩芳等(1997)研究指出南海冬季以涌浪状态为主,占比约70%,夏季以风浪状态为主,占比约60%,这些结果都和我们得到的结果一致。

### 3 讨论和结论

Zhai 等(2012)的研究表明,用6小时风或日平均风比用月平均风输入给海洋环流的能量要提高70%;Wang 等(2004)估算全球风向海浪输入能量时用的是逐日平均风场。由于SODA资料是月平均,因此对南海海浪来说,这里估算的结果比用逐日资料要低,但不会影响对变化趋势的诊断,也就是说,无论年平均还是把冬、夏季分别单独考虑,风向南海海浪输入的机械能总体均呈减少趋势,从涌浪和风浪的能量输入来看,风给风浪的能量输入在不断减少,而对涌浪有缓慢增加,但总体依然是呈下降趋势。空间分布因受季风影响,风向南海波浪输入

的能量呈片状分布,冬季以南海北部为主,夏季以南部为主,但强度比冬季要弱得多。

随着全球暖化,极端天气事件已呈频发态势,以往几十甚至百年难得一遇的,将可能缩短为多年一遇,这对理论研究和业务预报都提出了挑战。风给海浪提供能量,然后波浪再将部分能量输送至整个埃克曼层(吴克俭等,2008),尽管目前人们还不清楚这些能量在埃克曼层以下的传输途径如何,但这部分能量之大是不能忽略的,深刻认识风能通过不同的渠道向海洋输入,有利于深入认识南海深海环流驱动的能量来源。

此外,台风对南海海浪的能量输入是值得进一步探讨的问题。Liu 等(2008)研究全球台风输入给海洋的能量从1984到2003年这20年间增加了16%,而南海热带气旋活动呈增加趋势(Huang et al, 2012);凌征等(2012)计算了台风向南海海浪的能量输入,但并没有给出其长期变化趋势。那么,台风向南海海浪输入能量的变化趋势将如何?这一问题的解答将对南海的海浪研究具有重要意义。

## 参考文献(References)

- 郭佩芳, 施平, 王华, 等, 1997. 划分风浪与涌浪的一个新判据——海浪成份及其在南海的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 27(2): 131–137. GUO PEIFANG, SHI PING, WANG HUA, et al, 1997. A new criterion between wind wave and swell wave—by mixed wave composition factors and its application to the south china sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 27(2): 131–137 (in Chinese with English abstract).
- 贺圣平, 王会军, 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J]. 大气科学, 36(3): 523–538. HE SHENGPING, WANG HUIJUN, 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 36(3): 523–538 (in Chinese with English abstract).
- 李金洪, 1988. 混合波浪高分布[J]. 海洋学报, 10(4): 408–418.
- 凌征, 金宝刚, 崔红, 等, 2012. 热带气旋对南海表层流和波浪的能量输入[J]. 中国海洋大学学报, 42(7–8): 10–18. LING ZHENG, JIN BAOGANG, CUI HONG, et al, 2012. Evaluation of the wind energy input to the surface currents and waves induced by the tropical cyclones in the South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 42(7–8): 10–18 (in Chinese with English abstract).
- 齐义泉, 施平, 毛庆文, 等, 2003. 基于 T/P 资料分析南海海面风、浪场特征及其关系[J]. 水动力学研究与进展, 18(5): 619–624. QI YIQUAN, SHI PING, MAO QINGWEN, et al, 2003. Relationship and characteristic of the sea surface wind and wave fields over the south china sea derived from T/P altimeter[J]. Journal of Hydrodynamics, 18(5): 619–624 (in Chinese with English abstract).
- 裘沙怡, 梁楚进, 董昌明, 等, 2013. 南海海面风、浪场时空变化特征及其关系分析[J]. 海洋学研究, 31(4): 1–9. QIU SHAYI, LIANG CHUJIN, DONG CHANGMING, et al, 2013. Analysis of the temporal and spatial variations in the wind and wave over the south china sea[J]. Journal of Marine Sciences, 31(4): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- 王会军, 范可, 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征[J]. 大气科学, 37(2): 313–318. WANG HUIJUN, FAN KE, 2013. Recent changes in the east Asian monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 37(2): 313–318 (in Chinese with English abstract).
- 吴克俭, 杨忠良, 刘斌, 等, 2008. 波浪对 Ekman 层的能量输入[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(1): 134–140. WU KEJIAN, YANG ZHONGLIANG, LIU BIN, et al, 2008. Wave energy input into the Ekman layer[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(1): 134–141 (in Chinese with English abstract).
- 杨忠良, 2007. 波浪对南中国海 Ekman 层风能输入的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学. YANG ZHONGLIANG, 2007. Wave influences on wind energy input into the Ekman layer in the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese).
- 张连新, 2011. 风浪条件及飞沫对海气热通量的影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. ZHANG LIANGXIN, 2011. Effects of sea spray and wind sea conditions on air-sea heat flux[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese).
- 郑崇伟, 林刚, 孙岩, 等, 2012. 近 22 年南海波浪能资源模拟研究[J]. 热带海洋学报, 31(6): 13–19. ZHENG CHONGWEI, LIN GANG, SUN YAN, et al, 2012. Simulation of wave energy resources in the south china sea during the past 22 years[J]. Journal of Tropical Oceanography, 31(6): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- 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. ZHUANG XIAOXIAO, LIN YIHUA, 2014. Seasonal variation of global ocean wave[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 38(2): 251–260 (in Chinese with English abstract).
- 宗芳伊, 2014. 近 20 年南海波浪及波浪能分布、变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. ZONG FANGYI, 2014. Research on distributions and variations of sea wave and wave energy in south china sea during recent 20 years[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese).
- CARDONE V J, GREENWOOD J G, CANE M A, 1990. On trends in historical marine wind data[J]. Journal of Climate, 3(1): 113–127.
- CARTON J A, GIESE B S, GRODSKY S A, 2005. Sea level rise and the warming of the oceans in the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) ocean reanalysis[J]. Journal of Geophysical Research, 110(C9): C09006.
- CARTON J A, GIESE B S, 2008. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA)[J]. Monthly Weather Review, 136(8): 2999–3017.
- DU YAN, QU TANGDONG, 2010. Three inflow pathways of the Indonesian throughflow as seen from the simple ocean data assimilation[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 50(2): 233–256.
- FANG GUOHONG, CHEN HAIYING, WEI ZEXUN, et al, 2006. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and surface temperature in the recent decade[J]. Journal of Geophysical Research, 111(C11): C11S16.
- GIESE B S, RAY S, 2011. El Niño variability in simple ocean data assimilation (SODA), 1871–2008[J]. Journal of Geophysical Research, 116(C2): C02024.
- HUANG QIAN, GUAN YUPING, 2012. Does the Asian monsoon modulate tropical cyclone activity over the South China Sea?[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 30(6): 960–965.
- LIU LINGLING, WANG WEI, HUANG RUIXIN, 2008. The mechanical energy input to the ocean induced by tropical cyclones[J]. Journal of Physical Oceanography, 38(6): 1253–1266.
- LIU GUOQIANG, HE YIJUN, ZHANG YUANZHI, et al, 2012.

- Estimation of global wind energy input to the surface waves based on the scatterometer[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(6): 1017–1020.
- MORIMOTO A, YOSHIMOTO K, YANAGI T, 2000. Characteristics of sea surface circulation and eddy field in the South China Sea revealed by satellite altimetric data[J]. *Journal of Oceanography*, 56(3): 331–334.
- SHAW P T, CHAO S-Y, FU L-L, 1998. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry[J]. *Oceanologica Acta*, 22(1): 1–17.
- TENG YONG, YANG YONGZENG, QIAO FANGLI, et al, 2009. Energy budget of surface waves in the global ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(3): 5–10.
- TOURNADRE J, 2014. Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(22): 7924–7932.
- VARGAS-HERNANDEZ J M, WIJFFELS S, MEYERS G, et al, 2014. Evaluating SODA for Indo-Pacific Ocean decadal climate variability studies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(11): 7854–7868.
- WANG HUIJUN, 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the End of 1970's[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(3): 376–386.
- WANG HUIJUN, 2002. The instability of the East Asian Summer Monsoon-ENSO relations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19(1): 1–11.
- WANG WEI, HUANG RUIXIN, 2004. Wind energy input to the surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(5): 1276–1280.
- WANG BIN, HUANG FEI, WU ZHIWEI, et al, 2009. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1–3): 15–37.
- XIE SHANGPING, XIE QIANG, WANG DONGXIAO, et al, 2003. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(C8): 3261.
- YANG HAIYUAN, WU LIXIN, 2012. Trends of upper-layer circulation in the South China Sea during 1959–2008[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(C8): C08037.
- ZHAI XIAOMING, JOHNSON H L, MARSHALL D P, et al, 2012. On the wind power input to the ocean general circulation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 42(8): 1357–1365.