

高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究^{*1}

常蕊¹ 朱蓉² 周荣卫¹ 叶冬¹ 张晓伟³ Merete Badger⁴ Charlotte Bay Hasager⁴
Chang Rui¹ Zhu Rong² Zhou Rongwei¹ Ye Dong¹ Zhang Xiaowei³ Merete Badger⁴ Charlotte Bay Hasager⁴

1. 中国气象局公共气象服务中心,北京,100081

2. 中国气象局国家气候中心,北京,100081

3. 浙江省气候中心,杭州,310000

4. 丹麦科技大学风能系,罗斯基勒,DK-4000

1. *Public Meteorological Service Center of CMA, Beijing 100081, China*

2. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

3. *Climate Center of Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310000, China*

4. *Risø Campus, Wind Energy Department, Technical University of Denmark, Frederiksborgvej 399, DK-4000 Roskilde, Denmark*

2013-11-04 收稿,2014-03-04 改回.

常蕊,朱蓉,周荣卫,叶冬,张晓伟,Merete Badger,Charlotte Bay Hasager. 2014. 高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究. *气象学报*, 72(3): 606-613

Chang Rui, Zhu Rong, Zhou Rongwei, Ye Dong, Zhang Xiaowei, Merete Badger, Charlotte Bay Hasager. 2014. An application of high resolution SAR wind retrievals to off-shore wind resources assessment in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(3): 606-613

Abstract In view of the high cost and sparse spatial resolution of the offshore meteorological observation, wind maps retrieved from the satellite synthetic aperture radar (SAR) data are valuable in offshore wind energy planning as a supplement to on site measurements, which is crucial in offshore wind resource assessment. The advanced SAR maps monitored by Envisat in 2002 have been widely used in off-shore wind resource assessment in Europe. The technical methods of off-shore wind resources assessment at Hangzhou Bay based on the near 1 km×1 km SAR wind retrieval data are investigated. Comparison of the in situ wind speeds at Hangzhou Bay and the SAR wind retrieval shows that (1) the relative errors of most off-shore observation stations (13/14) are less than 20%, of which 7 stations less than 10%, and the standard deviation is 2.29 m/s; (2) high consistency has been found on the wind energy parameters (shape parameter and scale parameter) calculated by the SAR wind retrieval and the in situ wind; (3) compared with the control experiment, when the SAR wind retrieval assimilated into the numerical model (WRF), it shows a significant improvement on the wind speed correlation coefficient at most of the observation stations and some decrease in standard deviation as well as relative error, suggesting that high resolution SAR wind retrieval is able to be applied to offshore wind resource assessment in China.

Key words Synthetic aperture radar (SAR), Wind retrieval, High resolution, Numerical simulation, Data assimilation, Off-shore wind resources assessment

摘要 由于海上测风非常昂贵,实地测风资料严重不足,而卫星反演海面风场资料可以有效地弥补这一缺陷,对近海风能

* 资助课题: 中丹合作计划项目“中国复杂风资源相关的风能关键技术研究(2010DFA62830)”和中丹可再生能源发展项目“卫星反演与树脂模拟技术在近海风能资源评估中的综合应用研究(104. Kina. 1. MFS. 4-1-2-2)”。

作者简介: 常蕊,主要从事风能资源评估和预报方法研究。E-mail: changrui@cma.gov.cn

资源评估具有至关重要的意义。近年来,欧洲太空局 2002 年 3 月发射的 Envisat 卫星搭载合成孔径雷达(SAR)图像产品在欧洲近海风能资源评估中得到了广泛应用。文中探讨了空间分辨率约 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的 SAR 卫星反演海面风场资料应用于杭州湾近海风能资源评估的技术方法,通过杭州湾海域的实测风速与 SAR 卫星反演海面风速数据的对比分析发现:(1)14 个实测站点中 13 个站的相对误差小于 20%,其中 7 个站的相对误差小于 10%,平均标准差为 2.29 m/s ;(2)以 SAR 卫星反演风速数据为基础计算的风能参数(形状参数和尺度参数)与实测数据计算结果的一致性较高;(3)将该数据同化进入 WRF 数值模式中,与控制试验相比,大部分检验站点的风速相关系数明显提高,标准差和相对误差也得到改善。SAR 卫星反演风场资料可用于中国的近海风能资源评估。

关键词 合成孔径雷达,卫星反演海面风速,高分辨率,数值模拟,资料同化,海上风能资源评估

中图法分类号 P425.6⁺3

1 引言

风能是最具有大规模开发潜力的可再生能源,其中近海风电开发是未来可再生能源发展新的增长点(张秀芝等,2010),而近海风电开发首先对海上风能资源评估提出了迫切需求。现有的海面风速观测有两种:一种是基于船舶、石油平台、浮标、观测塔和岛屿站等实测气象观测;一种是借助海洋卫星遥感观测。前者可以对局地进行长时间连续观测,但在空间范围上有局限性,而且人力、物力的耗费很高;海洋卫星遥感可以得到整个面上风速的分布情况,但时间分辨率较低,一般一日只有一次或两次或者一周几次观测(Xu, et al, 2008;徐经纬等,2013)。

通常情况下,风能资源评估是通过至少 1 年的风速、风向观测数据进行韦布尔分布拟合而实现的(Christiansen, et al, 2006;王炳兴,1992;Troen, et al,1989),受海上观测站点空间范围的限制,对海上风电场选址而言,大范围整年长度的常规气象观测一般是很难获取的,星载合成孔径雷达(SAR)反演的风速数据较高的空间分辨率很好地弥补了实测气象数据的这一缺陷。同时,从海上风电开发成本估计的角度来看,获取大范围卫星图像的支出要远小于建设海上测风塔进行定点实际观测的费用。基于上述优点,欧洲太空局于 2002 年 3 月发射的 Envisat 极轨卫星所监测的 SAR 图像产品近年来在欧洲近海风能资源评估中得到越来越广泛的应用(Badger, et al, 2010;Hasager, et al, 2008)。

与实测数据相比,SAR 卫星反演海面风场的不确定性主要来源于数据样本内在属性和 SAR 卫星反演精度。数据样本内在属性的问题主要表现在:(1)同一时段内,卫星数据样本数少于实际观测;(2)每幅卫星图像对应一个相对固定的扫描时刻,因此捕捉不到风速的日变化信息;(3)受反演技术特点限

制,SAR 卫星反演风速的有效区间为 $2\text{—}24\text{ m/s}$,风速小于 2 m/s 时不能得到图像,使反演风速可能比实际风速偏大。因此,即使对比检验的反演风速和实地观测风速具有很好的一致性,在卫星反演数据的应用中仍需考虑上述误差的影响。已有研究指出,在统计分析中,上述样本自身属性所带来的误差可以通过足够多的实地观测与卫星反演数据进行对比验证分析而克服(Barthelmie, et al, 2003; Pryor, et al, 2004);自由度达到 60—70 的 SAR 卫星反演图像数量就可以很好地描述平均风速和韦布尔尺度参数。另外,SAR 卫星反演精度与反演技术有关,随着获取的 SAR 卫星图像越来越多,对于特定海域,基于足够多数量的卫星图像而进行的风能资源评估逐渐成为传统的定点实测数据评估的一种有效补充。

欧洲的相关研究已从单幅、多幅卫星反演数据的角度对该反演风速数据的平均风速变化进行了本地化的检验论证(Hasager, et al, 2011; Choissnard, et al, 2005; Schneiderhan, et al, 2005),并证实在开阔海域,SAR 卫星反演海面风速与实地观测风速具有很好的一致性(Horstmann, et al, 2003; Monaldo, et al, 2004; Christiansen, et al, 2008; Kerbaol, 2007),但对于该反演数据在中国近海风能资源评估工作中适用性研究则缺乏讨论。考虑到中国 $1.8\times 10^4\text{ km}$ 的狭长海岸线及 6500 多个岛屿,海洋资源极为丰富,将高分辨率的 SAR 卫星反演风场资料在中国近海海域进行检验应用就显得尤为重要。

本研究以杭州湾海域的浮标站、海洋站以及海上测风观测数据来检验 SAR 反演风场数据在中国近海复杂海域风能资源评估中的准确性。首先选取所关注海域的卫星图像,并对图像反演风场进行必要的质量控制;然后对比检验杭州湾海域内 181 幅

卫星图像的反演风速与对应时刻实况观测风速;在此基础上,进一步计算对比相应的风能参数,最后将 SAR 卫星反演海面风场数据同化进 WRF 数值模式中,以检验 SAR 卫星反演数据在近海风能资料评估中的可行性。

2 数据介绍

2.1 合成孔径雷达卫星图像及反演方法

合成孔径雷达图像来自欧洲太空局 2002 年发射的 Envisat 卫星搭载的先进的合成孔径雷达 (ASAR) 图像产品,该极轨卫星约 100 min 扫描地球一圈,同一点分向上向下两个扫描方位。每一张原始的卫星图像都显示了校准后的雷达后向散射系数,为了减少较长周期的海洋波浪和图像噪音的影响,需要对图像像素进行约 1 km 尺度的平均。根据图像的亮度变化效应和经验的地球物理模型函数 (GMF) 可用于从 ASAR 原始图像到海面风的反演 (Hersbach, et al, 2007)

$$N_{\text{RCS}} = U^{\gamma(\theta)} A(\theta) [1 + B(\theta, U) \cos\Phi + C(\theta, U) \cos 2\Phi] \quad (1)$$

式中, N_{RCS} 为雷达后向散射系数, θ 为雷达入射角, U 为 10 m 高度的风速, Φ 为与雷达朝向相关的风向; A 、 B 、 C 和 γ 为随 GMF 函数而变的经验系数。据此,可得到卫星反演的离海面 10 m 高度的风速。

Envisat 卫星自发射以来已在全球范围内获得了大量的 ASAR 遥感图像,但对于风电开发关心的某一近海区域而言,所能得到的图像是有限的。由于卫星扫描轨道是非固定的,每张图像所覆盖的区域也并不完全一样,此外,可能还会由于降水、油污、海流等影响而无法有效地进行风的反演。因此需要根据关注区域的范围及上述大气、海洋条件的限制对图像进行挑选。经检查,得到杭州湾海域自 2009 年 5 月至 2011 年 12 月的有效 ASAR 图像共有 181 幅。

2.2 海洋站、浮标站和测风塔数据介绍

杭州湾海域的海洋站、浮标站等观测资料由浙江省气候中心提供,具体位置见图 1。该数据收集了杭州湾海域共 13 个实测站点的逐时风速、风向数据,观测高度为离海面 10 m。为与卫星反演风场对比方便,选取 2009 年 1 月至 2011 年 12 月的观测资料。此外,还收集了一个海上测风塔的观测数据,该数据从 2009 年 4 月至 2011 年 12 月,时间分辨率为

10 min, 观测高度为 100、90、80、60、40 和 20 m。

为保证对比检验的一致性,研究中将测风塔观测的各个高度层风速按照风速廓线的简单指数律拟合至 10 m 高度(李宗恺等,1985)

$$\bar{u} = \bar{u}_1 \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^n \quad (2)$$

式中, \bar{u}_1 为 Z_1 高度上的平均风速, n 为稳定度参数。



图 1 杭州湾海域实地测站的位置
(黄色针状为海洋站和浮标站、
红色球状为海上测风塔)

Fig. 1 Spatial distribution of the chosen in situ sites over Hangzhou Bay
(The yellow needle-type objects represent the marine or buoy stations and red balloon-type object represents the offshore mast)

3 对比数据序列的挑选

以杭州湾海域的实测风速检验 SAR 卫星反演海面风速,需对数据进行预处理,使两者在空间、时间上具有可比性。首先,空间上给出杭州湾海域 SAR 卫星反演海面风速分布(图 2a),可见该风速分布图在量值上跳跃性较大,散点多,需要进行去奇异点和平滑处理;如引言中指出, SAR 卫星反演海面风速具有一定的反演有效区间(2—24 m/s);在一定空间范围内(研究中取 5 km × 5 km),利用 2δ 原则剔除跳跃性较大的异常数据;由于近海风能资源评估中所关注的边界层风场尺度为中尺度,需要剔除小尺度噪音的影响,因此,研究中对该数据在 5 km × 5 km 范围内进行空间平滑。

按照上述原则,依次计算 5 km × 5 km 范围内的有效反演数据个数和对应的方差,剔除大于 2δ 的异常数据后,计算 5 km × 5 km 范围内有效反演数据的空间平均值,作为该 5 km × 5 km 范围内的平

滑风速值。在杭州湾海域循环这一过程,最终得到经过质量控制的卫星反演海面风场(图 2b)。

空间上,修正平滑后的每个卫星扫描单点上的风速是其周围 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 范围风速的平均值,利用站点实测风速进行检验时,选择距离实测站点最近的卫星扫描点作为检验对象就具有较好的空间代表性。时间上,由于卫星扫描自身特点,对于某一固定区域,每幅扫描图像对应一个扫描时刻(通常可精确到秒),而海洋站、浮标站的观测为全天候整点时次,测风塔的观测为整 10 分钟,两者在时间上不能达到一一对应。另外,由于 SAR 遥感图像是根据海面风吹起海浪而引起雷达后向散射系数不同而得到的,基于此遥感图像反演的海面风的发生时间(即卫星扫描时刻)比实际海面风的发生时间具有一定的时间滞后性。因此,研究中以每幅卫星图像扫描时刻为基准,在实地观测风速序列中挑选这一扫描时刻所在的整点时次及其前一整点时次,将两个时次的实测风速进行平均后作为该时刻对应的反演风速的检验风速。

杭州湾海域 13 个海洋浮标站和 1 个测风塔共 14 个检测站点分别按照上述对比数据挑选的基本

原则进行计算挑选后,得到 14 对风速(卫星反演和站点实测)序列及其对应的空间对比位置。图 3 给出了空间距离较近的 2 个海洋站(黄色针状)及其对应的卫星扫描点(红色气球)位置。2011 年的误差计算结果显示,图中左上方的卫星扫描点对海洋站的风速相对误差为 7%,而图右下方的卫星扫描点对海洋站的风速相对误差却高达 87%。进一步的分析可见,位于左上方的海洋站的卫星检测扫描点淹没在水域中,反演风速的准确性较高,而右下方海洋站的卫星检测扫描点在陆地上(11 号红色气球),该点反演风速的准确性受到较大影响,因此会导致上述的误差区别。将右下方海洋站的卫星扫描点变换至水域中(22 号红色气球),其相对误差减小至 39%,说明 SAR 卫星反演风速在开阔水域中的反演精度明显好于沿海近海海域。因此,在后续的应用研究中,剔除了距离海岸线 10 km 的反演结果,同时由于该卫星数据在反演过程中未加入杭州湾海域精细化的岛屿分布信息,因此海域中的岛屿未被标注为陆地,反演结果就会存在一定误差,应用中也剔除了这些岛屿附近的反演结果。

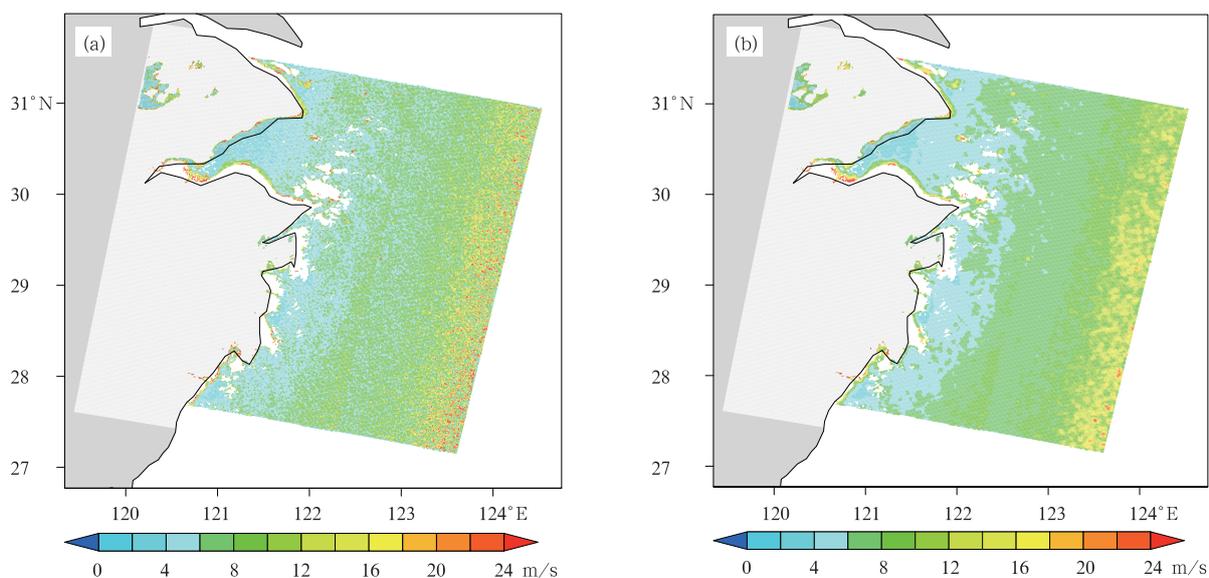


图 2 杭州湾海域 2009 年 12 月 21 日 10 m 高度处

原始反演风速(a)和修正平滑后的反演风速(b)

Fig. 2 Analysis of SAR wind retrieval on 21 Dec 2009 over Hangzhou Bay

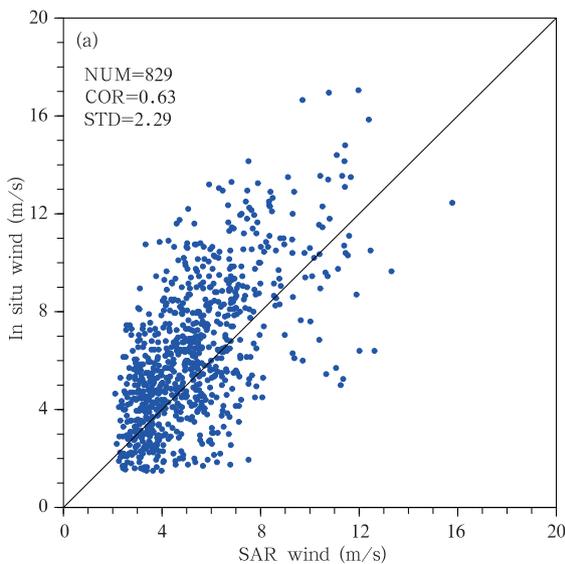
(a. the original wind retrieval, b. wind retrieval through the box averaging)



图3 杭州湾海域2个实测站点与其卫星检测扫描点的相对位置
(黄色针状为实测站、红色球状为SAR卫星扫描点)
Fig.3 Two in situ sites (yellow) and their comparison SAR sites (red) over Hangzhou Bay

4 反演风速与实测风速对比结果

图4a给出了杭州湾海域所有实测站点与对应SAR卫星扫描点风速的对比结果,图中散点基本位于拟合线两侧,且较集中,两种风速序列的一致性较高。图4b进一步给出了风向玫瑰图的对比结果,两者也具有较好的一致性。表1的统计数据显示,所有站点的检测相关系数均通过99.99%的统计信度检验;14个实测站点中13个站的相对误差小于20%,其中7个站的相对误差小于10%;平均标准差为2.29 m/s。大量站点检验的结果充分说明即使在杭州湾这样岛屿分布较为复杂的近海海域,



SAR卫星反演风速仍然具有较高的反演精度,在近海风能资源评估中具有重要的工程应用价值。

表1 杭州湾海域实测站点风速检验
SAR卫星反演风速结果

Table 1 The number of comparing samples, the correlation coefficient, relative error and standard deviation for the in situ measurements as compared with the SAR data

站号	样本数	相关系数	相对误差	标准差(m/s)
K9517	82	0.48	0.17	3.06
K9529	95	0.53	-0.15	2.72
K9554	82	0.61	-0.12	2.43
K9544	64	0.52	0.11	2.63
K9545	65	0.53	-0.13	3.59
K9533	65	0.64	0.01	2.86
K9568	65	0.73	-0.01	2.05
K9524	63	0.74	-0.05	2.36
58472	62	0.79	-0.01	1.90
58473	58	0.61	-0.07	2.63
K9541	59	0.78	-0.24	3.11
K9512	67	0.73	-0.04	2.39
58573	43	0.74	-0.06	2.11

5 风能参数计算

大量的研究表明,双参数韦布尔分布函数更接近风速的实际分布(Christiansen, et al, 2006),因此,在风能参数对比研究中,选取双参数韦布尔概率密度函数,其形状参数和尺度参数是根据观测序列的平均风速和标准差进行估计的(魏光辉等, 2008)。

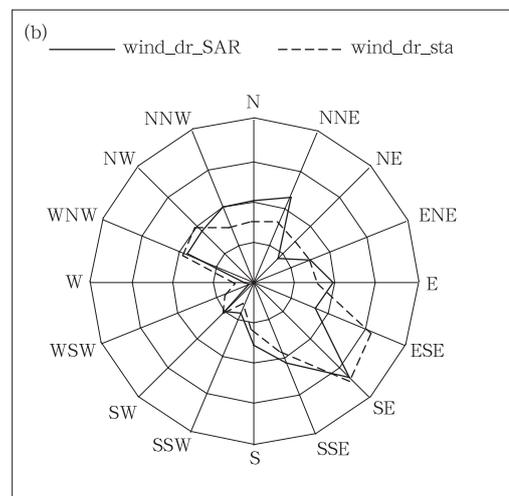


图4 杭州湾海域所有实测站点与SAR卫星反演风速对比(a)和风向玫瑰图(b)
Fig.4 Wind in situ speeds versus SAR wind speeds (a) and wind rose (b) over Hangzhou Bay

以平均风速(V)估计样本的平均值(μ),以标准差(S)估计样本的方差(δ)。即

$$\mu = V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3)$$

$$\delta = S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V)^2} \quad (4)$$

式中, V_i 为计算时段中每次的风速观测值, N 为观测总次数,基于此的形状参数 K 和尺度参数 A 的表达式如下

$$K = \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$A = \mu / \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (6)$$

根据杭州湾海域的风速资料,利用式(3)–(6)分别对 SAR 卫星反演风速和实测风速资料进行韦布尔参数计算,并根据得到的 K 和 A 值拟合曲线。由于韦布尔分布计算中,统计样本数超过一定数量

(一般取 70 左右)才具有代表性,因此,图 5 给出了样本数较大的两个代表站的拟合结果,可见,实况观测与 SAR 卫星反演两种数据拟合出来的曲线基本重合,说明该函数很好地描述出杭州湾海域 10 m 高度的风速分布情况。

进一步将所获取的 SAR 卫星图像进行叠加统计,从该海域 SAR 卫星反演风速的叠加情况(图 6a)可以看出,该海域图像叠加数量最多的有 143 幅,图中黄色区域内的叠加量在 70 幅以上,由此得到的杭州湾近海风速、风能资源统计结果是基本可信的。而从该海域近海 10 m 高度的风速分布(图 6b,水平分辨率为 1 km×1 km)可见,近岸海域的风速基本在 5 m/s 左右,在离岸 100 km 海域内,风速增大到 6.5 m/s 以上。该结果与 2009 年完成的中国近海风能资源储量(肖子牛等,2010)在杭州湾海域随经度的变化特征一致,说明 SAR 卫星反演风场资料具有较高的可信度。

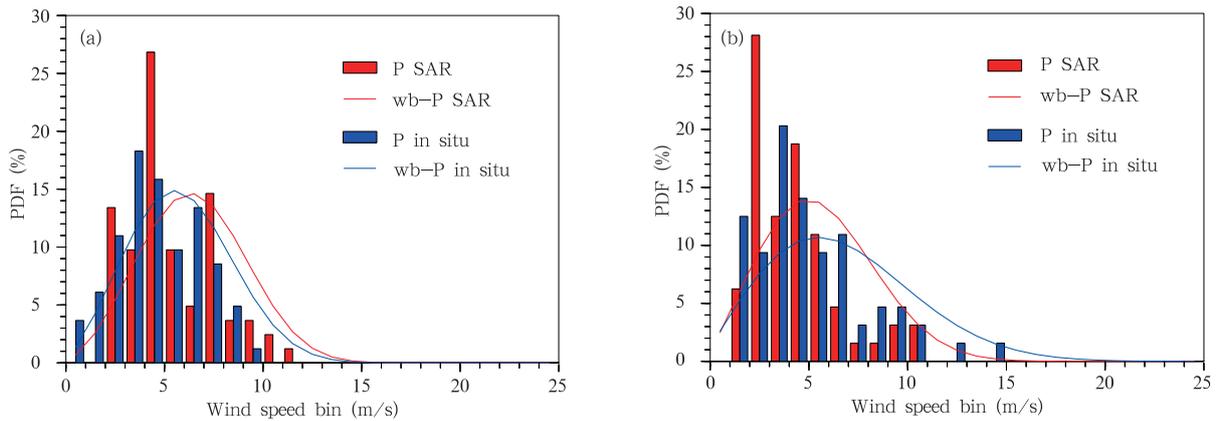


图 5 杭州湾海域具有代表性的海洋站(E1004(a)和 K9568(b))与 SAR 卫星反演风能参数的分布
Fig. 5 Wind speed frequency (histogram) as well as their Weibull fits (curve) at E1004 (a) and K9568 (b) over Hangzhou Bay

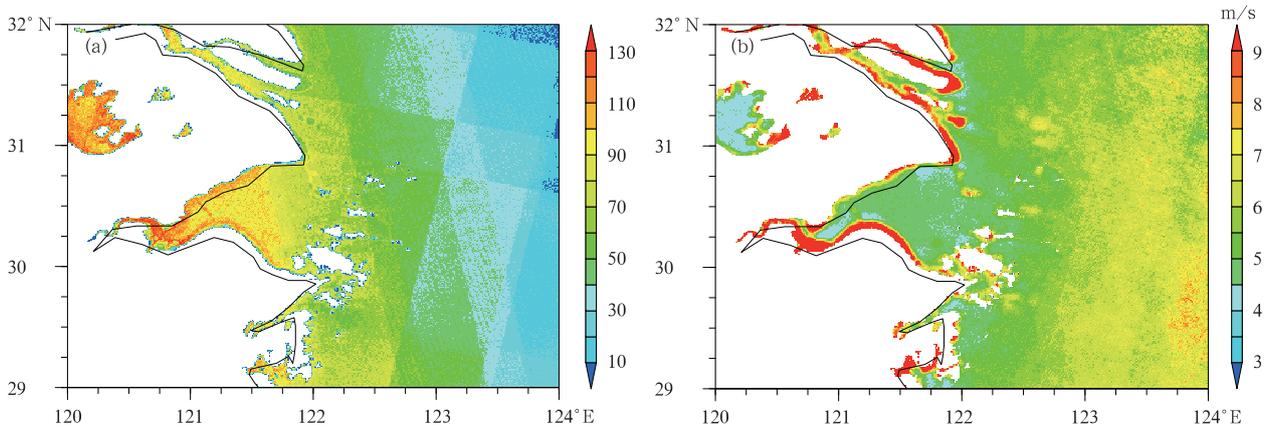


图 6 杭州湾近海海域 SAR 卫星图像的叠加数量(a)和 10 m 高度的风速分布(b)
Fig. 6 Distribution of superimposed number (a) and flattened wind speed at the height of 10 m (b) from the total 181 SAR images over Hangzhou Bay

6 SAR 卫星数据同化的效果分析

为克服 SAR 卫星反演海面风速在时间上的不连续性,同时又充分发挥该数据集在近海风能资源评估中的作用,以杭州湾海域为例,利用 WRF 模式进行 3 km 分辨率的数值模拟试验,选择 2011 年 56 幅 SAR 卫星扫描图像所对应的个例,首先进行控制试验;之后分别将 56 个算例对应时刻的卫星反演海面风速采用牛顿松弛逼近方法进行资料同化,得到 56 个算例的数值模拟结果。以该区域收集的海洋站、浮标站观测数据为标准,对比检验控制模拟试验

和资料同化数值模拟试验的结果(表 2)可见,同化 SAR 卫星海面风场数据之后,13 个检验站点中,10 个站的相关系数有显著提高,10 个站点的标准差明显减小,7 个站点的相对误差得到改善。从同化模拟的 10 m 高度风速分布(图 7)可见,杭州湾近海海域的风速维持在 4.5 m/s 左右,离岸海域的风速逐渐增大至 6 m/s 以上,这一分布特征与图 6 中 SAR 图像叠加结果类似。说明将 SAR 反演海面风速经过资料同化方法应用于近海风能资源数值模拟,在近海风能资源模拟评估中具有广阔的应用价值和潜力。

表 2 杭州湾海域实测风速与控制模拟试验和资料同化的数值模拟海面风速的对比检验结果
Table 2 The comparison results between the control experiment and assimilation experiment validated by the in situ measurements

站号	样本数	相关系数		相对误差		标准差(m/s)	
		同化前	同化后	同化前	同化后	同化前	同化后
K9517	50	0.79	0.78	-0.07	-0.08	2.08	2.17
K9529	51	0.72	0.80	-0.07	-0.14	2.37	2.29
K9554	47	0.71	0.75	-0.14	-0.18	2.30	2.23
K9544	44	0.51	0.54	0.52	0.47	2.93	2.80
K9545	44	0.66	0.57	-0.16	-0.15	3.12	3.41
K9533	51	0.74	0.83	-0.09	-0.10	2.58	2.25
K9568	51	0.74	0.82	0.12	0.04	2.18	1.81
K9524	49	0.75	0.72	0.02	0.00	2.50	2.63
58472	48	0.78	0.80	-0.04	0.00	1.93	1.85
58473	50	0.82	0.83	-0.08	-0.12	2.26	2.28
K9541	49	0.84	0.89	-0.19	-0.20	2.77	2.56
K9512	49	0.79	0.85	-0.08	-0.08	2.18	1.89
58573	49	0.82	0.90	-0.01	0.00	1.92	1.42

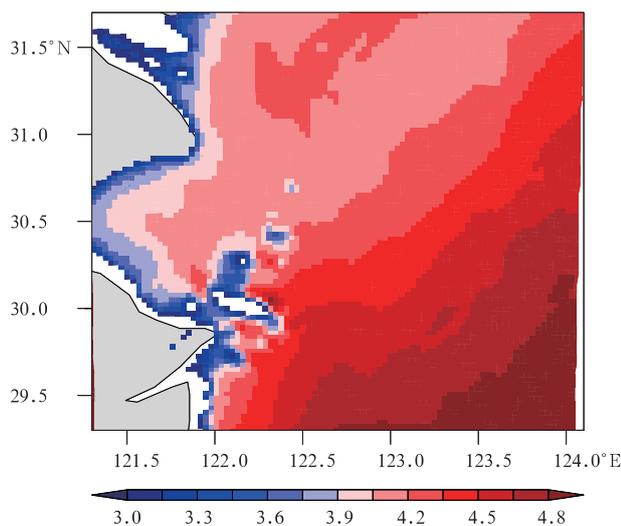


图 7 杭州湾近海海域同化 SAR 卫星资料模拟的 10 m 高度的风速分布(单位:m/s)

Fig. 7 Distribution of the simulated 10 m wind speed after assimilating the SAR data over Hangzhou Bay (unit: m/s)

7 结 论

针对中国近海海域测风资料明显不足的现状,研究了 Envisat 卫星 SAR 图像产品在中国近海风能资源评估中的应用方法。采用杭州湾复杂海域的自动气象站、浮标站和测风塔实测数据对空间分辨率 1 km×1 km 的 SAR 卫星反演海面风场资料的检验结果表明,高分辨率的 SAR 卫星反演风场数据具有较高的可信度;将反演数据利用松弛逼近方法同化进 WRF 数值模式中,使杭州湾沿海及近海海面风速的模拟效果得到明显提高,说明高分辨率 SAR 卫星反演海面风场数据应用于近海风能资源评估是可行的。

由于某一颗卫星反演得到的海面风场资料总是受时间分辨率和空间轨道的限制,不能全面地反映海面风场变化的全部信息。因此,近海风能资源评

估需要应用多颗卫星反演的海面风场资料。随着卫星探测技术的发展,近海风能资源评估结果的准确性会不断提高。

参考文献

- 李宗恺,潘云仙,孙润桥. 1985. 空气污染气象学原理及应用. 北京:气象出版社, 81-84
- 王炳兴. 1992. Weibull 分布的统计推断. 应用概率统计, 8(4): 357-363
- 魏光辉,申莲,何玉春. 2008. 双参数威布尔分布函数在希尼尔水库风速资料分析中的应用. 沙漠与绿洲气象, 2(6): 38-40
- 肖子牛,朱蓉. 2010. 中国风能资源评估(2009). 北京:气象出版社, 35
- 徐经纬,张秀芝,罗勇等. 2013. QuikSCAT 卫星遥感风场可靠性分析及其揭示的中国近海风速分布. 海洋学报, 35(6): 76-86
- 张秀芝, Richard B, 朱蓉等. 2010. 中国近海风电场开发指南. 北京:气象出版社, 32-35
- Badger M, Badger J, Nielsen M, et al. 2010. A wind class sampling of satellite SAR imagery for offshore wind resource mapping. J Appl Meteor Climatol, 49(12): 2474-2491
- Barthelmie R J, Pryor S C. 2003. Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions. J Appl Meteor, 42(1): 83-94
- Choisnard J, Lafrane G, Bernier M. 2005. SAR-satellite for offshore and coastal wind resource analysis, with examples from St Lawrence Gulf, Canada. Wind Eng, 28(4): 367-382
- Christiansen M B, Hasager C B, Thompson D R, et al. 2008. Ocean winds from synthetic aperture radar// Niclos R, Caselles V. Ocean Remote Sensing: Recent Techniques and Applications. Research Singpost: Kerala, India, 31-54
- Christiansen M B, Koch W, Horstmann J, et al. 2006. Wind resource assessment from C-band SAR. Rem Sens Environ, 105(1): 68-81
- Hasager C B, Christiansen M B, Peña A, et al. 2011. SAR-based wind resource statistics in the Baltic Sea. Remote Sens, 3(12): 117-144
- Hasager C B, Peña A, Christiansen M B, et al. 2008. Remote sensing observation used in offshore wind energy. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 1(1): 67-79
- Hersbach H, Stoffelen A, de Haan S. 2007. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. J Geophys Res Oceans, 112, doi: 10.1029/2006JC003743
- Horstmann J, Schiller H, Schulz-Stellenfleth J, et al. 2003. Global wind speed retrieval from SAR. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 41(10): 2277-2286
- Kerbaol V. 2007. Improved Bayesian wind vector retrieval scheme using Envisat ASAR Data: Principles and validation results// Proceedings of Envisat Symposium 2007. Montreux, Switzerland, ESA-SP-636; Paris, France; European Space Agency
- Monaldo F M, Thompson D R, Pichel W G, et al. 2004. A systematic comparison of QuickSCAT and SAR ocean surface wind speeds. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 42(2): 283-291
- Pryor S C, Nielsen M, Barthelmie R J, et al. 2004. Can satellite sampling of offshore wind speeds realistically represent wind speed distributions? Part II: Quantifying uncertainties associated with sampling strategy and distribution fitting methods. J Appl Meteor, 43(5): 739-750
- Schneiderhan T, Lehner S, Schulz-Stellenfleth J, et al. 2005. Comparison of offshore wind park sites using SAR wind measurement techniques. Meteor Appl, 12(2): 101-110
- Troen I, Petersen E L. 1989. European Wind Atlas. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 656pp
- Xu J W, Luo Y, Zhang X Z, et al. 2008. China offshore Wind Energy Resources Assessment with the QuickSCAT Data. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2008, doi:10.1117/12.800296