

基于 MTSAT 卫星的海上沙尘自动监测

涂乾光 郝增周* 潘德炉 龚 芳

(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,
浙江 杭州 310012)

摘要 为实现海上沙尘的全天时自动监测,分析了大量 MTSAT 卫星观测数据,表明海上沙尘样本区在 $11\ \mu\text{m}$ 和 $12\ \mu\text{m}$ 的热红外亮温差为负,可见光反射率一般高于晴空海面而低于云区, $11\ \mu\text{m}$ 通道的亮温高于云区而低于晴空海区;同时运用 Libradtran 辐射传输程序包模拟不同水汽含量和不同下垫面温度时沙尘区热红外通道亮温差,表明在水汽含量相对较高的海面,沙尘区热红外通道亮温差仍为负值,这一特性可作为海上沙尘识别的重要指标。在沙尘辐射特性分析和模拟的基础上,通过红外亮温差判断,在白天结合可见光通道的反射率与 $3\ \text{pixel} \times 3\ \text{pixel}$ 标准偏差;在夜间利用上一时相的沙尘区设定亮温阈值,提出一种简单有效的海上沙尘全天时自动监测算法。以 2008 年 3 月 1~2 日、2010 年 3 月 19~21 日两次沙尘过程的 MTSAT 卫星数据为例进行我国海上沙尘的监测试验,结果表明,利用该算法能够有效提取出海上沙尘区的分布范围,客观反映沙尘的运移过程,监测结果利于反演沙尘气溶胶光学厚度、估算海上沙尘沉降通量等问题。

关键词 遥感;自动监测;光谱分析法;海上沙尘;MTSAT 卫星

中图分类号 P407.8 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1228001

Dust Automatic Detection over Ocean Using MTSAT Data

Tu Qianguang Hao Zengzhou Pan Delu Gong Fang

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract For the purpose of automatic detection of dust over ocean from satellites, reflection and emission characteristic of water surface, cloud and dust regions are analyzed based on lots of MTSAT satellite data, which show that the brightness temperature at thermal infrared channel 1 B_{T11} is less than the brightness temperature at thermal infrared channel 2 B_{T12} in dust sample regions. The visible reflectance of dust sample is generally greater than water surface but less than clouds, while it is opposite at B_{T11} , which confirms that even the atmospheric water vapor content over ocean is relatively high; B_{T11} is less than B_{T12} in dust regions by using Libradtran radiative transfer model package. This can be used as an important feature of dust detection over ocean. So an easy dust automatic detection algorithm over ocean by remote sensing using MTSAT satellite data is developed. The thresholds of this algorithm are derived from reflectance, $3\ \text{pixel} \times 3\ \text{pixel}$ standard deviation of visible channel, B_{T11} and difference between B_{T11} and B_{T12} . Then progress of dust storms over the Bohai Sea and the Yellow Sea from March 1st to 2nd, 2008 and from March 19th to 21st, 2010 was monitored both the daytime and nighttime. Result indicates that the method can extract distribution area of dust over ocean and shows transportation process of dust storms objectively. This is in favor of aerosol optical thickness retrieval to estimate the flux of dust sedimentation over ocean.

Key words remote sensing; automatic detection; spectral analysis methods; dust over ocean; MTSAT satellite

OCIS codes 280.1100; 010.1100; 010.5620; 010.0280; 280.6780

收稿日期: 2011-05-03; 收到修改稿日期: 2011-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(40806071)和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资金(JG1013)资助课题。

作者简介: 涂乾光(1985—),男,硕士研究生,主要从事海洋遥感应用方面的研究。E-mail: totho@163.com

导师简介: 潘德炉(1945—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事海洋遥感方面的研究。

E-mail: pandelu@sio.org.cn

* 通信联系人。E-mail: hzyx80@163.com

1 引 言

每年春季亚洲内陆频繁发生的沙尘暴向大气中注入大量的沙尘气溶胶粒子,它们不仅直接影响大气环境和气候变化^[1],而且可以随着西风带飘移、长距离输送沉降到中国近海、日本海甚至太平洋的广大海域,并对该海域海洋生态环境造成影响^[2~6]。

了解沙尘的空间分布范围,掌握其运移过程与变化规律,是进行沙尘粒子对气候、海洋生态环境影响等相关研究的基础。沙尘的快速变化和大范围影响,使得有限的定点测量难以实现,特别是在海上监测中;而卫星遥感具有大范围、高频次的监测能力是一种有效、经济的监测工具^[7]。目前,气象卫星数据在沙尘遥感监测中已发挥巨大的作用,包括 NOAA/AVHRR, EOS/MODIS 等极轨卫星和 GMS, MTSAT, FY2 系列等静止卫星数据,空间分辨率从 250 m 至 5 km 不等;监测方法按光谱可分为单通道与多通道组合,1975 年 Griggs^[8]提出了利用卫星观测的可见光数据测量水面上空沙尘气溶胶光学厚度的方法;Ackerman 等^[9,10]利用红外通道阈值法进行沙尘识别,Wald 等^[11]利用沙尘区红外通道散点图提取沙尘,Legrand 等^[12]利用红外差值沙尘指数研究了 Meteosat 卫星数据的沙尘提取方法,郑新江等^[13]通过建立 AVHRR 卫星数据反射通道与红外通道之间

的统计关系识别沙尘,海全胜等^[14]利用沙尘与其他主要地物的比辐射率特征提出了一种沙尘暴遥感监测新方法,胡秀清等^[15]结合红外差值沙尘指数与红外通道阈值开发了一套沙尘暴卫星遥感监测业务算法,Zhao 等^[16]在统计了多个沙尘样本的光谱和空间纹理特征阈值的基础上,设计了全球白天多通道沙尘遥感监测算法。然而上述算法要么是仅利用可见光通道,无法实现沙尘暴的全天时监测;要么是主要针对陆地下垫面的,需要建立一套背景参考影像,以量化沙尘气溶胶所导致的亮温衰减,这就需要大量的先验数据输入和阈值假设,比较复杂。本文结合海洋下垫面相对均匀的特点和静止卫星具有高时间分辨率的优势,综合运用光谱分析和纹理特征,设计提出了一种简单有效、无需先验数据的海上沙尘全天时自动监测算法。利用该算法,以 MTSAT 卫星数据为例,对我国海上沙尘进行了监测个例分析。

2 研究数据和方法

MTSAT 系列卫星^[17]对我国气象观测起重要作用。其用于气象观测的数据有可见光、中红外和红外水汽通道各 1 个及热红外通道 2 个,具体扫描参数如表 1 所示。卫星成像每半小时一次,能够满足沙尘动态监测的时间频次要求。

表 1 MTSAT 卫星扫描参数

Table 1 MTSAT satellite scanning parameters

Remote sensor	Wavelength / μm	Quantization /bit	Spatial resolution /km
Visible (VIS)	0.55~0.90	10	1
IR thermal (IR1)	10.3~11.3	10	4
IR thermal (IR2)	11.5~12.5	10	4
IR water vapor (IR3)	6.5~7.0	10	4
Mid-IR (IR4)	3.5~4.0	10	4

将地面站接收到的分块数据拼接成圆盘,再根据数据头信息提供的辐射定标查找表把 DN 值转化为反射率(可见光通道)和亮温值(红外通道),并将可见光通道反射率归一化到太阳垂直入射的情况,通过几何校正、研究区的裁剪以及海陆掩膜,最终获得研究海区的辐射数据。其中记亮温 $B_{T\lambda}$ 是中心波长为 λ 的通道亮温,如 B_{T11} 表示中心波长在 11 μm 处的 IR1 通道亮温值; R_{vis} 为可见光通道 VIS 的反射率。

选取 2007~2010 年间多次典型沙尘天气过程的 MTSAT 卫星观测数据用于样本分析,以 2008 年 3 月 1~2 号、2010 年 3 月 19~21 号的两次沙尘暴过程的 MTSAT 数据作为个例试验,同时选用该时间段内过境的 MODIS 真彩色合成图、气溶胶光学厚度产品

以及利用 Zhao 等^[16]算法提取出 MODIS 影像的海上沙尘区,作为沙尘自动监测结果的检验。

3 沙尘光谱辐射特征

沙尘粒子的光学特性与谱分布、浓度和组成等有关^[18],主要表现为对太阳短波辐射产生吸收和散射,同时沙尘发射长波热辐射。通过不同通道的探测值的数学组合,可以较好地获得沙尘区、地表和云在反照率和温度上存在的差异,来辨识沙尘区。

3.1 沙尘卫星观测特征分析

通过对多次已知沙尘天气的 MTSAT 静止卫星数据进行分析,发现海上沙尘在不同的波段具有如下一般特征:

1) 一般海上沙尘区的可见光反射率在 15%~35%之间, 低于高厚云, 高于水体, 但可能与部分卷云相近;

2) 在中红外波段(IR4), 遥感器接收到包括地气系统的反射太阳辐射和发射的热辐射。在白天, 海洋、沙尘和云不仅反射太阳辐射, 还自身向上发射辐射, 该波段对于沙尘监测其特征不是很明显;

3) 在热红外波段(IR1:11 μm 与 IR2:12 μm), 亮温值在空间上离得不远的海洋晴空区>沙尘区>云区。这是因为遥感器接收到的地气系统辐射主要是地面、沙尘和云自身的发射辐射, 太阳辐射可以完全忽略。物体的温度越高, 接收到的辐射越大, 反之越小;

4) 在沙尘区, 红外分裂窗通道的通道亮温差($\Delta=B_{T11}-B_{T12}$)一般为负, 这是进行沙尘识别的有效指标。对于清洁水体其亮温差基本为正, 对于浑浊水体其亮温差基本在 0 K 附近, 但都大于-0.5 K; 对于云, 其亮温差大部分大于 0 K, 还有一小部分也略小于 0 K;

5) 此外, 在白天仅利用可见光反射率无法很好地区分薄卷云与沙尘, 从卫星影像上可以观察到沙尘区顶部纹理较均匀细腻, 云区比较破碎粗糙, 海上沙尘区在可见光通道 3 pixel×3 pixel 均方差平均值一般在 0.2 K 以下。

图 1 是以 2008 年 3 月 1 日 5:30(世界时)的中国近海附近区域的 MTSAT 卫星数据为例, 在假彩色 3 通道(IR2, IR1, IR2)合成图上选取陆地沙尘

(LD)、海上沙尘(SD)、清洁水体(CW)、浑浊水体(TW)、薄卷云(CD1)和厚云(CD2)等黄框内的不同样本进行统计分析。

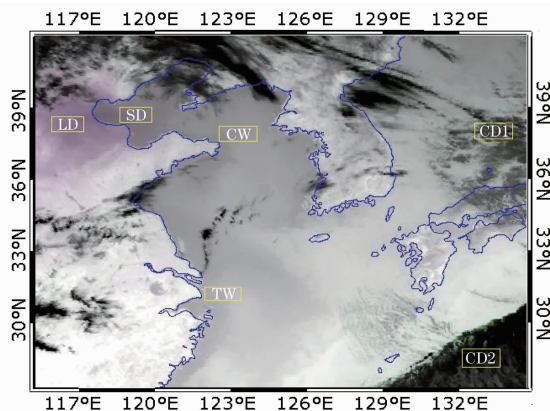


图 1 MTSAT 2008 年 3 月 1 日 05:30 假彩色合成图($B_{T12}, B_{T11}, B_{T12}$ 3 通道合成)

Fig. 1 MTSAT false color composite image ($R-B_{T12}, G-B_{T11}, B-B_{T12}$) with dust plume over East China Sea(ECS)

图 2 分别给出了 2008 年 3 月 1 日 05:30 的热红外通道亮温差 $B_{T11}-B_{T12}$ 与可见光反射率[图 2(a)]、 $B_{T3.9}-B_{T11}$ [图 2(b)]、 B_{T11} [图 2(c)]的二维散点图, 从图 2(a)可见沙尘区反射率介于 22%~33%之间, 水体在 12%以下, 厚云在 45%以上, 薄卷云则分布在 20%~60%, 与沙尘区部分重叠; 从图 2(b)可见沙尘区在 $B_{T3.9}-B_{T11}$ 的分布于厚云、薄卷云都可能重合, 不利于沙尘识别; 图 2(c)可见水体的 B_{T11} 最大, 云区低, 沙尘介于中间, SD 的 $B_{T11}-B_{T12}$ 约 -1 K~-2 K, 可与大部分的水体、云区分开来。

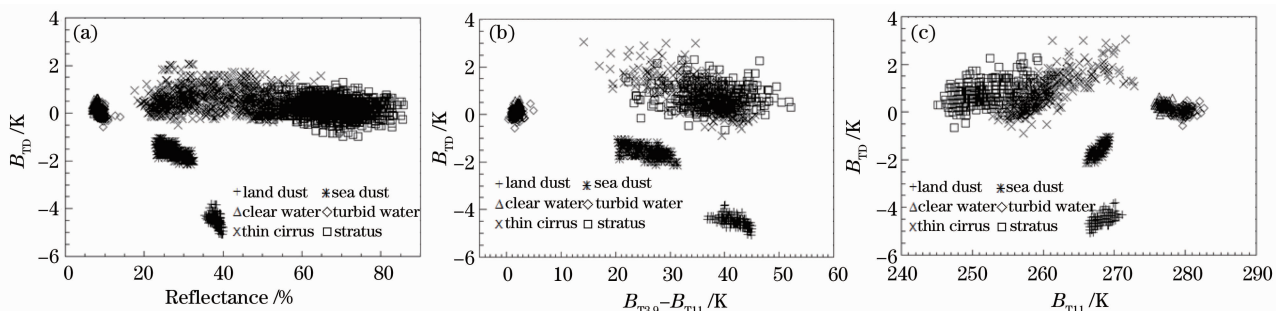


图 2 MTSAT 2008 年 3 月 1 日 05:30 影像样本区散点图分析。(a) Δ 与可见光反射率, $B_{T11}-B_{T12}$ 11 μm 与 12 μm 通道亮温差值的关系; (b) Δ 与 3.9 μm 与 11 μm 通道亮温差值的关系; (c) Δ 与 11 μm 通道亮温值的关系

Fig. 2 Scatter plot of image sample area on 05:30, 1 March, 2008. (a) Brightness temperature difference Δ between MTSAT 11.0 μm and 12.0 μm, versus reflectance of visible channel; (b) versus that between MTSAT 3.9 μm and 11 μm; (c) versus the brightness temperature of MTSAT 11.0 μm

为更好地说明沙尘和薄卷云的反射特性差异, 对图 1 选择的 SD 和 CD1 进行了相邻 3 pixel×3 pixel 的均方差统计分析, 相应的均方差频率分布直方图如图 3 所示。由图可知, 海上沙尘区的可见

光图像 3 pixel×3 pixel 矩阵均方差值小, 直方图分布很集中, 且主要分布在低端; 而云区均方差直方图则明显较宽且值比较大。

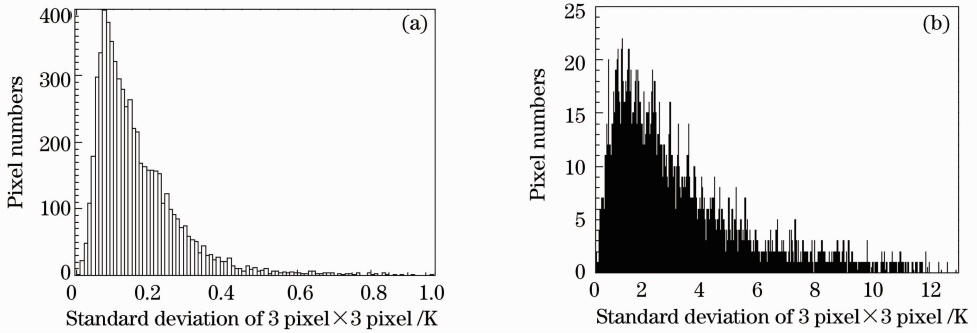


图 3 2008 年 03 月 01 日 05:30 MTSAT 可见光通道 3 pixel×3 pixel 标准偏差频率分布直方图。(a) 海上沙尘区；(b) 卷云区

Fig. 3 Standard deviation of 3 pixel×3 pixel and its frequency histogram of dust over (a) sea and (b) clouds of MTSAT VIS channel image on 05:30 UTC 1 March 2008

3.2 热红外通道亮温差模拟

卫星观测统计和分析总是建立在有限的样本上,其统计特征的一般性需要大量的样本,这在实际应用上会存在缺陷,然而数值模拟分析能够从另一面对有限的统计特性进行补充,使观测统计特征更具理论一般性。1997 年, Ackerman^[9] 从理论分析和辐射传输模拟说明沙漠上空沙尘区红外通道亮温差为负,但没有具体分析亮温差随下垫面温度和大气水汽含量的变化。水汽在 11 μm 通道的吸收要小于 12 μm 通道,即可能造成亮温差为正。

在忽略大气效应和气溶胶散射效应的情况下,

表 2 模拟红外分裂窗通道亮温的输入参数描述

Table 2 Description of input parameters to simulate the brightness temperature of thermal infrared split window

Parameters name	Parameters description	Input parameters
Atmosphere_file	Location of atmospheric data file	Afglmw # midlatitude winter
Sza	Solar zenith angle / (°)	35 # mean of spring
Rte_solver	Radiative transfer equation solvers	Disort2
Correlated_k	Correlated-k approximation	AVHRR_KRATZ
Wavelength_index	Set the wavelengths to be selected	See table 3
source	Solar or thermal source	Thermal
Zout	Specify the output altitudes in km	120.0
Aerosol_vulcan	Aerosol situation above 2 km	1 # background aerosols
Aerosol_haze	Aerosol type in the lower 2 km	4 # maritime type aerosols
Aerosol_season	Specify season to get appropriate aerosol profile	2 # fall-winter profile
Aerosol_visibility	Horizontal visibility in km	5.0
Aerosol_scale_ssa	Scale the aerosol single scattering albedo	See table 3
Aerosol_set_gg	Set the aerosol asymmetric parameter	See table 3
Aerosol_set_tau	Set the aerosol optical thickness	See table 3
H ₂ O_precip	Precipitable water in kg/m ² (1 mm)	0~3.5 (increasing by 0.5)
Surface_temperature	Used for thermal infrared calculations /K	280~300
Filter_function_file	Calculated spectrum is multiplied with a corresponding filter function	http://mscweb.kishou.go.jp/operation/response/mtsatl1r.htm

卫星接收到观测值 I_i ^[10] 为

$$I_i = t_i H(T_s) + \epsilon_i H(T_a), \quad (1)$$

式中 t_i 为沙尘层在给定通道 i 处透过率, ϵ_i 为沙尘层在给定通道 i 处发射率; T_s 为下表面温度, T_a 为沙尘层顶部温度, H 为普朗克函数。

可见下垫面温度和空气中水汽含量对卫星接收的热红外辐射有重要影响,特别是海洋上空水汽含量很高,因此需要从这两方面对热红外亮温差识别沙尘的方法进行敏感性分析,选用 Libradtran 辐射传输程序包^[19] 来进行模拟计算。输入参数如表 2 所示,其中沙尘气溶胶光学特性参数如表 3 所示^[20]。

表 3 典型冬季沙尘气溶胶光学特性参数
Table 3 Parameters of typical dust aerosols optical properties in winter

Type	Wavelength/ μm	SSA	g	$\sigma_{\lambda}/\sigma_{550}$
Dust aerosol	11	0.5588	0.524	0.184
	12	0.4955	0.525	0.121

假定沙尘气溶胶垂直混合均匀,采用中纬度冬季大气模式,分别模拟下表面温度为 280 K 和 300 K,水汽含量从 0~3.5 g/cm² 变化的热红外亮温差随沙尘气溶胶光学厚度(AOT)变化图,如图 4 所示。当水汽含量一定的情况下,表面温度变化,对亮温差是否小于 0 K 的影响不明显;但当表面温度增加时,亮温差随沙尘气溶胶光学厚度的变化愈显著;随着水汽含量的增加,亮温差减小,甚至当水汽含量特别高的时候,会出现亮温差为正的情况。

图 5 是从文献[21]中得到的月平均水汽含量图,春季沙尘经常影响的黄渤海及日本海水汽含量相对高于陆地,但低于东海、南海,平均值基本都在 2.5 g/cm² 以下;沙尘天气的消光系数是正常天气

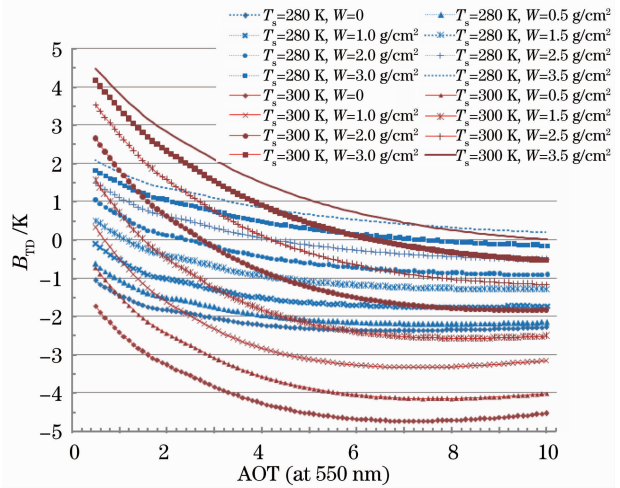


图 4 热红外亮温差对表面温度和水汽敏感性分析
Fig. 4 T_{BD} changes with optical thickness of dust aerosol under different water vapors and surface temperatures
的几十倍甚至上百倍[22],在海上测得浮尘天气的气溶胶光学厚度(AOT)基本都在 1.3 以上[22],当沙尘天气更强的时候,AOT 肯定更大。所以由观测和模拟分析可知利用亮温差为负基本不会漏判沙尘。

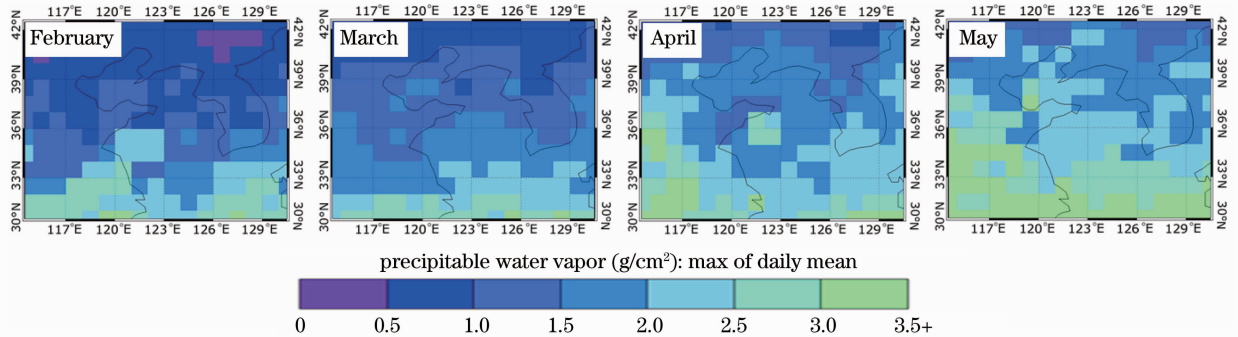


图 5 2008~2010 年 AQUA 卫星东中国海 2~5 月最大日平均水汽含量

Fig. 5 Max of daily mean water vapor over East China Sea from February to May, 2008~2010 by AQUA satellite

4 海上沙尘遥感监测算法

根据前面的卫星观测值分析和红外通道亮温差模拟分析得到的沙尘辐射特征,沙尘区的热红外亮温差 B_{TD} 一般为负,并且大部分比 0 K 小得多,但有一部分水云的 B_{TD} 也会略小于 0 K,利用 MTSAT 卫星高观测频次的特点可以设定亮温阈值来剔除这部分水云。此外,白天沙尘区的反射率总体介于水体与云区之间,但会与部分薄卷云接近,不过两者纹理上差别较大,根据可见光图像 3 pixel×3 pixel 矩阵均方差值就可以很好地把沙尘区跟这部分区分开来。据此设计了一种全天时海上沙尘遥感自动监测算法,图 6 给出了沙尘监测的详细流程。

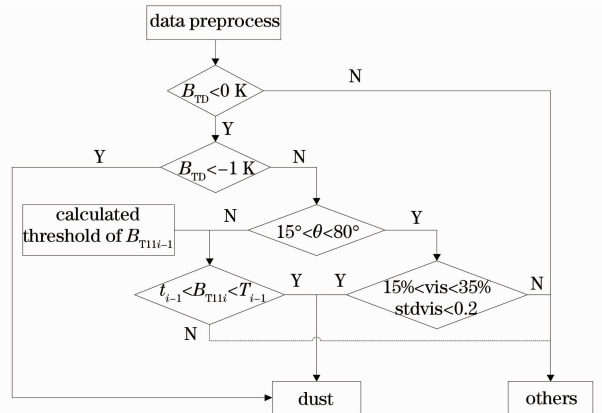


图 6 海上沙尘静止卫星遥感监测算法流程图

Fig. 6 Flow chart of automatic dust monitoring algorithm over ocean from Geo-stationary satellite

具体监测步骤描述如下：

1) 数据预处理,具体见第 2 章节;

2) 当 B_{TD} 大于 0 K 时全部归为其他地物,小于 0 K 则进入下一步判断;

3) 为避免误判, B_{TD} 阈值适当小点,设为 -1 K,即当 $B_{TD} < -1$ K 时,认为其必为沙尘。当 $-1 \text{ K} \leq B_{TD} < 0$ K 时则进入下一步判断;

4) 白天算法。太阳耀斑区、黄昏和黎明、白天、夜间是根据像元的太阳天顶角 θ 判别^[24]。当 $\theta < 15^\circ$ 时认为像元位于太阳耀斑区,可能导致海面反射率比沙尘还高;反射辐射在黄昏和黎明时变化较大,即当 $\theta > 80^\circ$ 时反射率通道值不准确。因此,只有当 $15^\circ < \theta < 80^\circ$ 时,才可以采用白天算法,沙尘区的反射率在 15%~35%,并且沙尘的 3 pixel \times 3 pixel 均方差 Stdvis 的阈值设为 0.2,约等于均方差值的均值与标准差之和;

5) 夜间算法。当 $\theta < 15^\circ$ 或 $\theta > 80^\circ$ 时采用夜间

算法。这里提出一种新的设定亮温阈值的方法。因为静止卫星时间频率高,在 30 min 内海面及其上空的温度可以认为变化不大,可以对前一时次已监测出的沙尘区亮温值进行统计分析,设亮温的最小值 t_i 为平均值减标准差,最大值 T_i 为平均值加方差。与以往的凭经验或背景影像设定亮温阈值的方法相比,本文的方法可动态自动调整阈值,更加简便、准确。

5 海上沙尘监测的个例试验分析

选取 2008 年 3 月 1~2 日和 2010 年 3 月 19~21 日我国北方地区出现的沙尘天气过程为例,用新算法对 MTSAT 卫星观测数据进行连续海上沙尘监测试验,部分监测结果如图 7,8 所示(彩色图见电子版)。

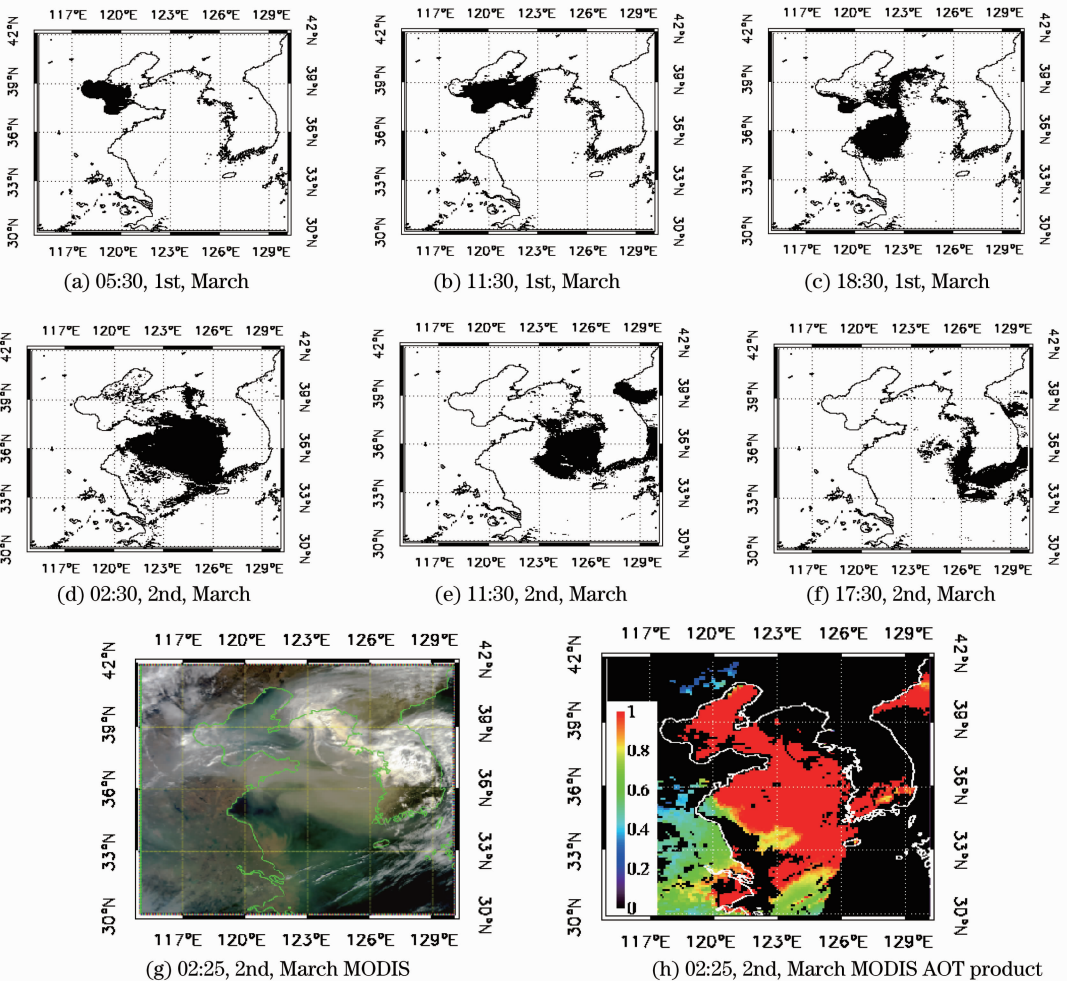


图 7 2008 年 3 月 1~2 日海上沙尘监测结果图

Fig. 7 A series of detected dust over the East China Sea during 1~2 March 2008

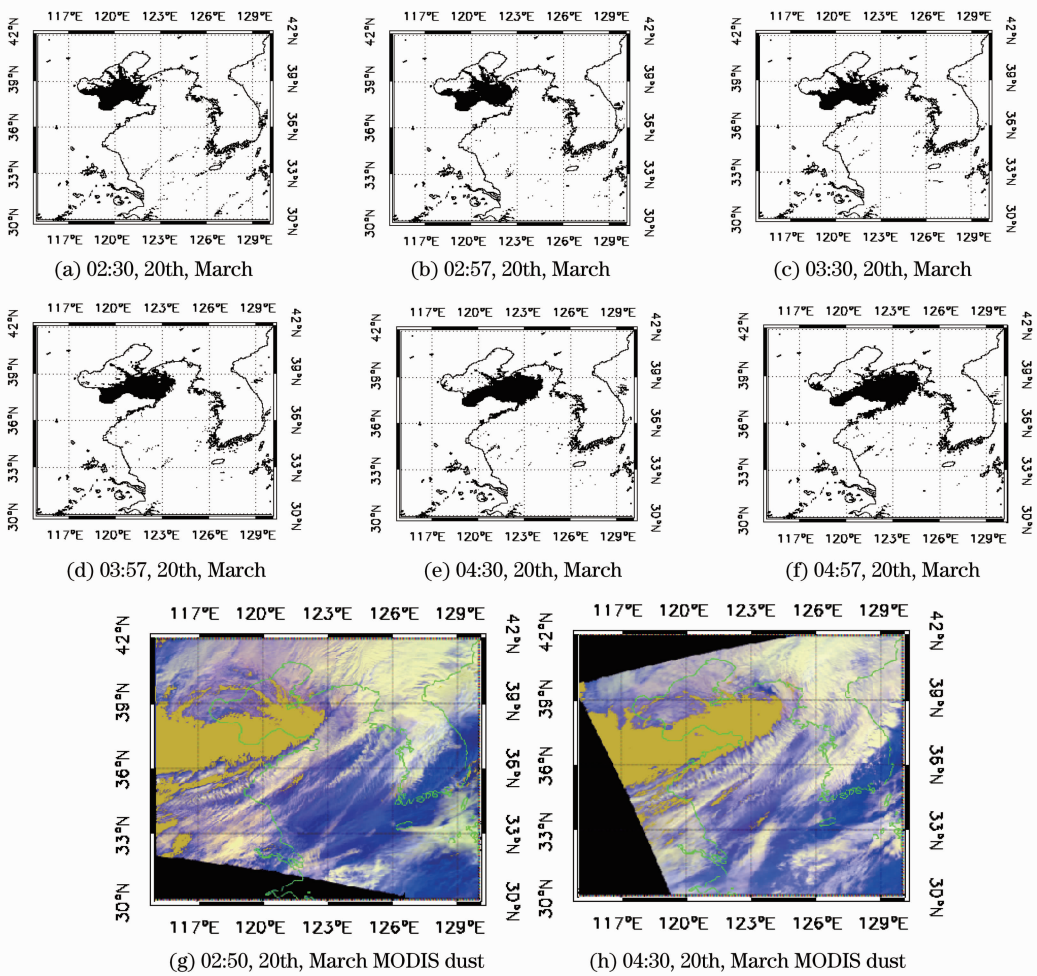


图 8 2010 年 3 月 20 日东中国海海上沙尘监测结果图

Fig. 8 A series of detected dust over the East China Sea on 20 March 2010

从图 7 可以清楚地看出 2008 年 3 月 1 日到 3 月 2 日整个移动过程及影响区域, 3 月 1 日 5:30 沙尘随西风飘移到渤海, 3 月 1 日 11:30 进一步扩散到北黄海, 随着风向的改变, 3 月 1 日 18:30 沙尘主体飘移到南黄海, 其中 3 月 2 日 02:30 的海上沙尘 MTSAT 卫星监测结果图 7(d) 与 2008 年 3 月 2 日 02:25 过境的 MODIS 彩色合成图 7(g) 进行目视真实性检验比较, 可以看出两张图的海上沙尘区的位置、范围大致相似, 说明本监测结果是可信的。不过渤海东北部的部分弱浮尘就没有完全监测出来, 主要原因可能是弱浮尘区卫星接收到的辐射能量含较多地表或大气信息, 弱浮尘的辐射和衰减作用相对较小, 沙尘区亮温差为负不显著甚至大于 0 K, 导致本算法不适用。到 2008 年 3 月 2 日 17:30 沙尘的主体部分已沉降或漂移到日本海。图 7(h) 是 MODIS 气溶胶光学厚度产品, 对于沙尘区基本都落在红色区域, 即当光学厚度超过 1 的时候, 都赋值为 1。由于中国近海海域高浑浊水体不满足 MODIS 气溶胶反演算法的暗像

元的假设, 并且没有专门针对沙尘气溶胶模式^[25,26], 因此对于沙尘区气溶胶光学厚度的精细反演需要重新考虑。

图 8 给出了 2010 年 3 月 20 日 02:30~05:00 时间内连续的 MTSAT 卫星观测的沙尘监测结果 [图 8(a)~(f)] 以及应用 Zhao 等^[16] 的全球白天多通道沙尘遥感监测算法提取了当天过境的 MODIS 影像中的沙尘区 [图 8(g)~(h) 中的黄色区域], 可以看出相近时间的 MTSAT 卫星监测到的海上沙尘区位置与范围与 MODIS 吻合, MODIS 分辨率较高, 边缘地区较为清晰, 但是 MTSAT 卫星每半个小时就有一个监测结果, 能够更清楚地反映出沙尘的分布范围、移动路径。白天该算法的判识精度较好, 对于夜间海上沙尘没办法进行目视检验, 也缺少地面站点观测记录, 但观察监测结果表明, 沙尘区的分布范围、移动路径合乎规律, 完全可以相信上述算法可以全天时自动监测海上沙尘, 效果较好。

6 结 论

通过研究分析海洋上空不同目标物(沙尘区、云区和晴空海区)的反射辐射、发射辐射的卫星观测值,发现沙尘区的热红外亮温差为负;反射率总体大于海面小于云区;11 μm 通道的热红外亮温大于云区而小于晴空海区;中红外波段对海上沙尘监测作用不大。单独应用其中某个波段去识别沙尘都可能出现漏判或错判。另一方面,应用 Libradtran 辐射传输程序包理论模拟了不同水汽含量和海表温度下的沙尘气溶胶光学厚度变化对热红外亮温差的影响,发现在水汽含量相对较高的海面,沙尘区热红外通道亮温差仍为负值。在此基础上,本文针对海洋下垫面比较均一的特点,充分利用静止卫星时间频次高这一优势,结合热红外通道亮温阈值,可见光通道反射率阈值,3 pixel \times 3 pixel 空间一致性监测,来剔除那些被错判的热红外亮温差为负的非沙尘像元,据此设计了一种简单有效的海上沙尘的全天时自动监测算法,不再需要建立背景参考影像或人工设定阈值。利用该算法对 2008 年 3 月 1~2 日、2010 年 3 月 19~21 日两次沙尘过程进行监测试验,结果表明,利用该方法可以提取出海上沙尘区的分布范围,客观反映沙尘的运移过程。但是,当沙尘比较稀薄或水汽含量较高时可能出现亮温差为负不显著甚至大于 0 K,导致本算法监测效果不是很理想,因此下一步工作还要考虑结合其他方法,进一步监测出较薄的沙尘。

海上沙尘区的光学厚度常常高于 1,现有气溶胶光学厚度反演算法中不能将沙尘区的光学厚度精细化,因此针对沙尘区气溶胶光学厚度的反演问题需要重新考虑,海上沙尘区域的监测为进一步研究海上沙尘气溶胶光学厚度的反演提供了前提,连续的沙尘监测也为深入的研究沙尘沉降通量的卫星估算,研究沙尘沉降对海洋水环境的影响提供了基础。

参 考 文 献

- 1 Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. *Chinese J. Atmospheric Science*, 2003, **27**(4): 591~606
石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. *大气科学*, 2003, **27**(4): 591~606
- 2 Zhuang Guoshun, Zhen Yi, Robert A. Duce *et al.*. Link between iron and sulfur cycles suggested by detection of iron(II) in remote marine aerosols[J]. *Nature*, 1992, **355**(6360): 537~539
- 3 J. K. B. Bishop, R. E. Davis, J. T. Sherman. Robotic observation of dust storm enhancement of carbon biomass of the north pacific[J]. *Science*, 2002, **298**(5594): 817~821
- 4 T. D. Jickells, Z. S. An, K. K. Andersen *et al.*. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry and

- climate [J]. *Science*, 2005, **308**(5718): 67~71
- 5 Han Yongxiang, Xi Xiaoxia, Fang Xiaoming *et al.*. Dust storm in Asia continent and bio-environment effects in the North Pacific: a case study of the strongest dust event on April 2001 in Mid-Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50** (23): 2649~2655
韩永翔, 奚晓霞, 方小敏等. 亚洲大陆沙尘过程与北太平洋地区生物环境效应: 以 2001 年 4 月中旬中亚特大沙尘暴为例[J]. *科学通报*, 2005, **50**(23): 2649~2655
- 6 Gao Huiwang, Qi Jianhua, Shi Jinhui *et al.*. Long-range transport of dust and its effects on ocean ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(1): 1~8
高会旺, 祁建华, 石金辉等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(1): 1~8
- 7 Hao Zengzhou, Pan Delu, Gong Fang *et al.*. Optical radiance characteristics of sea fog based on remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2420~2426
郝增周, 潘德炉, 龚芳等. 海雾的遥感光学辐射特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2420~2426
- 8 M. Griggs. Measurements of atmospheric optical thickness over water using ERTS-1 data [J]. *Air Pollute Control Assoc.*, 1975, **25**(6): 622~625
- 9 S. A. Ackerman. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (17): 17069~17079
- 10 P. Zhang, N. M. Lu, X. Q. Hu *et al.*. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, **52**(1-4): 197~206
- 11 A. E. Wald, Y. J. Kaufman, Tanre *et al.*. Day time and night time detection of mineral dust over desert using infrared spectral contrast [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D24): 32307~32313
- 12 M. Legrand, A. Plana-Fattori, N'doume. Satellite detection of dust using the IR imagery of meteosat I: Infrared difference dust index[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D16): 18251~18274
- 13 Zheng Xinjiang, Lu Wenjie, Luo Jingning. Research on the dust storm monitoring using multichannel meteorological satellite data [J]. *J. Remote Sensing*, 2001, **5**(4): 301~305
郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J]. *遥感学报*, 2001, **5**(4): 301~305
- 14 Hai Quansheng, Bao Yuhai, Alatingtuoya *et al.*. New method to identify sand and dust storm by using remote sensing technique — with inner mongolia autonomous region as example[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(2): 129~132
海全胜, 包玉海, 阿拉腾图雅等. 利用遥感手段判识沙尘暴的一种新方法——以内蒙古地区为例[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(2): 129~132
- 15 Hu Xiuqing, Lu Naimeng, Zhang Peng. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite [J]. *J. Applied Meteorological Science*, 2007, **18**(3): 266~275
胡秀清, 卢乃锰, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴[J]. *应用气象学报*, 2007, **18**(3): 266~275
- 16 Tom X. P. Zhao, Steve Ackerman, Wei Guo. Dust and smoke detection for multi-channel imagers [J]. *Remote Sensing*, 2010, **2**: 2347~2368
- 17 Japan Meteorological Agency. Meteorological satellite MTSAT series [OL]. [2011-10-24]. <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/index.html>
- 18 Hu Fangchao, Wang Zhenhui, Zhang Bing *et al.*. Study on method for determining atmospheric aerosol type using remote sensing experimental data [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 312~317
胡方超, 王振会, 张兵等. 遥感试验数据确定大气气溶胶类型

- 的方法研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 312~317
- 19 B. Mayer, A. Kylling. Technical note: the libRadtran software package for radiative transfer calculations; description and examples of use [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**(7): 1855~1877
- 20 G. A. D'Almeida, P. Koepke, E. P. Shettle. *Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics*[M]. Hampton; A. Deepak Publilshing, 1991
- 21 Goddard Space flight Center. Level 1 and atmosphere archive and distribution system [OL]. [2011-10-24]. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>
- 22 Li Xuebin, Gong Chunwen, Li Chao *et al.*. Extinction characteristics of sand weathers [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(2): 107~111
李学彬, 宫纯文, 李超等. 沙尘天气的气溶胶特性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2010, **5**(2): 107~111
- 23 Shen Yanbo, Wang Biao, Shi Guangyu. Aerosol optical depth and dusty weather over eastern China Seas in Spring of 2006 [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(3): 290~298
申彦波, 王标, 石广玉. 2006年春季我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(3): 290~298
- 24 Liu Xi, Hu Xiuqing. Sea fog automatic detection over the East China Sea using MTSAT data[J]. *J. Oceanography in Taiwan Strait*, 2008, **27**(1): 112~117
刘希, 胡秀清. 基于 MTSAT 卫星的我国东部沿海雾区的自动识别[J]. 台湾海峡, 2008, **27**(1): 112~117
- 25 Ma Jinji, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2039~2045
麻金继, 乔延利, 杨世植等. 利用 MODIS 图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2039~2045
- 26 Li Dong, Chen Wenzhong. Comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data with in-situ sky radiometer observations over East China Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2828~2836
李栋, 陈文忠. MODIS 遥感中国东部海域气溶胶光学厚度与现场测量数据的对比分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2828~2836

栏目编辑：何卓铭