

0.4~14 μm 中国海域海表反照率时空分布特性

崔生成¹, 朱文越¹, 李学彬¹, 罗涛¹, 张梓晗¹, 张文忠^{1,2}, 韩露^{1,2}, 陆文强^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 复杂海洋环境是空间光电探测的典型应用场景, 可见至长波红外波段海表反照率参数是海洋大气传输与背景辐射特性研究的重要内容。鉴于目前中国海域海表反照率数据缺乏的现状, 在多源卫星长时间观测海洋环境特性参数数据的统计分析基础上, 通过考虑海水叶绿素含量、气溶胶光学厚度、海表面风速和太阳入射角度等参数的复合影响, 建立了海表反照率的快速参数化应用模式, 获得了中国南海、东海、黄海和渤海等典型海域 0.4~14 μm 海表反照率谱线, 掌握了海表反照率的时空分布特征, 为海空光电工程应用提供基础数据支撑。

关键词: 海表反照率; 叶绿素; 风速; 海洋发射率; 天空光

中图分类号: P42;P47 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1212001

Spatiotemporal distributions of 0.4–14 μm ocean surface albedo over China Sea areas

Cui Shengcheng¹, Zhu Wenyue¹, Li Xuebin¹, Luo Tao¹, Zhang Zihan¹, Zhang Wenzhong^{1,2},
Han Lu^{1,2}, Lu Wenqiang^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: Complex oceanic environment (OE) is a typical scene in space photoelectric detection. Ocean surface albedo (OSA) from visible to far-infrared is of great importance to study of ocean atmospheric transfer and background radiative properties. However, the OSA in China Sea areas was less studied at present. This study built a fast parameterized OSA application model on the basis of statistical analysis of multiple-satellite measured long-time OE parameters. The new model took chlorophyll concentration of sea water, aerosol optical depth, ocean surface wind speed and solar illuminating angles into account. The fast parameterized application model of sea surface albedo was established, and the spectral curves of 0.4–14 micron sea surface albedo in the South China Sea, the East China Sea, the Yellow Sea and Bohai were obtained, and spatiotemporal features of OSAs were analyzed. These OSA spectrum provides fundamental data support for space photoelectric engineering applications above seas.

Key words: ocean surface albedo; chlorophyll; wind speed; ocean emissivity; skylight

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(41305019); 十三五装备预研项目(41416030204)

作者简介: 崔生成(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大气参数遥感、建模与目标辐射特性方面的研究。Email: csc@aiofm.ac.cn

0 引言

海表反照率(Ocean Surface Albedo, OSA)是表征海-气边界层处太阳辐射到达海表面并反射回大气被吸收或散射的参量^[1-2],在全球辐射收支计算和能量平衡再分析中有着重要的应用。另一方面,应用于海洋大气环境场景的空间光电探测,同样面临着下伏海表反射特性信息的迫切需求。

与陆表反照率不同^[3],海表反照率除了与太阳入射角度、气溶胶光学厚度有关外,海水叶绿素含量和海表面风速对海表反照率有着不可忽略的影响^[4]。

目前,获取海表反照率主要有测量和模型计算两种方式。海洋站点或固定平台测量可以有效获取某一点的海表反照率^[5],由于不同海域的环境特性不同,从某一海域站点测量的数据难以获得其他海域的海表反射特性。卫星探测很好的弥补了海洋站点稀疏的问题,具有区域覆盖度广且可周期性重复探测的特点。现有能获取海表反照率的卫星除了 SeaWiFS 等少数海色遥感卫星以外,诸如已在轨运行近 18 年的 Terra/MODIS(1999 年 12 月 18 日发射)、近 16 年的 Aqua/MODIS(2002 年 5 月 4 日发射)等地球观测卫星,海表反照率产品欠缺。另一方面,卫星遥感的时间分辨率也难以满足多海域、多时段复杂海况的应用需求。

加拿大 McLinden 等人利用 NASA ER2 机载平台获得了近紫外 300 nm 到可见光 775 nm 不同波长处的海表反照率^[6]。考虑到海面飞沫和白帽常有发生的实际, Koepke^[7]研究了海表面白帽生成与风速的关系,并将其考虑到白帽反射率中。Nicolas 等^[8]同样利用机载平台获得了开放海域可见至近红外波段的海表反照率。尽管机载观测方式是卫星观测数据加密和交叉验证的重要途径,可有效获取特定区域的地表参数,但因其代价昂贵、效费比不高的特点,难以满足广袤海域海表参数的获取需求。

采用数值模型的方法是获取海表反照率的重要手段。Jin 等^[4]利用海-气耦合辐射传输模式计算生成了海表反照率离线查找表,对获取小于 800 nm 波长的海表反照率提供了便捷的实施途径。但对于利用 MODTRAN 开展可见至长波红外的地-气耦合辐射传输计算,波段范围明显不足。崔生成等^[3]利用 DISORT

辐射计算软件,并耦合不同地表(陆地、海洋)的 BRDF 模型,生成了反照率积分核查找表;针对随机起伏的海表面,建立了 0.4~14 μm 海表反照率全谱段计算方法^[9]。

现有 MODTRAN 等通用大气辐射传输软件在地表反照率参数的考虑方面均有待完善,针对国内海域的海表反照率参数更是欠缺。为了满足海洋空间光电探测工程应用的需求,在综合考虑影响海表反照率的诸多因素的基础上,利用 10 余年多达 60 TB 的卫星观测资料,统计建立了中国渤海、黄海、东海和南海等四个海域的大气温湿廓线、气溶胶消光廓线、海表面风场、海水水体叶绿素含量等关键因子的时空分布模式,在此基础上,文中主要针对中国南海海域重点分析 0.4~14 μm 不同季节和年平均海表反照率参数的分布特性,最后给出其他海域的海表反照率时空分布曲线。

1 海表反照率模型构建

太阳入射海表面时,风速超过 4 m/s 时,需要考虑白帽对海表反照率的贡献。有海洋白帽影响下给定波长 λ 处的海表反照率为^[9]:

$$\alpha_{\lambda}(U_{10}, \theta_0, chl, \tau) = (1 - \eta_{wc}(U_{10})) \times \alpha_{\lambda,sw}(U_{10}, \theta_0, chl, \tau) + \eta_{wc}(U_{10}) \alpha_{\lambda,wc} \quad (1)$$

式中: $\alpha_{\lambda,sw}$ 为海水的光谱反照率; $\alpha_{\lambda,wc}$ 为白帽的光谱反照率,两者之间的比例权重由海表面白帽覆盖率 η_{wc} 确定; U_{10} 为海表面 10 m 高度处的风速。对于实际海洋环境,海表面白帽覆盖率的估算需获取海表面的风场信息。利用 U_{10} 获取白帽覆盖率^[10]:

$$\eta_{wc}(U_{10}) = 2.951 \times 10^{-6} U_{10}^{3.52} \quad (2)$$

对于无海洋白帽发生的海表,其光谱反照率包括:(1) 发生在海表面处的漫反射部分以及光子在水下散射后逸至海表面处的漫射出射部分的贡献,称为漫射反照率(用上标“dif”表示);(2) 海表面反射太阳直接入射辐射和海水内部体散射贡献,这一部分为直射反照率(用上标“dir”表示)。因此,海水的反照率可用下式予以计算:

$$\alpha_{\lambda,sw}(U_{10}, \theta_0, chl, \tau) = (1 - f_{\lambda,dif}(\tau)) \times \alpha_{\lambda,sw}^{dir}(U_{10}, \theta_0, chl, \tau) + f_{\lambda,dif}(\tau) \alpha_{\lambda,sw}^{dif}(chl, \tau) \quad (3)$$

式中: f_{dif} 为海表面总的下行辐射中漫散射部分的比

例(即天空光比例因子),可通过地-气耦合辐射传输模式计算获得^[3,11]。叶绿素浓度的影响主要体现在贴海表水层下表面处,调节来自水体内部向上的漫射出射部分,这一部分的等效反射率为 $R_{\lambda,sw}(chl) = 0.33b_{\lambda,b}(chl)/\alpha_{\lambda}(chl)$,其中, $b_{\lambda,b}$ 为海水及其悬浮物质的综合后向散射系数, α_{λ} 为吸收系数^[9]。这样,直射反照率则可重新表示为:

$$\alpha_{\lambda,sw}^{dir}(U_{10}, \theta_0, chl, \tau) = M(\theta_0, U_{10})R_f(n_{sw}, \theta_0) + \frac{S_{\lambda,sw}R_{\lambda,sw}(chl)(1 - M(\theta_0, U_{10})R_f(n_{sw}, \theta_0))}{1 - S_{\lambda,sw}R_{\lambda,sw}(chl)} \quad (4)$$

式中: $S_{\lambda,sw}$ 为水体内部球面反照率; R_f 为菲涅耳反射率(是海水折射率 n_{sw} 和太阳入射天顶角 θ_0 的函数); $M(\theta_0, U_{10})$ 为 R_f 的调节函数,当海表为平面的时候,对应粗糙度为 0,此时,直射反照率即为菲涅耳反射率。对于因风速引起不同粗糙度的海表面,通过引入 Ebuchi-Kizu^[12]和 Cox-Munk^[13]等模型予以表征。这两个模型在计算中长波红外波段海表反照率的性能比对参见下文精度验证部分。

3~14 μm 中长波红外波段的反照率通常与海表风速以及到达水体表面的太阳入射角度有关系^[14]。考虑到不同谱段海表反照率的影响机制不同,同时为了提高模型的运行效率,实际计算海表反照率谱线时,对可见-短波红外(0.4~2.5 μm)波段的海表反照率和中长波红外(3~15 μm)的海表反照率进行并行计算。基于所获得的不同谱段的反照率曲线,通过三次样条插值,从而获得 0.4~14 μm 全谱段的海表反照率谱线^[9]。

2 研究区域与数据处理

中国海域的地理位置分布情况如图 1 所示,其中,南中国海位于北纬 23°37' 以南的低纬度地区,面积约 3 500 000 km^2 ,是连接太平洋和印度洋的重要地带。

通过对多年长时间卫星观测数据进行区域裁剪,分别提取渤海、黄海、东海、南海地区(见图 1)海水水体叶绿素含量、水汽含量、气溶胶光学厚度、海表风速、太阳入射几何等不同参数。针对每类参数,进行时间和空间维度的统计分析,获取上述参数在不同季节及年平均的区域统计结果。利用所构建的 0.4~14 μm 全谱段海表反照率计算模型,计算得到不同海域海表反照率谱的季节及年平均分布曲线。海

表反照率模型包含以下功能模块:

(1) 天空光比例因子计算模块。基于太阳入射几何、气溶胶光学厚度、水汽含量等参数,通过海-气耦合辐射传输模型^[3,11],计算获得南海区域下行辐射天空光比例因子;

(2) 白帽覆盖率计算模块。通过输入海表风速,根据公式(2)计算获取区域海表面白帽的覆盖度;

(3) 海表反照率计算模块。以叶绿素含量、太阳入射几何参数以及白帽覆盖率和天空光比例因子作为输入,根据公式(1)计算获得海表反照率谱线。

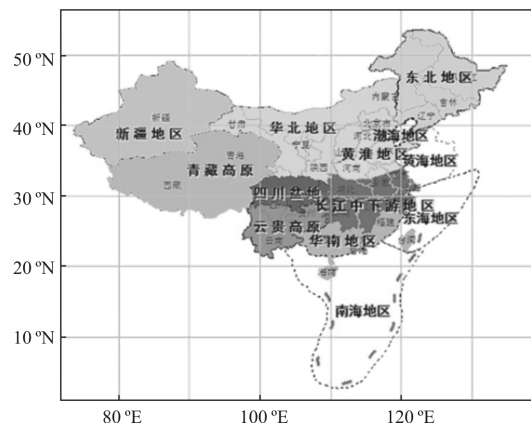


图 1 南海地区地理位置

Fig.1 Geographical position of the South China Sea

表 1 列出了南海区域海表反照率计算模型的四个关键输入参数的季节统计情况。其中,Chl-a 表示叶绿素 a 的含量(单位: mg/m^3), SZA 表示太阳天顶角, AOD@550 nm 表示 550 nm 气溶胶光学厚度。南海春季光学厚度最大,与南海 12 月份~次年 4 月份多海雾以及春季霾的出现有关。AOD@550 nm 主要用来计算入射到南海海表辐射场中漫散射成分的比例。

表 1 海表反照率模型关键输入参数的季节及年平均统计结果

Tab.1 Statistically seasonal and annual average distributions of key input quantities to OSA model

	Winter	Spring	Summer	Autumn	Average
Chl-a/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.307	0.185	0.214	0.271	0.244
AOD@550 nm	0.237	0.291	0.243	0.262	0.259
$U_{10}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8.139	6.121	5.705	6.191	6.572
SZA/(°)	39.208	23.599	22.172	31.412	28.992

3 结果与分析

图 2 给出了不同风速下白帽覆盖率及其有效反射率的大小^[7],由此可以看出,风速小于 4 m/s 时,白帽发生的概率接近 0。南海海域的平均风速基本在 5~8 m/s 之间(如表 1 所示),图中阴影区域绘出的是南海海域白帽的覆盖率水平,基本保持在 0.45% 以内,与 Ren 等^[15]“关于地球低纬度和赤道附近海域的白帽覆盖度低于 0.5%”的结论相符。

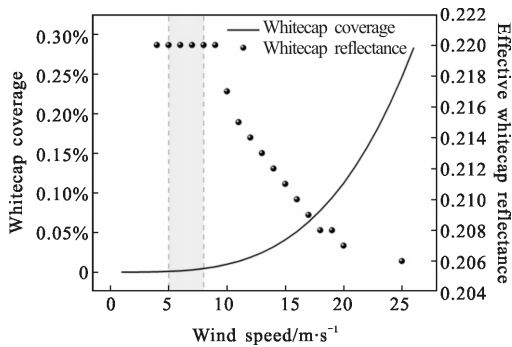


图 2 白帽覆盖率、白帽反射率随风速的变化

Fig.2 Whitecap coverage and its reflectance versus wind speed

图 3 所示为随着波长增加天空光比例因子逐渐降低,相对南海海域全年的入射辐射情况来看,夏季天空光比例因子最小,春季最大,冬秋两季与平均水平接近。

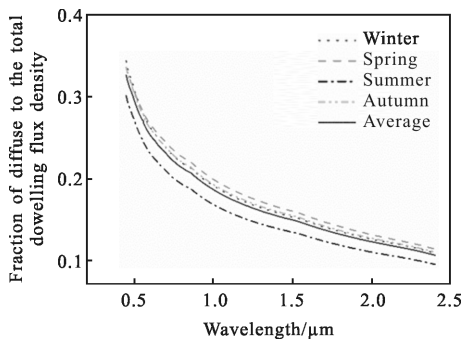


图 3 南海区域天空光比例因子的季节分布

Fig.3 Seasonal distributions of skylight ratio factors in South China Sea

从公式(1)看出,海表反照率主要来自海水和白帽两部分的贡献。450~825 nm 波长处、太阳直射和海表漫射不同大气条件下,考虑白帽前后的反照率如图 4 所示。结果表明,在南海区域,不考虑白帽的

影响,会给海表反照率的估算带来 4%~7% 的负偏。图 5 中不同条件下谱线的数值差异,也反映出叶绿素含量对海表反照率的影响。以上数值结果表明,可见-近红外波段海表反照率计算模型中考虑水体叶绿素和白帽影响的必要性和合理性。

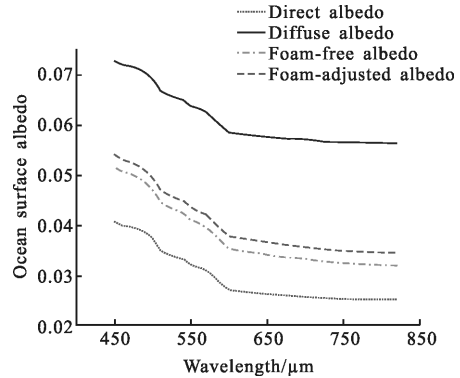


图 4 可见-近红外南海区域海表反照率不同组分的贡献
Fig.4 Contributions of different components to the visible-NIR OSA in South China Sea

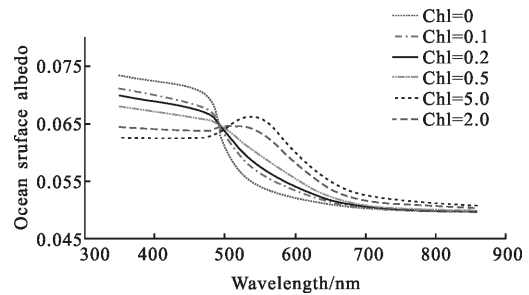


图 5 可见-近红外波段叶绿素含量对海表反照率的影响
Fig.5 Influence of chlorophyll concentrations in visible-NIR band on OSA

图 6 为利用前面建立的海表反照率计算模型获得的南海区域 0.4~14 μm 波段区间的海表反照率谱。

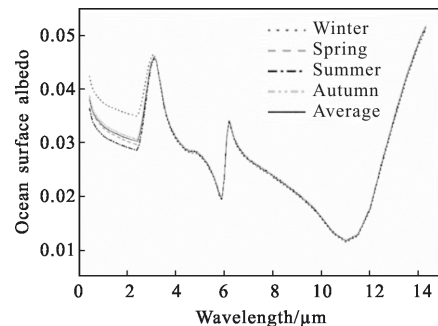


图 6 0.4~14 μm 南海区域海表光谱反照率
Fig.6 Spectral OSA between 0.4 and 14 μm in South China Sea

海洋反照率在 3.6~14 μm 谱形相同,只是幅度上存在少许变化,其原因在于中长波红外区间的海表反照率主要受太阳入射角度和海表面风速影响;在可见-短波红外部分对海表反照率产生影响的海水叶绿素对中长波红外部分海表反照率基本没有贡献。

为了验证模型的精度,文中分别将可见-红外波段(0.45~1.65 μm)和中长波(3.5~14.3 μm)波段的季节和年平均结果与 Jin 等人^[4]的参数化模型进行了比较。其中,平均相对误差 $r=(R_{our\ results}-R_{Jin\ et\ al})\times 100\%/R_{Jin\ et\ al}$ 。

可见-红外波段(如图 7(a)所示),平均相对误差为-3.37%,最小值为-1.76%,最大值为-11.85%。其中,冬、春、夏、秋四季平均偏差分别为-5.29%、-2.8%、-2.4%、-2.92%。造成这一负偏现象,是由于文中所构建的模型顾及了白帽反照率在近红外波段(0.85~

1.65 μm)的波长依赖特性。与可见-近红外(0.45~0.85 μm)波段白帽反照率的波长不变特性不同^[4],在超过 0.85 μm 的近红外波段,白帽本身的反照率随波长增大而减小^[16]。此外,使用不同白帽覆盖度和风速的关系模型,也会造成最终结果的些微偏差。

中长波红外波段(如图 7(b)所示),比较了分别基于 Ebuchi-Kizu^[12]和 Cox-Munk^[13]两种海浪谱密度分布的粗糙度模型生成的海表反照率,发现两者存在高度的相关性。中长波红外波段,海表反照率主要是由海水折射率和随机起伏海表面元的有效入射角度决定的菲涅耳反射的贡献^[14]。

利用所构建的模型,基于不同环境特性参数时空分布卫星观测数据的统计分析结果,文中进一步获得了中国渤海、黄海和东海三个海域的海表反照率季节和年平均谱线,如图 8 所示。不同海域海表反

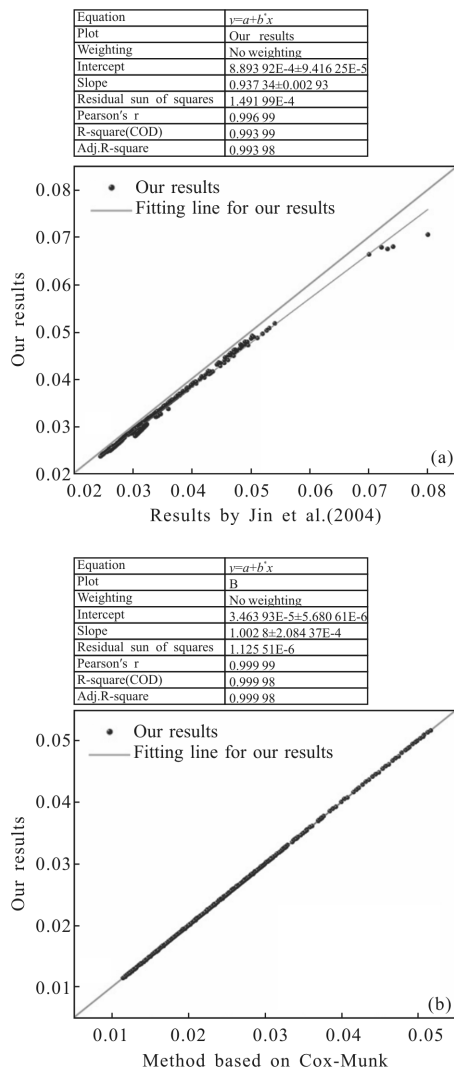


图 7 两种模型结果比较

Fig.7 Comparisons between results from two models

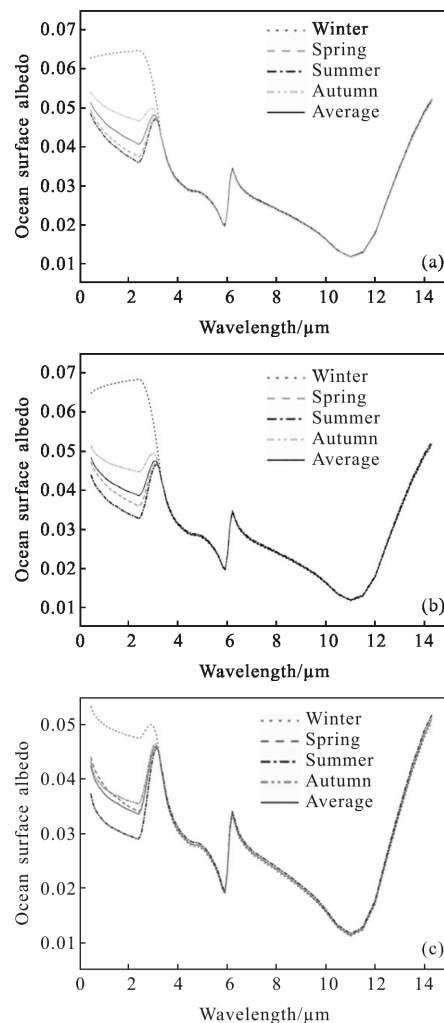


图 8 渤海(a)、黄海(b)和东海(c)区域海表反照率季节分布

Fig.8 Seasonal distributions of ocean surface albedo in Bohai (a), the Yellow Sea (b) and the East China Sea (c)

照率谱线的形状基本相似,尤其是在中长波红外部分。可见-短波红外部分,冬季国内海域的反照率时空分布出现不同程度的谱形变化。其中,南海和东海区域冬夏两季和平均模式差异较大,而渤海和黄海冬、夏、秋三季均和平均模式存在差异。

需要指出的是,文中所获得的反照率谱线的最终精度主要受制于模型驱动参数的不同卫星数据产品的精度以及统计误差,与模型相关的精度验证与评估工作将另文报道。

4 结 论

可见至长波红外波段的海表反照率是海洋应用场景空间光电工程应用的必要参数。文中针对中国海域广袤的地理分布特点,顾及海洋环境时空分布复杂的特征,综合考虑了太阳入射几何、气溶胶光学厚度、海表面风速以及可见-近红外波段近海水叶绿素的影响,在统计不同海域环境特性参数的基础上,利用建立的海表反照率全谱段计算模型,获得了 0.4~14 μm 中国不同海域的海表反照率光谱曲线,为开展区域大气传输和背景辐射特性的准确计算和大气辐射效应的校正提供支持。

致 谢

感谢 NASA Goddard Earth Sciences Distributed Active Archive Center (GES DAAC)提供的 MODIS 叶绿素浓度、光学厚度等数据下载、Remote Sensing Systems (RSS) 提供的 AMSR-E Level 3 海表风速数据下载。

参考文献:

- [1] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Guo Caili, Zhou Shijian, translated. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese)
- [2] Wielich B A, Wong T, Loeb N G, et al. Changes in Earth's albedo measured by satellite[J]. *Science*, 2005, 295: 841-844.
- [3] Cui S, Wang Z, Yang S. Parameterization of land surface albedo[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 110101.
- [4] Jin Z, Charlock T, Smith Jr W, et al. A parameterization of ocean surface albedo[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L22301.
- [5] Jin Z, Charlock T P, Rutledge K. Analysis of broadband

solar radiation and albedo over the ocean surface at COVE [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 2002, 19 (10): 1585-1601.

- [6] McLinden C A, McConnell J C, Griffioen E, et al. Estimating the wavelength-dependent ocean albedo under clear-sky conditions using NASA ER 2 spectroradiometer measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(15): 18801-18811.
- [7] Koepke P. Effective reflectance of oceanic whitecaps [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(11): 1816-1824.
- [8] Nicolas J M, Deschamps P Y, Frouin R. Spectral reflectance of oceanic whitecaps in the visible and near infrared: Aircraft measurements over open ocean [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(23): 4445-4448.
- [9] Cui Shengcheng, Zhu Weiyue, Li Xuebin, et al. Full spectrum calculating method for random waved ocean surface albedo applicable for ocean environments China, G01N21/552: 2016108192314[P]. 2016-09-12. (in Chinese)
- [10] Monahan E C, O' Muircheartaigh I G. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(12): 2094-2099.
- [11] Cui S, Zhen X, Wang Z, et al. Toward a new radiative-transfer-based model for remote sensing of terrestrial surface albedo [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3842-3845.
- [12] Ebuchi N, Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(3): 477-486.
- [13] Cox C, Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [14] Nalli N R, Smith W L, Huang B. Quasi-specular model for calculating the reflection of atmospheric-emitted infrared radiation from a rough water surface [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9): 1343-1353.
- [15] Ren D, Hua F, Yang Y, et al. The improved model of estimating global whitecap coverage based on satellite data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(5): 66-72.
- [16] Frouin R, Schwindling M, Deschamps P. Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared: In situ measurements and remote sensing implications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C6): 14361-14371.