

卫星遥感中国海域气溶胶直接辐射强迫^{* 1}

邓学良^{1,2} 何冬燕³ 潘德炉² 孙照渤⁴

DENG Xueliang^{1,2} HE Dongyan³ PAN Delu² SUN Zhaobo⁴

1. 安徽省气象科学研究所,安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥, 230031
2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室,国家海洋局第二海洋研究所,杭州, 310012
3. 安徽省气候中心,合肥, 230061
4. 南京信息工程大学大气科学学院,南京, 210044

1. *Anhui Institute of Meteorology, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China*

2. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*

3. *Anhui Climate Centre, Hefei 230061, China*

4. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2008-08-09 收稿,2008-12-08 改回.

Deng Xueliang, He Dongyan, Pan Delu, Sun Zhaobo. 2010. Aerosol direct forcing estimated from satellite data over the China Sea. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(5):666-679

Abstract Using the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) scanner, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, Fu-Liou radiative transfer model and Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS), we provide estimates of shortwave aerosol direct radiative forcing (SWARF) at the top of atmosphere (TOA) over the China Sea. The results show that (1) the shortwave radiation fluxes at TOA from CERES have a good linear correlativity with the aerosol optical thickness (AOT) at 550 nm from MODIS in Terra over the China Sea. Their correlation coefficient can reach 0.9, suggesting that aerosol has a remarkable effect on shortwave radiation fluxes at the TOA and, aerosol direct radiative forcing at TOA is very important over the China Sea; (2) based on the linear correlativity, instantaneous aerosol direct shortwave radiative forcing (F_s) over the China Sea can be directly computed by combination of CERES radiation flux data with MODIS aerosol products. The time variation and spatial distribution of F_s over the China Sea are presented. In time, seasonal change is very obvious. F_s gets its maximum in spring and its minimum in summer with its intermediate values occurred in fall and in winter. In space, the spatial distribution of F_s represents a regional feature. F_s is larger in shore and smaller in remote oceanic areas. Its isolines parallel the coast and it decreases with the increasing distance from the coast, implying that aerosol over the China Sea is from continental aerosol source. Meanwhile, in value, a negative linear correlation is found between F_s and AOT550 at the all seasons, which suggests that aerosol reduces the incoming solar radiation at the TOA, and thus aerosol direct forcing is a cooling effect opposite to greenhouse effect. In this paper, F_s from satellite data is converted to the daily averaged SWARF (F_d) by the scaling factor which is computed based on the Fu-Liou radiative transfer model. The F_d distribution over the China Sea is then presented. Finally, the F_d from satellites is compared to the result simulated by the SPRINTARS aerosol model. It is found that there is a good agreement between the simulated and satellite results.

Key words Aerosol, Radiative forcing, Remote sensing, China Sea

* 资助课题:安徽省自然科学基金项目(090415216)、卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金项目(SOED0911)、武汉区域气象中心科技发展基金项目(QY-Z-200902)、江苏省气象灾害重点实验室基金项目(klme05001)。

作者简介:邓学良,从事气溶胶气候效应研究。E-mail:dengxueliang9989@yahoo.com.cn

摘要 利用搭载在 Terra 卫星上的 CERES 和 MODIS 两颗传感器所提供的大气辐射通量和气溶胶数据,结合 Fu-Liou 辐射传输模式和 SPRINTARS 气溶胶模式,对中国海域气溶胶在大气顶的短波直接辐射强迫进行了研究。结果表明:(1) 在中国海域,CERES 的大气顶短波辐射通量与 MODIS 在 550 nm 处气溶胶光学厚度(AOT550)存在着非常好的线性相关关系,相关系数 0.9 左右,说明中国海域气溶胶对于大气顶的短波辐射通量作用是显著的;(2)利用这一线性相关关系,在中国海域,结合 CERES 和 MODIS 两颗传感器数据直接计算获取气溶胶瞬时短波直接辐射强迫(F_s)。计算发现 F_s 具有明显的时间变化规律和空间分布特征:在时间上, F_s 具有明显的季节变化,春季最大而夏季最小,秋、冬季介于两者之间。在空间上, F_s 具有明显的区域分布特征,等值线沿着海岸线分布,随着离岸距离的增加而减小,这一特征说明陆源气溶胶是中国海域气溶胶的主要来源。同时,在数值上,AOT550 与 F_s 在 4 个季节中都存在着相当好的负相关关系,说明气溶胶减少了进入大气顶的短波辐射,总体来说是“冷室作用”;然后,利用 Fu-Liou 辐射传输模式计算获得修正因子,将卫星获得的 F_s 转化为日平均短波直接辐射强迫(F_d),得到中国海域的气溶胶日平均短波直接辐射强迫的分布;最后,利用 SPRINTARS 气溶胶模式的模拟结果,与上述卫星获得的日平均短波直接辐射强迫进行了比较,两者具有非常好的一致性。

关键词 气溶胶,辐射强迫,卫星遥感,中国海域

中图法分类号 P405

1 引言

2007 年 IPCC 第 4 次报告中定义辐射强迫是指计算某种强迫因子所引起的对流层顶净辐射通量的变化(IPCC,2007)。本文将这一定义引申到气溶胶上,定义气溶胶辐射强迫为:由于气溶胶的存在所引起的在大气顶的出射辐射通量的变化。由于气溶胶的小尺度特征,它主要作用于短波波段,所以主要讨论气溶胶对短波波段的的作用,它以大气顶表面单位面积的能量(W/m^2)来表示,其量值的大小可以表征气溶胶对全球能量平衡的影响。气溶胶辐射强迫的大小,与其含量的时空变化和本身的光学性质有关(石广玉,1992)。

气溶胶的辐射效应主要表现在两个不同方面:(1)直接辐射强迫。增加太阳辐射向地球外的反射,反射作用的增强使得到达地面的太阳辐射减弱;同时由于其散射和吸收作用改变对大气的辐射加热作用(Jacobson,2001;马晓燕等,2005;吴润等,2004)。(2)间接辐射强迫。气溶胶可以成为云凝结核,通过增加云微滴数量增加云的光学厚度和云层反射率;同时也可能增加云的寿命和平均云量(Boreon, et al,2002)。大气中对流层气溶胶的浓度在最近几年由于人类活动的排放(既有气溶胶粒子本身的直接排放,也有其前体物的排放)而有所增加,从而使得辐射强迫增加(IPCC,2001)。气溶胶通过直接和间接辐射效应对气候产生深远影响,这是当前大气科学研究的热点问题之一。近 20 多年来在气溶胶气候效应研究方面已开展了大量工作,如利用区域气候模式(Zhou, et al,1998)和三维全球气候模式

(Zhang, et al,2001)等分别研究了硫酸盐气溶胶和烟尘(黑碳)气溶胶的气候效应,但研究结果仍然存在很大不确定性,原因之一是对气溶胶物理、化学和辐射特性的时空分布特征及演变规律还不甚了解,特别是对亚洲大陆地区气溶胶辐射强迫的研究还有待进一步加强。

随着经济高速发展和人口迅速增加,中国大部分地区气溶胶光学厚度显著上升,是全球气溶胶高值区之一。研究认为中国区域气候变化的一些特点可能与气溶胶有密切关系,如四川盆地气温下降(Li, et al,1995),20 世纪 80 年代以来中国“南涝北旱”的降水变化格局(Menon, et al,2002),中国东部地区大气稳定程度增加,降水减少,这些现象可能与中国高气溶胶浓度且吸收较高有关(Zhao, et al,2006)。这些研究表明气溶胶通过直接和间接辐射强迫在区域乃至全球气候变化中发挥着重要作用,因此加强气溶胶辐射强迫的研究是十分必要的。目前,中国的气溶胶观测主要集中在陆地上(毛节泰等,2005),Li 等(2007)对东亚区域对流层气溶胶的光学特性和辐射强迫进行了研究和说明;夏祥鳌等对中国北部(Xia, et al,2007a)以及长江三角洲区域(Xia, et al,2007b)的气溶胶特性和辐射强迫进行了分析。而在中国海域几乎没有固定的气溶胶观测站,李正强等(2003)利用多波段太阳辐射计测量黄海海域的气溶胶光学厚度;赵崴等(2005)研究发现,春季无云情况下黄海、东海上空的气溶胶光学厚度在 0.2—0.4,海区上空霾层较厚时测量得到的气溶胶光学厚度明显增大,最大接近 0.8。但是船载测量由于观测仪器以及船只等客观因素的限制,存在

着观测区域窄、时间短和费用高等缺点,无法对气溶胶进行全方位的观测。20世纪90年代以后,利用卫星探测数据进行气溶胶的反演弥补了船测的缺点,TRMM、Terra、Aqua卫星都搭载了专门的测量气溶胶的传感器,对气溶胶的各个参数进行大范围长时间的连续观测,为我们充分了解气溶胶的辐射特性及气候效应提供了条件。

本文利用搭载在同一颗卫星上(Terra)的两个不同的传感器(CERES和MODIS)所提供的数据,对中国海域的气溶胶直接辐射强迫进行了分析和研究。

2 研究区域与数据

本文研究区域为(10°—45°N, 110°—150°E)(图1),包括了大部分中国海域以及西太平洋海域。研究数据是2000年12月至2001年11月共计12个月的Terra卫星上CERES传感器的数据,选取CER_SSF_Terra-FM1-MODIS_Edition2B数据(Alexander, et al, 2005),它同时融合了MODIS_Collection004的气溶胶产品(Remer, et al, 2005)。选取的物理量有:大气顶短波辐射通量(F)、气溶胶光学厚度(AOT)和云量等。

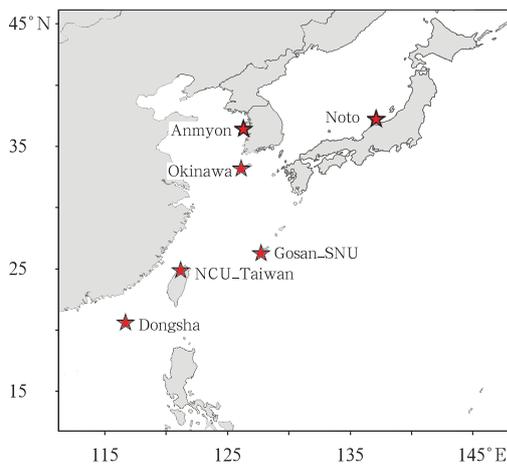


图1 研究区域和 AERONET 地基点分布(五角星)

Fig. 1 Research region and the AERONET stations (marked with five-angle stars)

搭载在 TRMM、Terra、Aqua 卫星上的辐射探测仪 CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)主要用来监测地气系统中大气顶短波和长波辐射能量收支状况,有3个宽波段通道,分别是短波通道(0.3—5 μm),总通道(0.3—200 μm),

窗区通道(8—12 μm)。但该探测仪不能直接获取辐射通量,因此发展了角度分布函数 ADMS(Angular Distribution Models)算法(Loeb, et al, 2005a, 2005b),可将所测辐射率转换为基于卫星上的辐射通量,所有反演数据都包含在 CERES_SSF(SSF: Single Scanner Footprint TOA/Surface Fluxes and Clouds)的 Level2 数据产品中,具体转换公式为

$$\hat{F}(\theta_o, \theta, \phi) = \frac{\pi L(\theta_o, \theta, \phi)}{R_j(\theta_o, \theta, \phi)} \quad (1)$$

$$R_j(\theta_o, \theta, \phi) = \frac{\pi \bar{L}_j(\theta_o, \theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \bar{L}_j(\theta_o, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (2)$$

\hat{F} 为辐射通量, L 为卫星所测的辐射率, R_j 为在第 j 类情景类型下的角度分布(情景类型是指地表、大气等状况的分布类型), θ_o 为太阳天顶角, θ 为卫星观测天顶角, ϕ 为卫星相对于太阳的观测方位角。

同时, CERES_SSF 数据还融合了 MODIS 数据, 主要包括气溶胶光学厚度(李正强等, 2001)、云量等。对全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度分析发现陆上 AOT 明显偏高,而在海洋上,陈本清等(2005)利用 AERONET 数据对 MODIS 的 550 nm 处气溶胶光学厚度在中国海域的精度进行了验证,满足 NASA 的设计要求。

SPRINTARS 是由日本九州大学发展的气溶胶模式。它的水平分辨率有3种,垂直方向上有20层,时间步长为20 min。在 SPRINTARS 气溶胶模式中,包括了4类气溶胶:含碳气溶胶、硫酸盐气溶胶、沙尘气溶胶和海盐气溶胶。模式自带了1850和2000年两套各种气溶胶的源排放清单。本文主要是利用该模式对于卫星结果进行比较验证。

3 研究方法

本文讨论的是晴空条件下气溶胶对大气顶短波辐射通量的强迫作用。晴空条件下大气顶气溶胶短波直接辐射强迫是指无气溶胶晴空条件下大气顶的短波辐射通量与有气溶胶晴空条件下大气顶的短波辐射通量的差值,如式(3)。它反映了大气气溶胶对于地球系统的能量平衡的影响,IPCC在2001年的报告中将气溶胶的直接辐射强迫作用称为“冷室效应”。

$$F_s = F_{\text{clr}} - F_{\text{aero}} \quad (3)$$

其中 F_s 是晴空条件下大气顶气溶胶短波直接辐射强迫, F_{clr} 是无气溶胶晴空条件下大气顶的短波辐射

通量, F_{aero} 是有气溶胶晴空条件下大气顶的短波辐射通量。从式(3)出发, 结合两颗传感器(CERES 和 MODIS)数据, 直接计算得到中国海域晴空条件下大气顶气溶胶短波直接辐射强迫的方法算法流程(图2)。

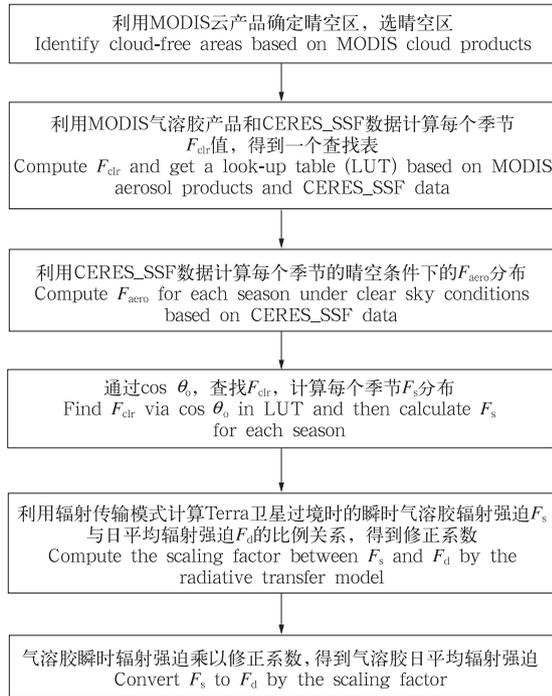


图2 利用卫星数据计算气溶胶直接辐射强迫算法流程图

Fig.2 Flow chart of computing SWARF by satellite data

(1) 剔除云区, 选择晴空区

CERES 自带了晴空比例参数这一变量, 选取 CERES 晴空比例参数大于 99.9% 的数据认为是晴空区。同时 CERES 数据的分辨率为 20 km × 20 km, 与 MODIS 数据 1 km × 1 km 的分辨率相比, 分辨率过低, 为更好地剔除 CERES 中足迹的有云区域, 利用高分辨率的 MODIS 云产品对 CERES 中足迹进行第 2 次的云剔除(表 1)。

(2) 计算 F_{clr}

F_{clr} 主要是利用 CERES 的大气顶辐射通量和 MODIS 的气溶胶光学厚度间的线性关系得到, 并建立查找表。

Christopher 等(2002)发现 CERES 大气顶短波辐射通量与 MODIS 在 550 nm 处气溶胶光学厚度存在非常好的线性关系, 而在中国海域这一关系还

没有被发现。从 2001—2003 年平均的 12 个月份 AOT550 与 F 线性回归(图 3)可以看出, 在相同月份中, AOT550 与 F 都存在着明显的线性相关关系。无论是在沙尘气溶胶盛行的春季(3、4、5 月), 还是在由于降雨剧增、气溶胶稀少的夏季(6、7、8 月), F 都是随着 AOT550 的增加而增加, 随着 AOT550 的减小而减小, 它们存在着明显的线性相关, 而且这一关系在一年中的 12 个月 F 与 AOT550 的相关系数都稳定在 0.9 附近。相关系数最小的是夏季(0.7908); 最大的在冬季(0.9394)。这说明在中国海域 F 与 AOT550 的这种关系是稳定的而且客观存在的。

表 1 晴空区数据挑选条件

Table 1 The clear sky condition of data selection

Surface index	= 17, 海洋
CERES Clear sky percent	> 99.9 %
MODIS Cloud fraction	< 0.1 %
θ_0	< 60°
θ	< 60°

在中国海域, 在相似的大气状态和气溶胶成分下, CERES 的 F 与 MODIS 的 AOT550 存在着明显的线性相关关系。所以, F 与 AOT550 存在着线性相关关系表示为

$$F = F_{clr} + s \cdot \tau_{550} \quad (4)$$

式中 F 为晴空条件下大气顶的短波辐射通量; F_{clr} 为无气溶胶晴空条件下大气顶的短波辐射通量; s 为斜率; τ_{550} 为在 550 nm 处的气溶胶光学厚度(AOT550)。由式(4)可知, F_{clr} 定义为 AOT550 等于 0 时的晴空条件下大气顶的短波辐射通量。我们不可能直接测量得到 AOT550 等于 0 时的 F , 为此必须通过 F 与 AOT550 的线性关系, 拟合得到 F_{clr} (图 4)。

建立中国海域 F_{clr} 的查找表, 必须考虑到大气的状态、气溶胶的种类以及太阳天顶角对于卫星观测的影响, 为此假设在同一季节, 同一区域, 同一太阳天顶角范围内, F_{clr} 是一个常值。

这种假设的主要依据: 首先, 在同一季节里, 大气状态和气溶胶组成都是相似的。只有在这一假设的前提下, 我们才能利用 F 与 AOT550 的线性相关关系进行 F_{clr} 的计算; 其次, 从式(1)可以看出, F 主要是太阳天顶角、卫星观测天顶角和卫星相对于太阳的观测方位角 3 个变量的函数。而在同一季节

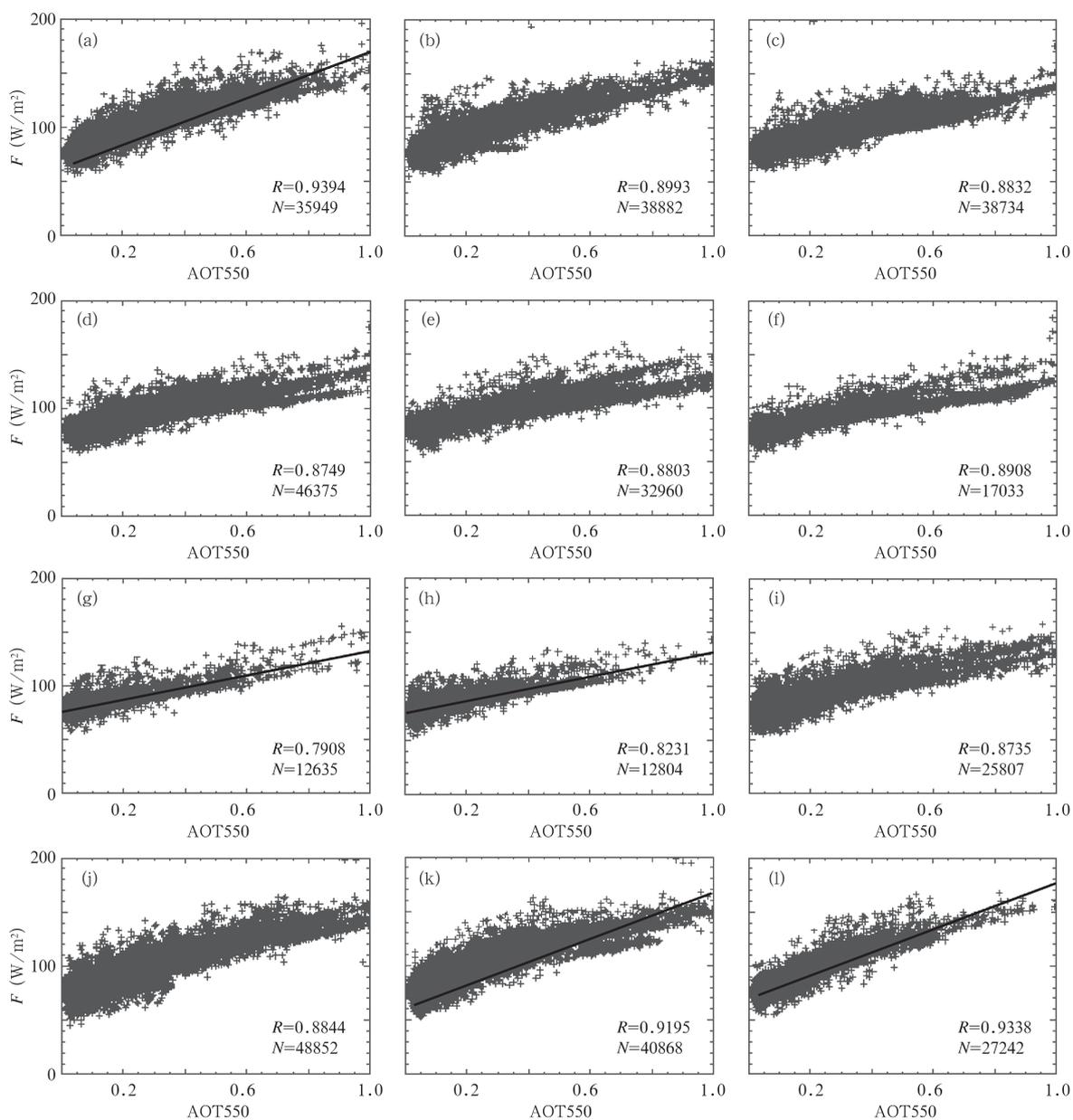


图3 2001—2003年的3年平均的12个月份AOT550与 F 线性回归图

(a. 1月, b. 2月, c. 3月, d. 4月, e. 5月, f. 6月, g. 7月, h. 8月, i. 9月, j. 10月, k. 11月, l. 12月)

Fig. 3 Linear regression diagram of the averaged AOT550 vs. F over 2001–2003

(a. Jan, b. Feb, c. Mar, d. Apr, e. May, f. Jun, g. Jul, h. Aug, i. Sep, j. Oct, k. Nov, and l. Dec)

里, F 主要是太阳天顶角的函数; 最后, 将整个海区划分为 $5^\circ \times 5^\circ$ 的若干个海区, 对每一个海区进行 F_{clr} 计算, 反应了不同海表下垫面状况对 F_{clr} 的影响。

为了验证这一结果, 我们利用 NASA 提供的 Fu-Liou 辐射传输模式对 2001 年年平均的 F_{clr} 进行了计算, 并与卫星拟合计算获得的 F_{clr} 进行比较(图 5): 对于不同的 $\cos \theta_0$, F_{clr} 的模式结果和卫星拟合结果在数值上都非常一致, 尤其是在 $\cos \theta_0$ 大值时, 结果吻合相当好。可知, 利用 CERES 大气顶短波辐

射通量与 MODIS 在 550 nm 处气溶胶光学厚度的线性关系拟合得到的 F_{clr} 是可信的。

(3) 计算 F_{aero}

可以直接从 CERES 数据通过 ADMS 方法转化得到, 见式(1)。CERES_SSF 数据中已经包括了 F_{aero} 。

(4) 计算气溶胶瞬时直接辐射强迫

气溶胶瞬时直接辐射强迫(F_s)是指在 Terra 卫星过境的这一个时刻(大约在 10 时 30 分, 北京时),

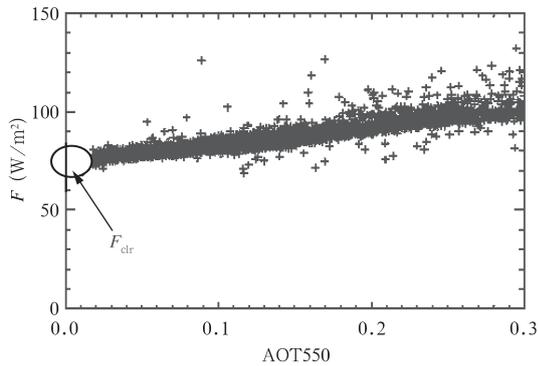


图4 F 与 AOT550 线性拟合分布
Fig. 4 Linear fitting diagram for the AOT550 vs. F

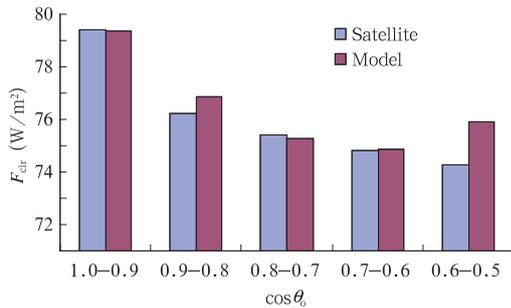


图5 2001年中国海域的年平均 F_{clr}
Fig. 5 Comparison of the yearly averaged F_{clr} between satellite result and model result in 2001 over the China Sea

气溶胶对于大气顶辐射通量的改变量,它代表的是气溶胶对大气顶辐射通量的瞬时作用的概念。将海区、太阳高度角和季节代回查找表找到对应的 F_{clr} , 并与第3步计算得到的 F_{aero} 相减,得到该区域的气溶胶瞬时直接辐射强迫。

(5) 计算日平均修正因子

日平均气溶胶直接辐射强迫 (F_d) 指的是气溶胶直接辐射强迫在一天中的一个平均值,它反映了气溶胶在一天中对大气顶辐射通量的影响的平均作用。Kaufman 在 2000 年的研究表明,在 F_d 和 F_s 的不同点中,太阳天顶角的变化是最主要的,所以在将 F_s 转化成 F_d 时,主要考虑到太阳天顶角的因素 (Kaufman, et al, 2000)。 F_d 流程如图 6。由于瞬时辐射强迫并不能代表该区域的平均状态,所以我们通过辐射传输模式计算得到 Terra 卫星每天过境时间(10 时 30 分)的瞬时辐射强迫与日平均辐射强迫的比值,作为瞬时辐射强迫转化为日平均辐射强迫的修正因子(式(5))。修正因子(S)的计算主要是

通过 NASA 提供的 Fu-Liou 辐射传输模式实现(参数见表 2)。最后,建立修正因子的查找表(表 3)。

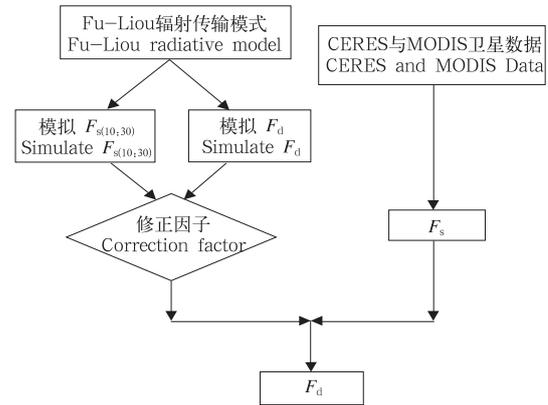


图6 日平均气溶胶强迫 F_d 计算流程
Fig. 6 Flow chart for computing the daily averaged F_d based on satellite data

表2 Fu-Liou 短波辐射方案
Table 2 The shortwave radiative scheme in the Fu-Liou model

波段划分	18 个波段,其中短波 6 个:0.2-0.69,0.69-1.3, 1.3-1.9, 1.9-2.5,2.5-3.5 以及 3.5-5 μm
辐射算法	3 种: δ -4 流近似方案、 δ -2 流近似方案和 GWTSA 方案
地面反照率	只对到达地面的总太阳辐射进行考虑
瑞利散射	有
短波吸收气体	H_2O 、 O_3 、 O_2 、 CO_2
气溶胶种类	10 种: maritime、continental、urban、waso、ssam、sscm、suso、mitr、minm、miam
辐射强迫方案	3 种:云辐射强迫、气溶胶辐射强迫和(云+气溶胶)辐射强迫

表3 2001年中国海域 14 个区域中心点修正因子的季节平均

Table 3 The seasonally averaged scaling factor in 2001 at the central point for each of the 14 areas over the China Sea

		110°E	120°E	130°E	140°E
冬季	36°N		3.0234	2.9941	2.9950
	28°N		2.7068	2.6020	2.5373
	20°N	2.6236	2.4200	2.2601	2.1824
	12°N	2.4199	2.1600	1.9947	1.9199
春季	36°N		1.8272	1.7172	1.6981
	28°N		1.7671	1.6494	1.6038
	20°N	1.9510	1.7277	1.6151	1.5705
	12°N	1.9553	1.7182	1.6097	1.5745
夏季	36°N		1.5386	1.4485	1.4401
	28°N		1.5532	1.4703	1.4407
	20°N	1.8044	1.5911	1.5106	1.4791
	12°N	1.8929	1.6593	1.5640	1.5323
秋季	36°N		2.4465	2.3640	2.3643
	28°N		2.2105	2.0971	2.0622
	20°N	2.2200	2.0121	1.8906	1.8567
	12°N	2.0809	1.8595	1.7499	1.7214

$$S = \frac{F_{s(10;30)}}{F_d} \quad (5)$$

(6) 计算日平均直接辐射强迫

将修正因子乘以第 4 步的计算得到的瞬时 F_s , 就可以得到日平均 F_d 。

4 结果分析

4.1 有气溶胶晴空条件下大气顶的辐射通量和 AOT550

气溶胶直接辐射强迫效应主要受到气溶胶的分布状况影响,所以在进行中国海域气溶胶直接辐射强迫计算前,必须先来分析一下该海域气溶胶光学厚度和大气顶的辐射通量的分布情况。

首先从 2001 年中国海域 550 nm 处气溶胶光学厚度的分布情况(图 7)看, AOT550 存在着明显的

季节变化特征:在春季,借助盛行的西风作用,大量的陆源气溶胶和沙尘气溶胶被输送到中国沿海,并迅速占据大部分海域, AOT550 在中国海域达到一年中的最大值;而与此相反,在夏季,由于降水沉降作用和东风输送作用的共同影响, AOT550 在整个海域的值都偏小,达到一年中的最小值;而在秋、冬两季, AOT550 处于春、夏季的过渡阶段,数值也介于两者之间; AOT550 还存在着明显的空间分布特征:从 4 个季节的共同特征看, AOT550 都是近岸大于远海,反映了一个人为影响的作用。在冬、秋两季, AOT550 的分布主要是沿海岸线分布,近岸大于远海的特征非常明显。在近岸, AOT550 大于 0.3,尤其是在长江三角洲沿岸, AOT550 甚至超过了 0.6,而在远海 AOT550 都小于 0.1, AOT550 在近岸和远海差距明显;在春季, AOT550 除了具有沿岸分布

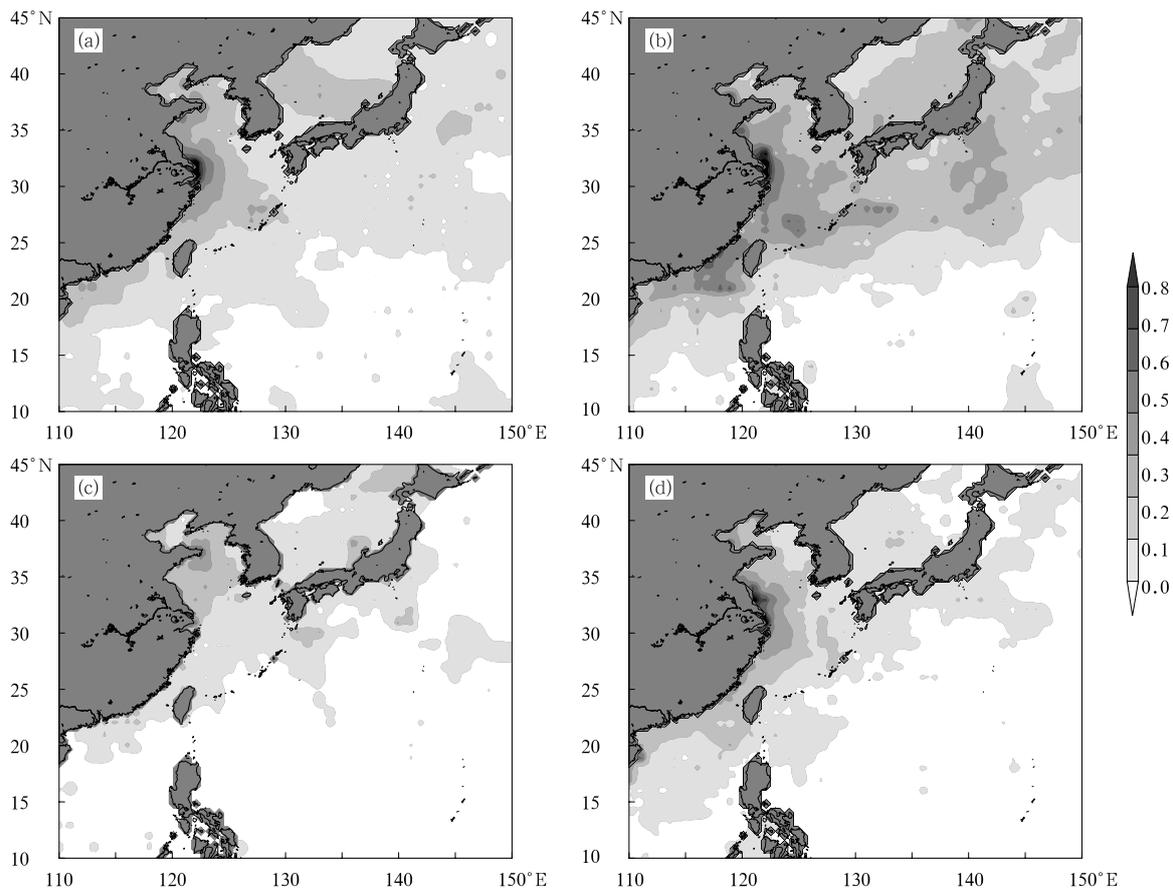


图 7 2001 年中国海域 AOT550 的时间和空间分布

(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季)

Fig. 7 Seasonal distribution of the AOT550 in 2001 over the China Sea

(a. Winter, b. Spring, c. Summer, and d. Autumn)

的特征,还可以清楚地看到南北分布的特征。在 25°N 以北的海域,AOT550 与其他季节比较普遍偏高,与同时期的南部海域相比也是明显偏高,整个北部海域的 AOT550 都在 0.3 以上,这主要是由于春季该海域受到强的西风控制,有利于陆源气溶胶尤其是沙尘气溶胶的向海输送。而同时段 25°N 以南的 AOT550 则依然控制在 0.1 以下;在夏季,由于东风控制中国大部海域,陆源气溶胶无法到达中国海上空,同时降雨在夏季达到一年中的最大值,使得大量的气溶胶被雨水的沉降作用清除,整个海域的 AOT550 基本上都在 0.15 以下,只有在黄、渤海海域存在 AOT550 的大值区,中心浓度也只有 0.3。

通过以上分析,可以看出 2001 年中国海域 AOT550 存在明显的时间和空间分布特点,这种特点必然会对气溶胶的辐射强迫作用产生重要的影响。

根据式(3)可知,为了获得瞬时气溶胶直接辐射强迫, F_{aero} 是必须得到的量,而 CERES 传感器并不能直接测得大气顶的辐射通量,它所测得是大气顶的辐射率,必须通过 Loeb 改进的角度分布函数(ADMS)将其转化为大气顶的辐射通量,如式(1)。从 2001 年中国海域 F_{aero} 的时间和空间分布(图 8)可以看出, F_{aero} 和 AOT550 一样存在明显的时间和空间分布特征, F_{aero} 的分布特征和 AOT550 都非常相似。

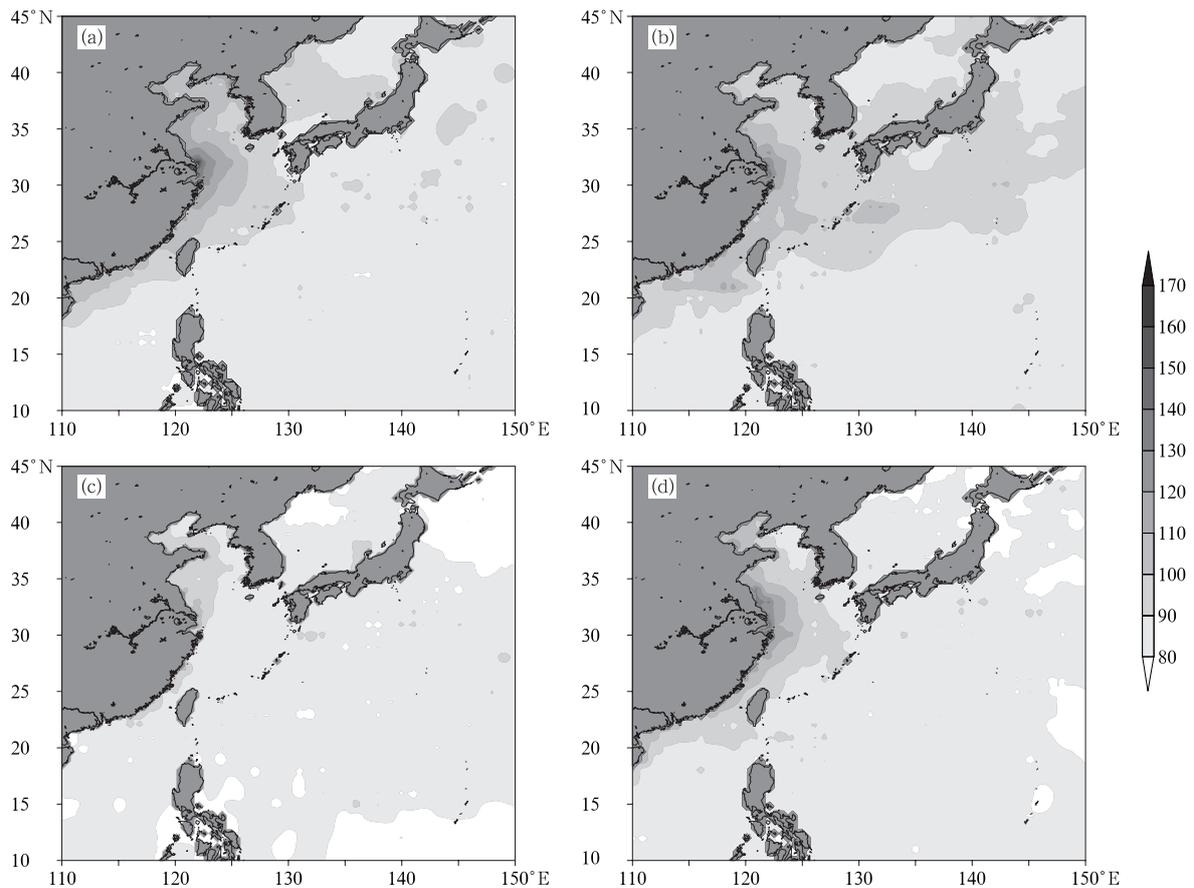


图 8 2001 年中国海域 F_{aero} 的时间和空间分布
(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季;单位: W/m^2)

Fig. 8 As in Fig. 7 but for F_{aero} (unit: W/m^2)

在时间上, F_{aero} 存在明显的季节变化特征,春季最大,夏季最小,而在秋、冬两季介于两者之间。在空间上, F_{aero} 主要是沿着海岸线分布,随着离岸距离的增加, F_{aero} 是不断减小的;同时在春季,北部海域

F_{aero} 明显偏大;而在夏季,整个海域 F_{aero} 都明显偏小。

从以上的分析可以看出, F_{aero} 与 AOT550 的分布特征非常相似,说明气溶胶对于大气顶的辐射通

量的影响是很大。中国沿海作为世界上气溶胶主要的聚集区之一,气溶胶的辐射强迫对于大气顶的辐射通量作用是显著的。

4.2 气溶胶瞬时直接辐射强迫

从中国海域的 F_s 分布状况(图 9)可见, F_s 的时空分布特征与 AOT550 的十分相似:从时间上看, F_s 与 AOT550 的时间特征相似,其绝对值在春季达到最小,在夏季最大,冬、秋季介于两者之间。在空间上,

F_s 的分布特征与 AOT550 也是非常接近, F_s 沿着海岸线分布,其绝对值随着离岸距离的增加, F_s 却是不断减小;在春季,在北部海域的 AOT550 是明显偏大,但同时 F_s 的绝对值在该区域也是明显偏大的;在夏季, F_s 只是在黄、渤海出现绝对值大值区,与 AOT550 的大值相对应;在冬季,中国沿海和日本海的 AOT550 都有大值区存在,而同时 F_s 在该区域也出现了绝对值大值区,秋季的情况与冬季相似。

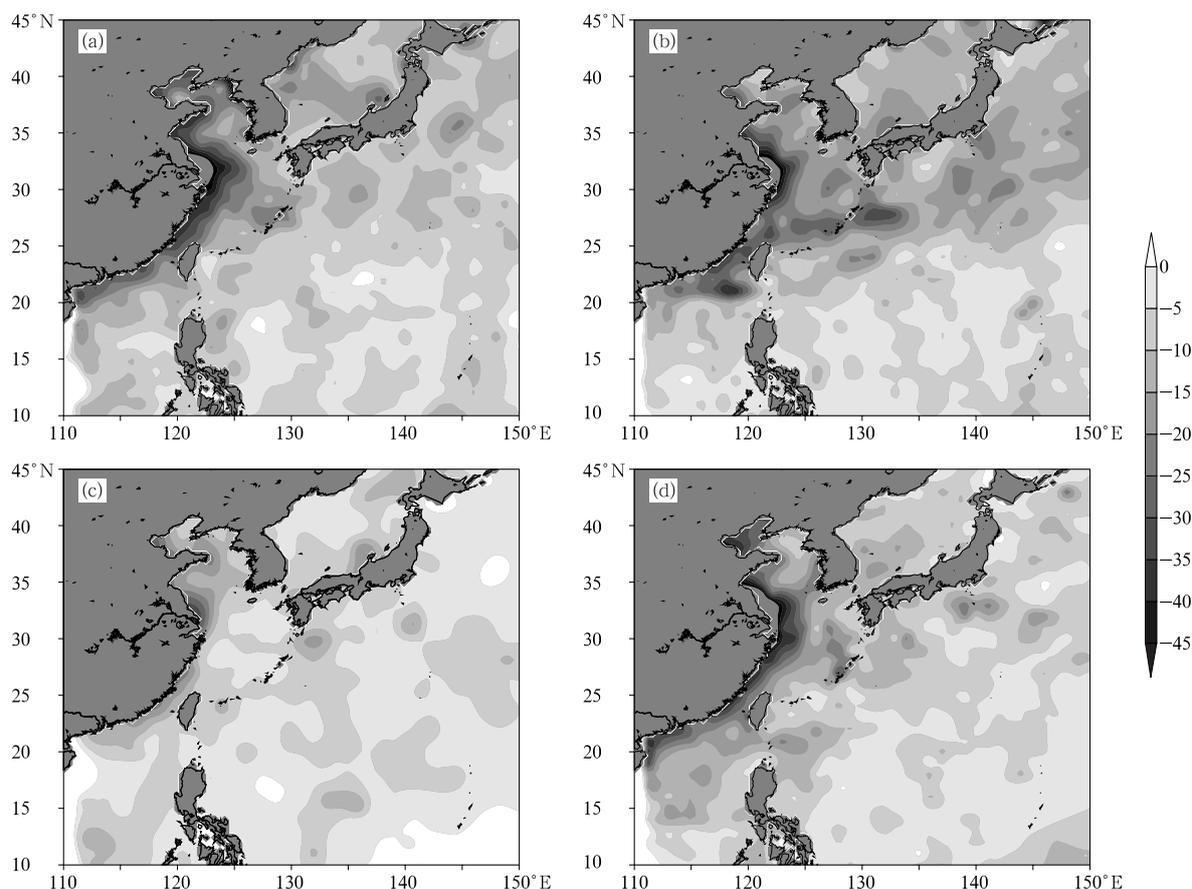


图 9 2001 年中国海域瞬时 F_s 的时间和空间分布

(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季; 单位: W/m^2)

Fig. 9 As in Fig. 8 but for F_s .

通过以上综合分析 AOT550 和 F_s 的分布,可以看出它们存在相似分布特征,说明 AOT550 与 F_s 存在着紧密地联系,气溶胶对大气顶的辐射通量的影响是明显的,气溶胶直接辐射强迫作用在中国海域是非常重要的。为了进一步说明气溶胶的直接辐射强迫作用,给出了 AOT550 与 F_s 的线性相关图(图 10)。从图 10 可以看到,在 4 个季节中 AOT550 与 F_s 都有非常好的相关关系,相关系数绝

对值都大于 0.9,说明 F_s 主要受到 AOT550 的影响,气溶胶的分布直接决定了气溶胶直接辐射强迫作用。同时也要注意,它们间是负相关关系,说明气溶胶减小了进入地球的能量,对整个地球能量系统来说是“冷室作用”。从 4 个季节来看,AOT550 与 F_s 都是负相关关系,随着 AOT550 的不断增大, F_s 是线性递减的。当 AOT550 趋于 0 时,四个季节的 F_s 同时都趋向于 0,说明当 AOT550 很小,也就

是气溶胶很少的时候,气溶胶对于大气顶辐射通量的影响很小,气溶胶直接辐射强迫作用就变的不那

么明显了。这一负相关关系与前人的研究是非常一致的。

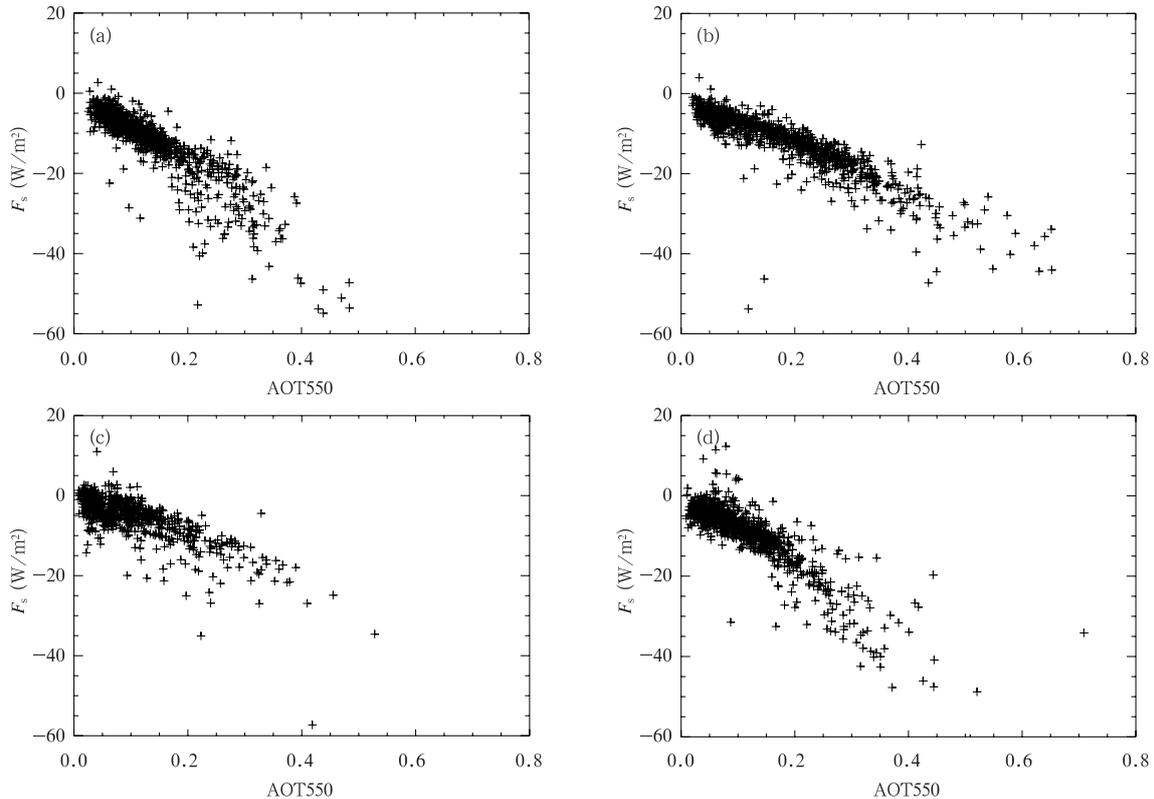


图 10 2001 年中国海域瞬时 F_s 与 AOT550 的线性相关关系
(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季)

Fig. 10 Hovmöller diagram of F_s vs. AOT550 over the China Sea for
(a) winter, (b) spring, (c) summer, and (d) autumn in 2001

同时也要注意,在不同季节里, AOT550 与 F_s 的相关关系也是有不同的。最明显的是 AOT550 与 F_s 拟合直线的斜率绝对值有所不同。斜率绝对值在秋、冬季最大,在春、夏季最小。这一斜率反映了气溶胶对大气顶辐射通量的影响能力的高低。为此我们引入了气溶胶辐射强迫效率这一概念。气溶胶辐射强迫效率(E_{aero})是指单位气溶胶光学厚度(AOT550)的变化所引起的大气顶辐射通量的改变值(单位是 $W/(m^2 \cdot \tau)$)

$$E_{aero} = \frac{F_s}{\tau_{550}} \quad (6)$$

E_{aero} 反映了气溶胶对于大气顶辐射通量的强迫能力,是气溶胶直接辐射强迫的一个重要指标。 E_{aero} 越大,说明 AOT 变化单位大小时,所引起的 F_s 变化就越大,气溶胶直接辐射强迫的能力就越强;反之,则气溶胶直接辐射强迫的能力就越弱。 E_{aero} 随着时间和空间的变化非常剧烈,具有明显的局地性

和局时性,而且它还受到气溶胶成分的影响,不同种类气溶胶对于太阳光的作用能力是不同的。对于一个区域,在已知该区域 E_{aero} 的前提下,可以很简单的通过 AOT550 的值估算出该区域的气溶胶直接辐射强迫。表 4 给出了 2001 年中国海域 E_{aero} 、AOT550 和 F_s 的季节平均值。从整个海域的情况看, E_{aero} 在冬季和秋季最大,在春季和夏季最小,与 AOT550 和 F_s 的情况都不相同,这主要是由于在中国海域气溶胶在不同季节的组成成分不同所引起的。在春季,沙尘暴盛行,陆源气溶胶以沙尘气溶胶为主,借助强烈的西风输送,中国海域尤其是北部海域受沙尘气溶胶影响很大,沙尘是该海域气溶胶的重要组成成分,沙尘气溶胶作为大颗粒气溶胶,它对太阳光的削弱能力要小于小颗粒气溶胶,所以导致在春季 E_{aero} 很小;夏季,在东风和降雨的共同作用下,陆源气溶胶无法到达中国海上空,降雨沉淀了大量的气溶胶粒子,使得此时气溶胶主要以海盐气溶

胶为主。和沙尘气溶胶相似,海盐气溶胶作为大颗粒气溶胶,它对太阳光的削弱能力也要小于小颗粒气溶胶,所以夏季的 E_{aero} 也很小;与春、夏不同,在秋、冬两季,陆源气溶胶以小颗粒人为气溶胶为主,借助盛行的西风,大量的人为气溶胶被输送到中国海域,此时该海域上空的气溶胶以小颗粒气溶胶为主,而小颗粒气溶胶对太阳光的削弱能力要强于大颗粒气溶胶,所以秋、冬季的 E_{aero} 要大于春、夏两季,达到一年中的最大。

表4 2001年中国海域 AOT550、 F_s 和 E_{aero} 的季节平均值
Table 4 Seasonal averaged AOT550, F_s and E_{aero} in 2001 over the China Sea

	AOT550	F_s (W/m^2)	E_{aero} ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \tau)$)
冬季	0.1396	-9.9389	-71.1955
春季	0.1833	-10.8485	-58.0726
夏季	0.1031	-5.2939	-51.3465
秋季	0.1175	-8.8905	-75.6556

从以上分析可以看出,在中国海域,气溶胶的瞬时辐射强迫作用非常显著,气溶胶对该区域大气顶的瞬时辐射通量的影响十分明显,气溶胶在该区域的能量系统中起到了十分重要的作用。但是气溶胶瞬时辐射强迫只能表示在卫星过境的某一个时刻气溶胶对大气顶辐射通量的作用,而无法表示气溶胶辐射强迫的一个平均状态。现今的气溶胶模式模拟的气溶胶辐射强迫大都是日平均或月平均后的结果,所以为了与模式结果相比较,我们必须计算日平均气溶胶辐射强迫。

4.3 日平均气溶胶直接辐射强迫 (F_d)

图11通过表3中的修正因子得到的2001年中国海域 F_d 的时间和空间分布。表5是 F_d 的季节平均值。可以看出 F_d 与前文所述的 F_s 分布很相似,但又有所不同。首先,在时间上, F_d 在春季达到最大,而在夏季最小,秋、冬季介于两者之间。这与 F_s 是一致的;其次,在空间上, F_d 也是沿着海岸分布。

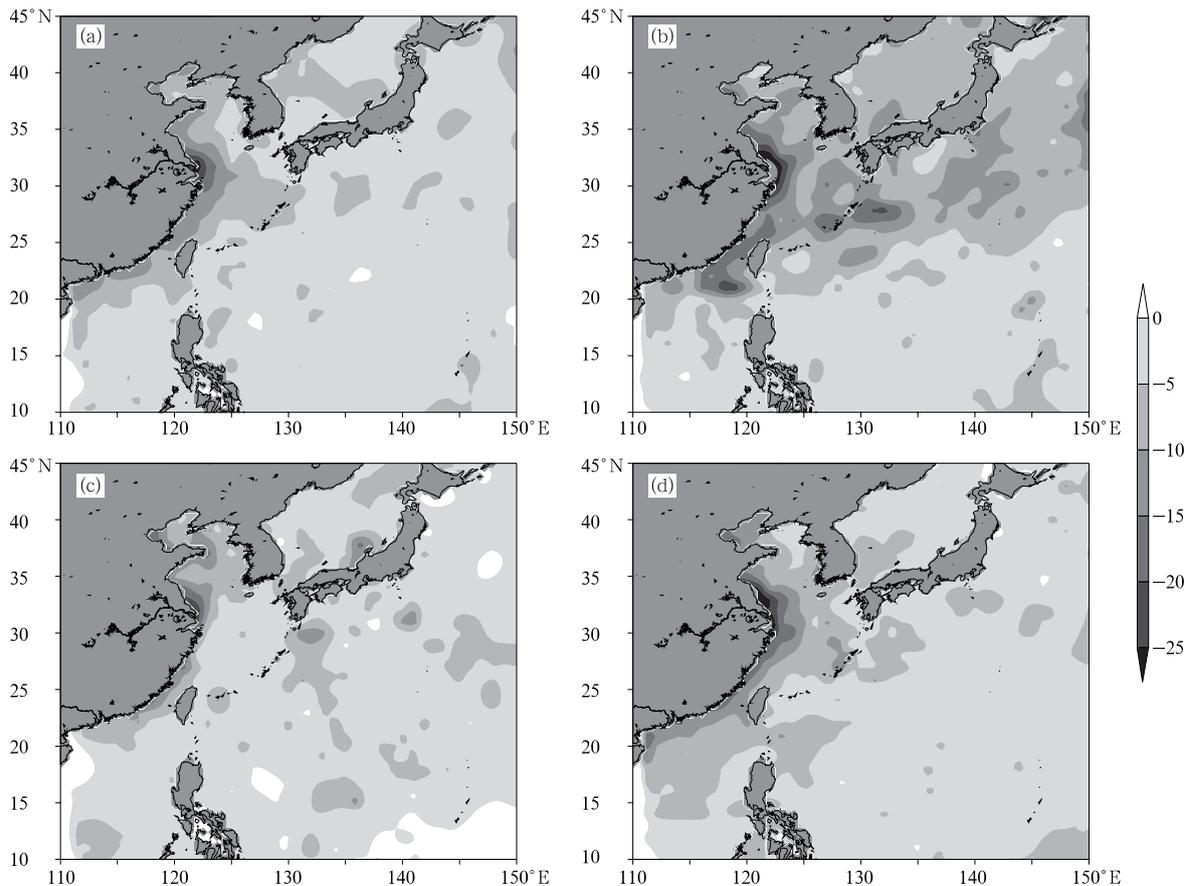


图11 2001年中国海域 F_d 的时间和空间分布
(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季; 单位: W/m^2)

Fig. 11 As in Fig. 8 but for F_d

表 5 2001 年中国海域 AOT550 和 F_d 的季节平均值
Table 5 The seasonal averaged AOT and F_d in 2001 over the China Sea

	AOT	F_d (W/m ²)
冬季	0.1396	-4.5085
春季	0.1833	-6.3052
夏季	0.1031	-3.5980
秋季	0.1175	-4.1683

随着离岸距离的增加, F_d 的绝对值是不断减小的。但是与 F_s 不同的是, 在太阳天顶角偏大的区域, 如冬季的中国北部海域, 大值区的范围明显减小, 这是因为修正了太阳天顶角对气溶胶辐射强迫的影响; 最后, 在数值上, F_d 明显小于 F_s 。在沿岸区域, F_d 出现小值区, 数值都是小于 -10 W/m^2 ; 在远海, F_d 普遍偏大, 大于 -6 W/m^2 。

从 SPRINTARS 模式模拟的 F_d (图 12)。可以

看出, 模式模拟和卫星测量的结果趋势都是一致的, 在春季最大, 而在夏季最小, 秋、冬两季介于两者之间。模式模拟的结果和卫星测量的结果都反映出了中国海域气溶胶直接辐射强迫的季节变化特点, 且数值上非常接近。但是与模式结果比较, 卫星测量的 F_d 的绝对值在四个季节里都是明显偏大, 主要是因为模式的物理化学过程不可能包括所有种类的气溶胶, 与实际的测量比较是要偏小的, 这与前人的研究是一致的。模式与卫星分别获得的 F_d 对于整个海区的平均值在四个季节的差值分别为 1.2 、 2.6 、 0.8 和 1.2 W/m^2 。可以看出: 在夏季, 由于气溶胶含量很少且种类单一, 主要是海盐气溶胶和人为小颗粒气溶胶, 所以模式模拟的结果和卫星测量的结果差距最小, 只有 0.8 W/m^2 ; 而在春季, 由于中国海域气溶胶十分复杂, 无论是气溶胶含量还是气溶胶种类都是一年中最多的。在沙尘气溶胶、海盐

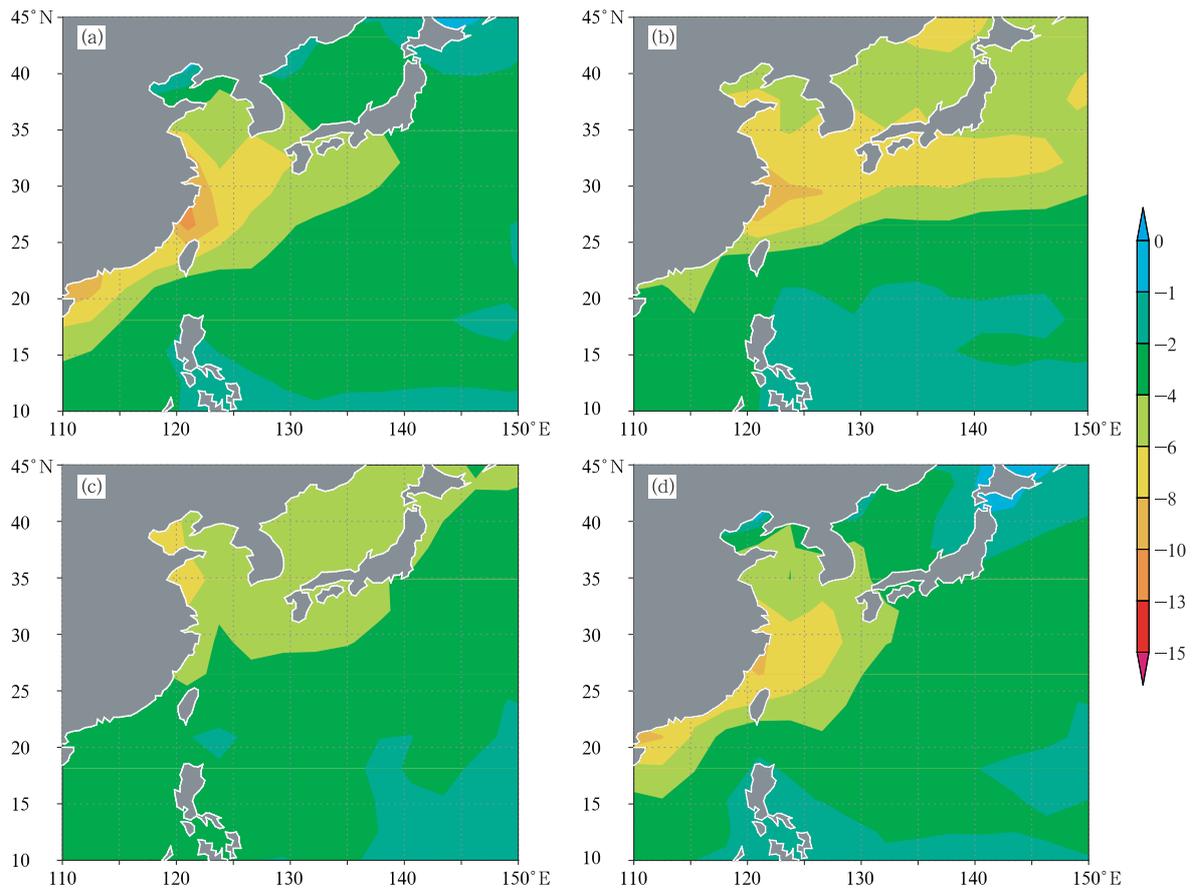


图 12 SPRINTARS 模拟 2001 年中国海域 F_d 的时间和空间分布
(a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季, 单位: W/m^2)

Fig. 12 As in Fig. 11 but for the simulated F_d by the SPRINTARS

气溶胶以及小颗粒的人为气溶胶共同作用下,使得气溶胶的相互作用以及对太阳辐射的作用十分复杂,造成模式结果和卫星测量结果差距最大,达到 2.6 W/m^2 ;而秋、冬季的情况则处于两者之间,都为 1.2 W/m^2 。通过以上对模式结果和卫星结果的综合比较上来看,无论是季节分布特征,还是区域平均的数值,模式结果和卫星结果都是非常一致的,两者都是相当吻合。

从以上对日平均气溶胶辐射强迫的分析可以看出,在中国海域,由于陆源气溶胶的向海输送,使得中国海域上空聚集了大量的气溶胶粒子。气溶胶粒子通过自身的光学特性,作用于太阳光,使得该海域的气溶胶辐射强迫作用十分显著。同时在陆源气溶胶和气象场的共同作用下,中国海域的气溶胶辐射强迫表现出了明显的时空变化特征,这些都为以后的科学研究提供了依据。

5 结 论

本文结合 MODIS 和 CERES 两颗传感器数据,利用辐射传输模式,直接获得了中国海域气溶胶直接辐射强迫。通过分析,主要得到以下几点结论:

(1) CERES 的大气顶辐射通量与 MODIS 在 550 nm 处的 AOT 在中国海域存在着非常好的线性相关关系,利用这一关系可以直接得到无气溶胶晴空条件下大气顶的辐射通量,结合 CERES 测量获得的 F_{aero} ,直接获得中国海域气溶胶瞬时辐射强迫。同时发现,气溶胶瞬时辐射强迫与 AOT550 在四个季节中都存在着相当好的负相关关系,相关系数绝对值大于 0.9,说明气溶胶减小了进入地球的能量,对整个地球能量系统来说是“冷室作用”。

(2) 利用修正因子将瞬时辐射强迫转化为日平均辐射强迫。 F_d 具有明显的时空分布特征:在时间上, F_d 的绝对值在春季达到最大,在夏季最小;在空间上, F_d 也是沿着海岸分布,随着离岸距离的增加,其绝对值是不断减小的。 F_d 不同于 F_s ,在数值上明显小于 F_s 。在沿岸区域, F_d 出现小值区,数值是小于 -10 W/m^2 ;而在远海, F_d 普遍偏大,其值都大于 -6 W/m^2 。

通过本文分析可以看出,利用卫星数据直接计算中国海域气溶胶辐射强迫是可行的,同时中国海域气溶胶辐射强迫具有显著的时空分布特征,以及受人类影响严重的特征,对中国海域能量系统产生重要的影响。

参考文献

- 陈本清,杨燕明. 2005. 台湾海峡及周边海区 MODIS 气溶胶光学厚度有效性验证. 海洋学报, 27(6):170-176
- 李正强,赵凤生. 2001. 利用静止气象卫星数据确定大气气溶胶光学厚度. 量子电子学报,18(4):381-384
- 李正强,赵凤生,赵崴等. 2003. 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究. 量子电子学报,20(5):635-640
- 马晓燕,石广玉,郭裕福等. 2005. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用. 气象学报, 63(1):41-48
- 毛节泰,李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究. 气象学报, 63(5): 622-635
- 吴润,蒋维楣,刘红年等. 2004. 硫酸盐气溶胶直接辐射效应在与离线模拟方法的比较. 气象学报, 62(4):486-492
- 赵崴,唐军武,高飞等. 2005. 黄海、东海上空春季气溶胶光学特性观测分析. 海洋学报,27(2):46-53
- Alexander Ignatov, Istvan Laszlo. 2005. Two MODIS aerosol products over ocean on the Terra and Aqua CERES SSF datasets. J Atmos Sci, 62(4):1008-1031
- Breon F M, Tanre D, Generoso S. 2002. Aerosols effect on the cloud droplet size monitored from satellite. Science, 295:834-838
- Christopher S A, Zhang J. 2002. Shortwave aerosol radiative forcing from MODIS and CERES observations over the oceans. Geophys Res Lett, 29(18):1859-1867
- Jacobson M Z. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols. Nature, 409:695-697
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press
- Kaufman Y J, Holben B N, Tanre D, et al. 2000. Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties. Geophys Res Lett, 23:3861-3864
- Li X W, Zhou X J, Li W L. 1995. The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanism. Acta Meteorologica Sinica, 9: 57-68
- Li Z, Chen H, Cribb M, et al. 2007. Preface to special section: Overview of the East Asian Study of Tropospheric Aerosols: an International Regional Experiment (EAST-AIRE). J Geophys Res, D22S00, doi:10.1029/2007JD008853
- Loeb N G, Kato S, Loukachine K. 2005a. Angular distribution models for top-of-atmosphere radiative flux estimation from the clouds and the earth's radiant energy system instrument on the Terra Satellite. Part I: Methodology. J Atmos. Ocean Tech., 22:338-351
- Loeb N G, Kato S, Loukachine K et al. 2005b. Angular distribution models for top-of-atmosphere radiative flux estimation from the clouds and the earth's radiant energy system instrument on the Terra Satellite. Part II: Validation. J Atmos Ocean Tech., 22:

631-656
 Menon S, Hansen J, Nazarenko L. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 297: 2250-2253
 Remer L A, Kaufman Y J. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J Atmos Sci*, 62(4):947-973
 Shi G Y. 1992. Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases. *Sci China (B)*, 35 (2):217-229
 Xia X, Li Z, Holben B, et al. 2007. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China. *J Geophys Res*, 112, D22S12, doi:10.1029/2007JD008859
 Xia X, Li Z, Wang P, Chen H, et al. 2007. Estimation of aerosol effects on surface irradiance based on measurements and radiative transfer model simulations in northern China. *J Geophys Res*, 112, D22S10, doi:10.1029/2006JD008337
 Zhang L S, Shi G Y. 2001. The simulation and estimation of radiative properties and radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Chinese J Atmos Sci*, 25(2):231-242
 Zhao C S, Tie X X, Lin Y P. 2006. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China. *Geophys Res Lett*, 33: 11-23
 Zhou X J, Li W L. 1998. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China. *Chinese J Atmos Sci*, 22(4):418-427

欢迎订阅 2011 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创造性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百名重点学术期刊”奖;2003—2007 年连续 5 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2007—2010 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008 年《气象学报》(中文版)被评选为“中国精品科技期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。
 2011 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)
 通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部
 邮政编码: 100081
 联系电话: 010-68406942,68408571(传真)
 邮箱: cmsqxxb@263.net;qxxb@cms1924.org
 期刊主页: http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn
 开户银行: 北京建行白石桥支行
 户名: 中国气象学会
 帐号: 11001028600059261046

《气象学报》2011 年征订回执单

年 月 日

订户单位全称				经手人	
订户详细地址				邮政编码	
刊物名称	全年订价	订阅份数	总金额	(订户单位盖章)	
《气象学报》中文版	240.00 元				
总金额(大写)	仟 佰 拾 元 角 分				
说明:此联与汇款凭证一起报销有效。					