

基于 ENVISAT ASAR 影像的浙江沿海风能资源评估^①

常俊芳^{②*} 黄韦良^{**} 楼琇林^{**} 史爱琴^{**} 张华国^{**}

(* 中国海洋大学海洋遥感所 青岛 266100)

(** 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室 杭州 310012)

摘 要 基于星载合成孔径雷达(SAR)遥感影像,研究了浙江近岸海域风能资源的分布。利用 2005 - 2011 年 443 景 ENVISAT ASAR 影像反演了浙江沿海长时间序列高分辨率海面 10m 高度处的风场数据,风速反演采用 CMOD4 模式,风向信息来自全球再分析场资料 NCEP-NCAR。基于所提取的风场数据,对浙江沿海风能资源进行了评估。利用研究海域浮标观测的风速数据对基于 ENVISAT ASAR 影像的风能资源评估结果进行了对比验证,结果显示,Weibull 分布参数尺度因子 A 相对误差为 1.59%,形状参数 k 相对误差为 7.83%。对浙江沿海风能资源分布状况进行了研究,结果表明,浙江沿海风能资源极为丰富,该海域海面 10m 高度处的多年平均风速为 5 ~ 10m/s,近岸海域 50km 范围内年平均风能密度达到 100 ~ 300W/m²,其南部海域风能资源最为丰富,年平均风能密度最大可达 500W/m²。浙江沿海风能资源的分布在季节上呈现“秋冬季资源量大,春夏季资源量小”的特征。

关键词 ENVISAT ASAR, 浙江沿海, 海面风场, 风能资源评估

0 引 言

海上风能资源丰富,风速稳定,对环境的负面影响较小,而且可以大规模开发,因而世界沿海国家高度重视开发利用海上风能资源^[1]。我国于 2010 年建成了首个海上风力发电场——上海东海大桥海上风电场。近海风电场的开发迫切需要海上风能资源开发潜力的准确评估。本研究利用星载合成孔径雷达(SAR)数据对我国浙江沿海风能资源进行了高空间分辨率的精确评估,并对该海域的风能资源分布状况进行了分析,为科学制定风电开发目标和规划提供了有价值的参考依据。

1 相关工作

对近海风能资源的评估,传统方式主要有基于气象站点观测资料的评估。闫俊岳等^[2]运用船舶气象观测资料分析了中国近海有效风速和有效风能密度的分布,但其通过沿岸陆地气象观测数据或船

舶数据获得的近海风能资源分布图不能全面准确地反映海上风能资源的分布情况,而且这种方法费时费力。采用数值模拟也是常用的方法之一,周荣卫等^[3]运用中国气象局开发的风能资源数值模拟评估系统 WERAS 模拟计算了中国近海 1986 - 2005 年平均风能资源分布,但数值模拟风场数据分辨率和精度都较低,未能对我国沿海风能资源进行精细化评估。近年来运用卫星反演数据研究近海高分辨率风场分布的方法得到了广泛应用。Elliott 等^[4]使用 SSMI 微波辐射计风场资料对中国南部海域的风能资源进行了有效评估。徐经纬等^[5]使用 QuikSCAT 散射计风场资料研究了中国近海区域风能资源分布。但由于微波辐射计和散射计的空间分辨率都较低,一般为 25 ~ 50km,不能获取我国近海高分辨率风能资源分布资料。尤其在近岸海域,由于受到陆地回波的影响,无法获取有效风场信息。星载 SAR 是一种主动式的微波成像雷达,具有全天时、全天候、高空间分辨率等优良特性在海洋与海岸带环境和资源遥感方面发挥着重要作用。SAR 已成

① 863 计划(2007AA092003),上海市科学技术委员会科研计划(08DZ1206304)和国家海洋局第二海洋研究所科研业务(JG1015, JT1008)资助项目。

② 女,1983 年生,博士生;研究方向:微波海洋遥感;联系人,E-mail: cjl_018@126.com
(收稿日期:2012-04-25)

为近岸海域高分辨率风场信息获取和风能资源评估的重要手段。

浙江沿海是我国风能资源丰富区之一^[6],国内学者分别采用气象观测和数值模拟风场资料对浙江沿海的风能资源进行了评估。刘爱民等^[7]在对宁波气候研究中利用宁波沿岸岛屿的气象站观测资料得到该地区风速由沿海地区向内陆迅速递减,在其近岸海域 10m 高处的年平均风速为 5~6m/s。我国在第二次^[8]全国风能资源普查中利用气象站观测数据给出了我国陆地及近海 10m 高度处的风能资源分布结果,在浙江沿海年平均风能密度为 100~200W/m²。穆海振等^[9]运用空气污染模式 TAMP 对上海沿海风能资源进行评估,得到了 3km 分辨率的风能资源分布结果,得出在上海近海海域 10m 高度处的多年平均风功率密度为 150~250W/m²。袁春红等^[10]运用中尺度气象模式 MM5 对我国近海海上风场进行模拟计算,得到水平分辨率 8km 的风能资源分布结果,得出我国沿海年平均风速为 4~10m/s。周荣卫等^[3]运用 WERAS 模拟计算得出浙江南部海域风能资源较为丰富,该海域 70m 高度处的年平均风速为 6.5~8.0m/s,年平均风功率密度达到 250~450W/m²。以上研究在宏观上虽都指出浙江沿海风能资源丰富程度,但其评估结果分辨率都较低,目前还未有针对浙江沿海高分辨率的风能资源评估。本研究尝试利用星载 SAR 数据对我国浙江沿海高空间分辨率风能资源分布进行精确评估,并对该海域的风能资源分布状况进行研究。研究过程中利用 2005~2011 年 443 景 ENVISAT ASAR 影像反演了浙江沿海长时间序列高分辨率海面 10m 高度处的风速数据,基于反演得到的风速数据对浙江沿海风能资源进行了准确评估。同时,利用获取的浙江大陈岛附近海域气象浮标观测的风速数据,对本研究基于 ENVISAT ASAR 的风能资源评估结果进行了对比验证。

2 数据

2.1 SAR 数据

本研究海域为浙江沿海以及与此海域相连的上海近岸海域,研究过程中获取了 7 年的 ENVISAT ASAR 影像共 509 景。图 1 所示为获取的影像数据量在研究海域的空间分布,从图中可见卫星升降轨扫描海面的轨迹特征,其数据覆盖量达到了 165 景以上。图 2 所示为其数据量在时间上的分布,从图中可见该数据量在时间上大致是均匀分布的。从以

上分析可得,该数据量在空间和时间分布上达到了风能评估的要求^[11]。浙江沿海在夏季易受台风影响,台风的风速一般都高于 25m/s,这时为了避免对风机造成破坏,风机将停止工作,因此本文对浙江沿海风能资源评估的研究过程中去除了台风数据。

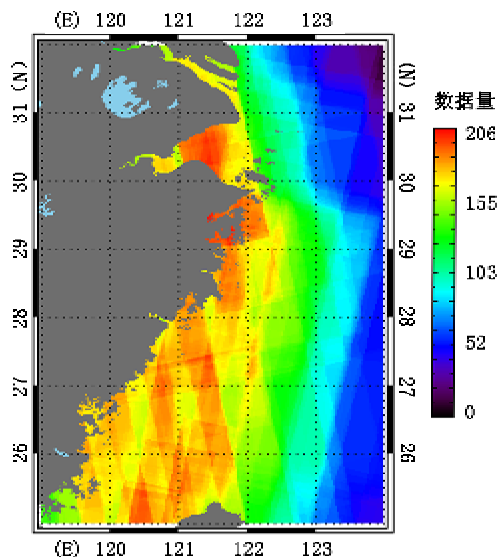


图 1 ASAR 影像数据量空间分布

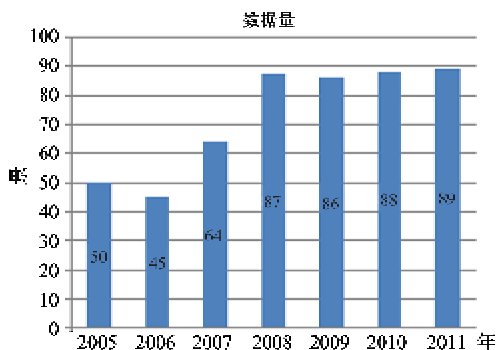


图 2 ASAR 影像数据量时间分布

2.2 数值模拟风场数据

由美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合发布的 NCEP-NCAR(Reanalysis 1)再分析场资料是应用最为广泛的全球风场资料,时间从 1948 年至今每隔 6h 都能获取一次最新的风场资料信息,其空间分辨率为 2.5°×2.5°(144×73),垂直分层为 17 层。本文获取的是距离海面高度 10m 的 U、V 风速场资料,用于 SAR 海面风场反演过程中的输入风向信息。

2.3 现场观测风场数据

(1) 测风塔气象观测数据

通过海上测风塔可以获取海面不同高度的风场数据。本文获取浙江省舟山普陀近岸海上测风塔

20m 高处的风场数据,用于与 ASAR 反演的海面 10m 高度处的风速数据对比验证。

(2) 海上浮标观测风场数据

浮标作为海上一种重要现场观测手段,其位置一般放置在靠外海的海域,是 SAR 海面风场反演验证工作的重要数据来源。本文获取了浙江大陈岛附近海域 2010 年气象浮标测量的风场数据 4358 个,其数据观测间隔时间为 1h。利用该浮标观测风速数据计算该处的风能指标参数,用于验证基于 ASAR 的风能资源评估结果。

3 方法

3.1 SAR 风场反演方法

星载 SAR 测量海面风场主要通过向海面发射微波波束并接受来自海面的后向散射回波来提取海面风矢量。在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 波束入射角的条件下,海面的微波散射主要是 Bragg 散射,雷达测量的后向散射截面 σ^0 主要是由受局部风影响的海面小尺度波与电磁波共振 Bragg 散射引起的,因此可以利用后向散射截面 σ^0 与海面风矢量的经验模式函数反演海面风场。SAR 海面风场反演常用与风速、风向及雷达后向散射截面 σ^0 相关的地球物理模式函数 (geophysical model function, GMF) 来计算海面风速。目前国际上用于 C 波段 VV 极化 SAR 海面风场反演模式主要有 CMOD4^[12]、CMOD5^[13] 和 CMOD-IFR2^[14]。本文采用 CMOD4 模式,该模式的形式为

$$\sigma^0 = a(\theta)u^{\gamma(\theta)}(1 + b(u, \theta)\cos\phi + c(u, \theta)\cos 2\phi) \quad (1)$$

式中, σ^0 是 VV 极化下的海面后向散射强度, u 为海面上 10m 高的风速, ϕ 是雷达视向和风向之间的夹角, θ 是雷达入射角, $a(\theta)$, $\gamma(\theta)$, $b(u, \theta)$ 和 $c(u, \theta)$ 为经验参数,它们是 θ 和 u 的函数。对于 C 波段 HH 极化 SAR 影像,需要使用描述 HH 极化和 VV 极化关系的极化率模型进行转化,常用的有 Thompson、Kirchhoff、Bragg 和 Elfouhaily 极化率模型。Horstmann 等^[15,16] 提出,对于 HH 极化 ENVISAT ASAR 影像,使用 CMOD4 模式和 $\alpha = 0.6$ 的 Thompson 极化率模型组合提取中低风速 (约 $\leq 25\text{m/s}$) 精度较高。本文风场反演过程将采用此极化率模型。

为了实现 SAR 业务化的风场反演工作,本文采用 NCEP-NCAR 再分析资料的风向信息。并采用双线性插值方法使其与 SAR 影像的像元空间位置匹

配。由 SAR 影像定量反演海面风场,辐射定标也是关键,本文中使用的 ENVISAT ASAR 影像的辐射定标公式^[17]为

$$\sigma_{ij}^0 = DN_{ij}^2 \times \frac{\sin\theta_i}{K} \quad (2)$$

式中 DN_{ij} 是 SAR 数据产品的像元有效灰度值, i 和 j 表示距离向和方位向像元点, θ_i 为雷达入射角, K 为辐射定标常数。SAR 海面风场反演前首先要去除陆地信息,本文采用数字高程数据 ASTER GDEM 进行陆地掩膜。SAR 海面风场反演流程见图 3。

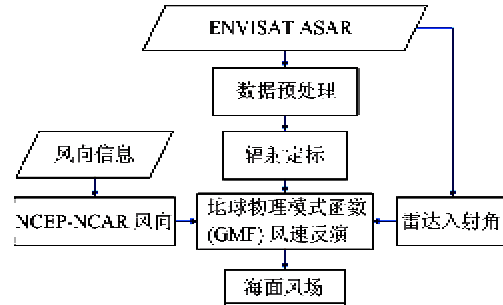


图3 SAR 影像反演海面风速流程

3.2 基于 SAR 的风能计算方法

基于 SAR 获取的浙江沿海风场资料,不但覆盖了整个海域,而且具有高分辨率的优良特性,可对研究海域的风能资源进行宏观和微观精细化评估。风能的大小主要取决于风速,它是气流在单位时间内以速度 V 垂直通过单位面积的气流所具有的动能。风能密度的表达式为^[18]

$$W = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (3)$$

式中 W 为风能密度 (W/m^2), V 为风速 (m/s), ρ 为空气密度 (kg/m^3)。在常温 (15°C) 和 1 个标准大气压下,空气密度约为 1.225kg/m^3 。

风速是一种高度随机性的量,可通过风速概率分布来描述其风能统计特征。两参数 Weibull 分布模型对于风能计算来说是一种比较理想的模式,其运用也最为广泛^[19,20]。Weibull 分布 A 、 k 参数估计有多种方法,其中极大似然估计具有无偏性、一致性和渐进有效性,其计算精度较高,尤其对于被估计的数值大小是在一定的范围。本文 SAR 反演的风速值一般不超过 25m/s ,这些数据在时间上分布不均匀,且具有高度的离散性,采用极大似然估计法较好^[21]。另外, SAR 反演风速是距海面 10m 高度处的,要获得更为全面的海上不同高度的风能资源分布情况,可利用描述风速垂直切边特征的风廓线来

把 SAR 反演得到的海面 10m 高度处的风速资料换算到不同高度来计算不同高度的风能分布情况^[22]。

4 结果与验证

4.1 SAR 风场反演结果与验证

SAR 提取海面风场时,任何使得雷达回波信号改变的海洋现象将影响 SAR 风场反演。尤其在浙江近岸海域,环境较为复杂,沿岸上升流、海流、水下地形和海上船只等以不同方式通过调制 Bragg 波对 SAR 海面风场反演造成影响。在利用长序列的多年 SAR 影像进行风场反演时,须对 SAR 影像数据进行筛选,剔除成像效果极差的影像,本研究数据筛选后剩余的影像数据量为 443 景。对出现在 SAR 影像中的海上船只和石油平台等,本文采用阈值法将这些散射系数非常高的像素点用其周围像素的均值来替代,消除这些高后向散射特征因素对 SAR 风场反演的影响。上升流区低温海水和生物油膜抑制了 Bragg 波,造成 SAR 风速反演结果偏低,根据文献[23]的方法,结合高分辨率的数值模拟风场数据对上升流区 SAR 风场反演结果进行修正。另外 SAR 影像中除了仪器的噪声和周围环境的黑体辐射噪声,还有表面的后向散射产生的附加噪声,本文使用增强 Lee 滤波算法对 SAR 影像进行滤波,抑制 SAR 影像中的斑点噪声,同时采用均值采样法把 SAR 影像的空间分辨率统一到 500m。

本文利用 2005 - 2011 年经过数据筛选和处理后的 443 景 ENVISAT ASAR 影像反演海面风场,根据上节方法,提取浙江沿海长时间序列的高分辨率海面风场数据。图 4 所示为浙江沿海 2008 年 2 月

3 日 ENVISAT ASAR 影像反演得到的地面分辨率为 500m 的风场图。图中可见浙江宁波附近海域风速较大,可明显看出沿岸海域风速精细的变化特征。

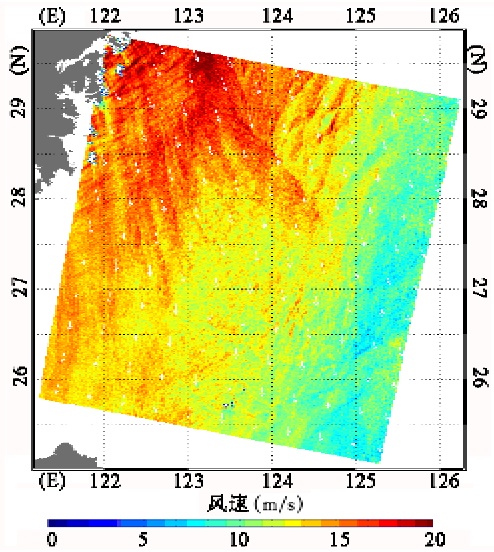


图 4 浙江沿海 2008 年 2 月 3 日 ASAR 影像风场反演结果图

本文利用获取的海上测风塔观测风速数据与 ASAR 风速反演结果进行对比。获取的测风塔的风场资料在时间上并不能完全与 SAR 成像时刻匹配。为了减小由于海面风场的剧烈变化造成的误差,此处把 ASAR 成像时刻前后 1h 内的测风塔风场资料均值化处理,并利用近海面层指数风廓线将测风塔测量的 20m 的风速资料修正到海面 10m 高度处,切变指数 α 采用 0.09^[24]。

表 1 给出了每个时刻点 ASAR 反演风速和测风塔的实测风速值。由对比分析结果可得,ASAR 风

表 1 ENVISAT ASAR 反演风速与测风塔观测风速各时刻点的比较结果

时间	模式	ASAR (m/s) (10m)	测风塔 (m/s) (20m)	测风塔 (m/s) (10m)	误差 (m/s)
2011-03-15 21:50	GM	6.2	7.6	7.1	-0.9
2011-03-27 10:02	GM	3.2	3.7	3.5	-0.3
2011-04-07 09:59	GM	4.3	6.6	6.2	-1.9
2011-04-11 21:59	IM	6.1	7.2	6.8	-0.7
2011-04-26 10:03	GM	6.2	8.7	8.2	-2.0
2011-08-09 22:01	GM	6.1	7.3	6.9	-0.8
2011-08-15 21:43	GM	5.5	9.1	8.5	-3.0
2011-08-16 9:58	GM	8.9	10.6	9.9	-1.0
2011-08-20 21:59	GM	6.5	7.2	6.8	-0.3
2011-08-23 21:49	IM	4.7	5.2	4.9	-0.2
2011-08-24 10:05	GM	6.8	6.2	5.8	0.4
2011-08-31 21:56	GM	6.9	4.9	4.6	2.0

速反演结果平均偏差为 -0.62m/s ,均方根误差为 1.42m/s 。由 ASAR 得到的平均风速为 5.95m/s ,测风塔平均风速为 6.60m/s ,两者极为接近。以上研究结果表明,利用 ASAR 提取的浙江沿海高分辨率风速数据具有较高精度,可作为浙江沿海风能资源评估的高精度、高分辨率风速资料数据。

4.2 基于 SAR 的风能评估结果与验证

基于提取的浙江沿海长时间序列高分辨率、高精度海面 10m 高度处风速数据对该海域风能资源分布状况进行评估。如图 5(a)所示为浙江沿海多年平均风速图,图 5(b)所示为浙江沿海海面 10m 高度处多年平均风能密度分布图。

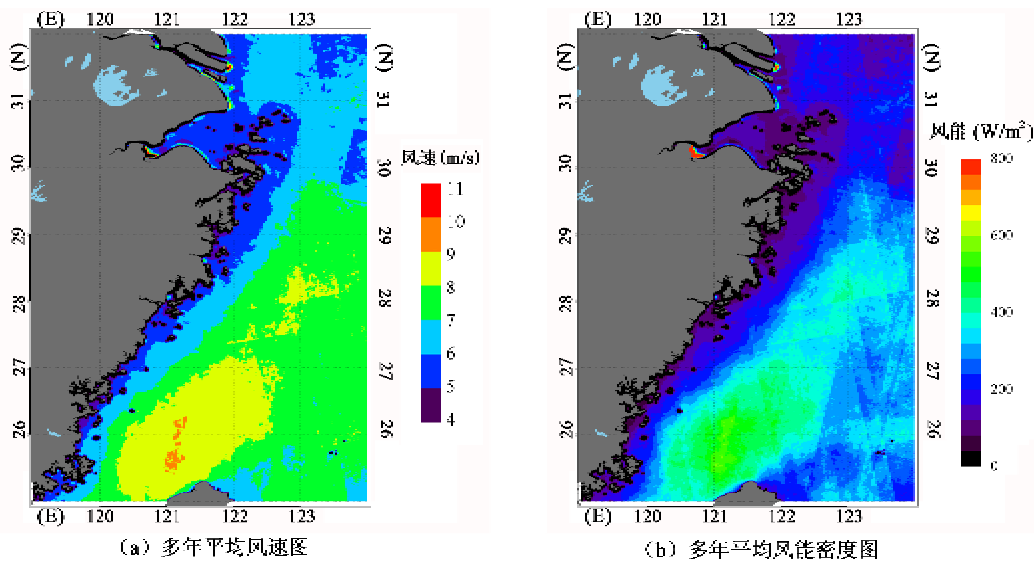


图 5 浙江沿海 10m 高度处 500m 分辨率多年平均风速分布图(a)和平均风能密度图(b)

本文利用获取的大陈岛附近海域 2010 年浮标现场观测风速数据对 ENVISAT ASAR 的风能资源评估结果进行对比验证。Nielsen 等^[11]的研究结果表明不同时间段的数据对风速分布的统计和 Weibull 拟合影响非常小。因此,本研究中使用的浮标观测风速资料时间上虽不能与 ASAR 影像数据完全匹配,但影响极小。由于该浮标观测数据位于海面 1m 处,因此须采用近海面层风速廓线把浮标观测风速数据修正到海面 10m 高度处。利用修正之后的浮标风速数据拟合 Weibull 分布,得到 Weibull 模型中的尺度因子 A 和形状参数 k 。图 6 所示为基于 ASAR 影像反演风速和浮标观测风速数据的风速频率分布图和拟合得到的 Weibull 曲线图。表 2 给出了基于 ASAR 影像和基于浮标观测风速数据计算得到的 Weibull 分布 A, k 参数值和相对误差。从图 6 中的 Weibull 分布曲线可见两者对比结果极为接近,其中尺度因子 A 的相对误差为 1.59% ,形状参数 k 的相对误差为 7.83% ,年平均风速相对误差只有 4.86% ,年平均风能密度相对误差只有 2.0% 。以上计算结果中平均风能密度是利用风速概率分布模型 Weibull 分布参数来计算得到的^[25]。由以上分

析可得,基于高分辨率 ENVISAT ASAR 影像对浙江近岸海域的海上风能资源评估结果精度较高。同时本文研究成果还与国内学者采用气象观测资料和数值模拟技术对浙江沿海的风能资源评估的结果相吻合。从而表明,基于 ENVISAT ASAR 影像可对近海海上风能资源进行高空间分辨率评估。以上对比结

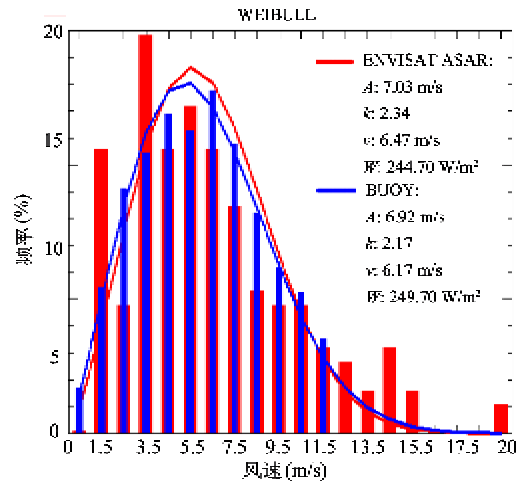


图 6 浙江大陈岛近岸海域某站点($28.25^{\circ}\text{N}, 122.0^{\circ}\text{E}$)基于 ASAR 和浮标测量风速数据的风速频率分布和拟合的 Weibull 分布图

表 2 基于 ASAR 影像反演风速资料计算得到风能指标参数数值、基于浮标测量的风速数据计算的风能指标参数值和相对误差值

	EVNISAT ASAR	浮标	相对误差(%)
Weibull A (m/s)	7.03	6.92	1.59
Weibull k	2.34	2.17	7.83
平均风速(m/s)	6.47	6.17	4.86
平均风能密度 $W(W/m^2)$	244.7	249.7	2.0

果虽然相符较好,但也存在一定的误差,原因主要有两个方面:一方面由于 ASAR 影像风速反演结果存在一定的误差;另一方面浮标在观测风速值时也会受到海面状况的影响,尤其在高速时,浮标会发生倾斜,海浪的飞沫将影响浮标上的风速计,另外涌浪也将影响浮标上风速计与海面相对高度。

5 浙江沿海风能资源分布状况分析

由图 5(a)所示的浙江沿海多年平均风速图可见,在距岸线越远的海域平均风速越大,且形成一定的梯度趋势,风速等值线大致平行于海岸线。近岸海域平均风速为 5 ~ 10m/s。在浙江南部和福建近岸海域风速较大。这里靠近台湾海峡,由于台湾海峡海域有显著的狭管效应,使得福建沿海台湾海峡以及相连的浙江南部海域的风速常年显著高于其他海区。该近岸海域平均风速达到 6 ~ 8m/s。相对浙江南部海域,在浙江北部的近岸海域的风速较低,该近岸海域平均风速为 5 ~ 6m/s。在杭州湾,由于受到陆地阻挡,该区域风速较小。

由图 5(b)所示的浙江沿海海面 10m 高度处多年平均风能密度分布图可见,从近岸海域到远离海岸线的海域其风能密度整体呈现梯度变化的趋势。在近岸海域 50km 内平均风能密度为 100 ~ 300W/m²。在浙江南部海域风能资源丰富,该海域的风能密度最大达到 500W/m²。而在浙江中部到北部沿岸海域,高风能密度区域相比较浙江南部沿岸海域,则出现在离海岸线较远的海域。在浙江北部海域,靠近舟山群岛附近大部分海域风能密度约在 100 ~ 200W/m²。在杭州湾风能密度为 100W/m² 以上,相对于陆上,浙江沿海都处于风能资源丰富区。

总之,浙江沿海年平均风能密度线大致与海岸线平行,东西差异大,由东向西呈递减趋势,使开发

利用风能资源亦呈现由陆地向海洋增大的特点。浙江沿海岛屿密布,约占全国岛屿的 1/3,这些岛屿也是我国风能资源最为丰富的地区。

图 7(a),(b),(c),(d)所示分别为浙江沿海春夏秋冬 4 个季节的多年平均风速分布图。浙江沿海地处典型的季风气候区,秋冬季节,在蒙古高压的控制下,北方冷空气大面积影响着浙江沿海海域,这一时期盛行强劲的偏北风,风速较大,另外受到冬季气旋活动的影响,也是造成这一时期内平均风速为全年最大的重要因素。图 7(c)所示为秋季浙江沿海的多年平均风速分布图,从图中可见浙江北部近岸海域平均风速达到 6 ~ 7m/s。浙江南部近岸海域平均风速比北部海域大,达到 8 ~ 9m/s。图 7(d)为冬季浙江沿海的多年平均风速分布图,该时期内平均风速最大,浙江近岸海域的风速普遍在 6 ~ 7m/s 范围,在浙江海域的 50km 范围内,风速最大达到 8m/s。

春季的寒潮范围小,浙江沿海一般不受春季寒潮的影响。在该时期内,浙江沿海风速较小。而夏季,我国大陆为印度低压控制,气压梯度小,浙江沿岸盛行夏季风,势力比冬季风小得多,故造成此时期内风速较秋冬季小得多。由图 7(a),(b)所示,春季浙江沿海风速最小,在浙江南部近岸海域和杭州湾大部分海域平均风速只有 4 ~ 5m/s,低于年平均风速。在浙江南部海域平均风速也只有 5 ~ 6m/s。夏季,浙江近岸海域的平均风速也保持在 5 ~ 6m/s。夏季是浙江沿海台风活动频繁时期,台风天气对浙江沿海的影响虽不可忽视,本文对浙江沿海多年平均风速的统计过程中剔除了台风数据。

孙湘平等^[26]利用水文气象观测资料对浙江沿海进行的评估发现,在浙江舟山群岛至洞头近岸一带海域,秋冬受冷空气的影响,风速较大,年平均风速为 6 ~ 9m/s;春夏风速较小,年平均风速为 4 ~ 6m/s,这与本文研究成果相吻合。

浙江沿海夏季盛行偏南风,冬季盛行偏北风,使得风能的季节分配也表现得较为明显。图 8(a)、(b)分别为浙江沿海春夏和秋冬季节的年平均风能密度分布图。从图中可见,秋冬季节的风能密度明显的高于春夏两季。秋冬受冷空气的影响,风力强劲,风能资源量大。在春夏季节,浙江近岸海域的 50km 内风能密度为 100 ~ 200W/m²,而在秋冬季节,近岸海域 50km 范围内风能密度达到 200 ~ 300W/m²。

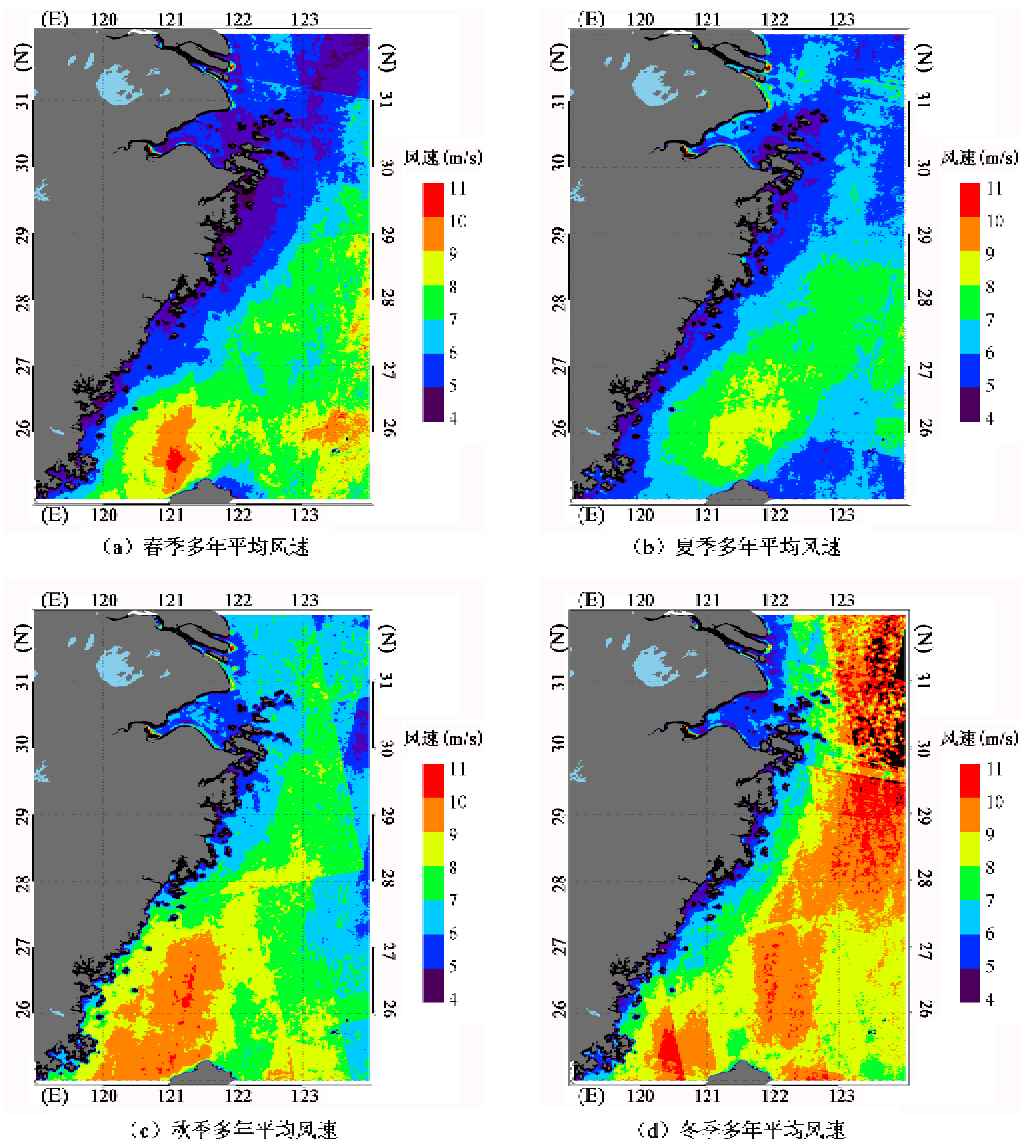


图7 浙江沿海 10m 高度处 500m 分辨率春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)多年平均风速分布图

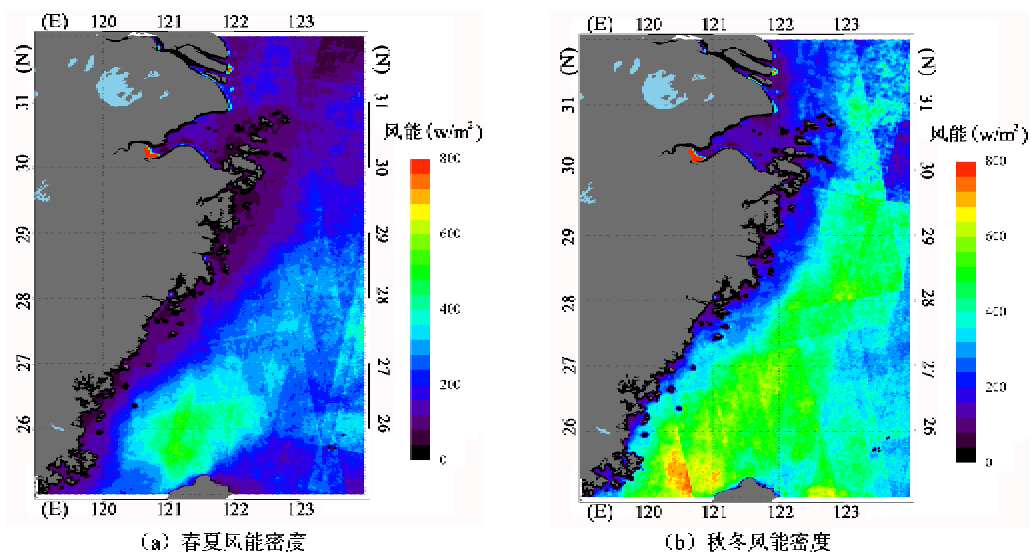


图8 浙江沿海春夏(a)和秋冬(b)风能密度分布图

6 结 论

(1) 利用 ENVISAT ASAR 影像提取的浙江沿海高分辨率风速数据具有较高精度,可作为浙江沿海风能资源评估的高精度、高分辨率风速资料数据。

(2) 基于 ENVISAT ASAR 影像对浙江沿海风能资源评估的结果与浮标观测风速资料评估结果的对比显示,两者相符较好,Weibull 分布参数尺度因子 A 相对误差为 1.59%,形状参数 k 相对误差为 7.83%,平均风速相对误差为 4.86%,年平均风能密度相对误差只有 2.0%,且与传统方式评估浙江沿海的风能资源的结果相吻合。结果表明,基于 ENVISAT ASAR 影像可对近海海上风能资源进行空间分辨率评估,且具有较高精度。

(3) 基于 ENVISAT ASAR 影像对浙江沿海风能资源评估的结果表明,浙江沿海风能资源极为丰富,年平均风速为 5 ~ 10m/s,近岸海域 50km 范围内年平均风能密度达到 100 ~ 300W/m²,其中浙江南部海域风能资源最为丰富,其年平均风能密度最大可达 500W/m²。从近岸到远离海岸线的海域风能密度整体呈现梯度变化的趋势,由东向西呈递减趋势,浙江沿海岛屿也是其风能资源最为丰富地区之一。浙江沿海风能资源在季节变化上呈现为“秋冬季量大,春夏季量小”。在春夏季节浙江近岸海域的 50km 内风能密度达 100 ~ 200W/m²,而在秋冬季节,近岸海域 50km 范围内风能密度达到 200 ~ 300W/m²。

本研究的成果揭示了浙江沿海风能资源分布状况和变化规律,填补了我国在该海域高精度、高分辨率风能资源信息资料的空白,为我国科学制定风电开发目标和规划提供了参考依据。在本研究过程中,只获取了 ENVISAT ASAR 一种卫星数据,在接下来的研究工作中将考虑获取多种 SAR 卫星数据(如 RADARSAT、TerraSAR 等)进行研究。

参考文献

- [1] IEA (2011). IEA Wind Energy Annual Report 2010. <http://www.ieawind.org>
- [2] 闫俊岳,陈乾根,张秀芝等. 中国近海气候. 北京: 科学出版社,1993. 109-132
- [3] 周荣卫,何晓风,朱蓉等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟. 资源科学,2010,32(8): 1434-1443
- [4] Elliott D, Schwartz M, Scott G, et al. Wind energy resource atlas of southeast china. *National Renewable Energy Laboratory*, 2002. 13-27
- [5] 徐经纬. 卫星资料与数值模式在中国近海风能资源评估中的应用研究:[博士学位论文]. 南京:南京信息工程大学,2009. 60-78
- [6] 贺德馨. 中国可再生能源发展战略研究丛书(风能卷). 北京:中国电力出版社,2008. 80-81
- [7] 刘爱民. 宁波气候. 北京:气象出版社,2009. 94-102
- [8] Xue H, Zhou R Z, Yang Z B, et al. Assessment of wind energy reserves in China. *Acta Energiae Sloaris Sinica*, 2001, 22(2): 167-170
- [9] 穆海振,徐家良,杨永辉. 数值模拟在上海海上中的应用. 高原气象,2008,27(S1): 196-202
- [10] 袁春红,薛桁,杨振斌. 近海区域风速数值模拟试验分析. 太阳能学报,2004,25(6): 740-743
- [11] Nielsen M, Astrup P, Hasager C B, et al. Satellite Information for Wind Energy Applications. Denmark: Risønational Laboratory, 2004. 1-56
- [12] Stoffelen A D, Anderson D. Scatterometer data interpretation: transfer function CMOD4. *Journal of geophysical research*, 1997, 102(c3): 5767-5780
- [13] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. *Journal of geophysical research*, 2007, 112 (C03006): 1-18
- [14] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T, et al. Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry. *Journal of geophysical research*, 1998, 103: 7767-7786
- [15] Horstmann J, Koch W, Lehner S. Ocean wind fields retrieved from the advanced synthetic aperture radar aboard ENVISAT. *Ocean dynamics*, 2004, 54: 570-576
- [16] Horstmann J, Koch W. High resolution wind field retrieval from Synthetic Aperture Radar: North sea examples. *Remote sensing of the european seas*, Springer, 2008. 331-342
- [17] Rosich B, Meadows P. Absolute Calibration of ASAR Level 1 Products Generated with PF-ASAR: [Technical Note]. European Space Agency-ESRIN, Frascati, Italy, 2004. 1-26
- [18] 朱瑞兆,薛桁. 我国风能资源. 太阳能学报,1981,2(2): 117-124
- [19] 朱超群. Weibull 分布在风能计算中的应用. 南京大学学报(自然科学版), 1983,19(2): 183-189
- [20] 陈国初,杨维,张延迟等. 风电场风速概率分布参数计算新方法. 电力系统及其自动化学报,2011,23(1): 46-51
- [21] Cohen A C. Maximum-likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples. *Technometrics*, 1965, 7(4): 579-588

- [22] World Meteorological Organization (WMO). Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source:[Technical Note]. Secretariat of the World Meteorological Organization, 1981. 175
- [23] Chang J F, Huang W G, Lou X L, et al. Research on upwelling region wind speed correction method for wind retrieval from SAR imagery along the Zhejiang coast. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8175: 1E1-1E9
- [24] 潘沛,杨永康,徐家良. 上海近海海域风能资源评估研究. 能源技术,2008, 30
- [25] 孙卫国. 气候资源学. 北京:气象出版社,2008
- [26] 孙湘平,姚静娴,黄易畅等. 中国沿岸海洋水文气象概况. 北京:科学出版社,1981. 116-127

Wind energy resource assessment based on ENVISAT ASAR images for the Zhejiang coastal waters

Chang Junfang^{*}, Huang Weigen^{**}, Lou Xiulin^{**}, Shi Aiqin^{**}, Zhang Huaguo^{**}

(^{*} Institute of Ocean Remote Sensing, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(^{**} State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012)

Abstract

The distribution of the offshore wind energy resources along the Zhejiang coast was researched based on the space-borne synthetic aperture radar (SAR) images. The data of long time sequence sea surface wind filed at the height of 10m along the Zhejiang coast were retrieved from 443 scenes of ENVISAT ASAR images obtained from 2005 to 2011. The wind direction data from the global reanalysis data of NCEP-NCAR were used as an input to the geophysical model function CMOD4 for SAR wind retrieval. Based on the wind field data, the wind energy resources were assessed accurately. The Weibull probability density function, parameters of scale (A) and shape (k), from the ENVISAT ASAR-derived wind speed, were respectively compared with that from the buoy observation wind speed, and the results showed that the relative error was 6.36% for A , but 9.67% for k . The characteristics of the Zhejiang coast wind resource distribution were researched. The results showed that the wind energy resources along the Zhejiang coast were rich. The sea surface annual average wind speed at the height of 10m was 5 ~ 10m/s, and the annual average wind power density reached 100 ~ 300W/m² within 50km away from the coastline. The region richest in wind energy resources was located in south sea of the Zhejiang coast, and the largest wind power density reached 500W/m². The seasonal feature of wind resource showed that the wind power was rich in autumn and winter, while it was relatively poor in spring and summer.

Key words: ENVISAT ASAR, Zhejiang coast, sea surface wind field, wind energy resource assessment