

文章编号: 1004-4965(2010)05-0563-08

基于沙尘气溶胶识别的中国北方地区 MODIS 云检测产品的改进研究

叶晶^{1,2}, 李万彪^{1,3}, 刘辉志³, 蔡双彭²

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871; 2. 解放军 95871 部队, 湖南 衡阳 421002;
3. 中国科学院大气物理研究所 LAPC, 北京 100029)

摘要: 美国国家航空航天局(NASA)的 MODIS 业务云检测产品 MOD35 是其他大气产品和陆地产品反演的辅助数据, 也是目前很多云检测研究的检验依据。为研究 MODIS 云检测业务产品 MOD35 的监测效果, 分析了中国北方地区有沙尘暴天气的 MOD35 产品, 发现产品易将沙尘气溶胶区域误判为云。为了区分沙尘和云, 对中国北方地区白天 4 次沙尘过程数据进行散点图分析, 并通过计算损失率得到沙尘气溶胶的 11 μm、12 μm 通道亮温差特征和 11 μm 通道、3.7 μm 通道的亮温范围, 改进了 MODIS 监测沙尘气溶胶的算法。应用此算法对 MODIS 云检测产品中的沙尘气溶胶污染进行判别, 分析结果与国家气象卫星中心发布的沙尘监测一致。改进的算法能有效地监测出 MOD35 产品中误判为云的沙尘区域, 结合 MOD35 自身的厚气溶胶标记, 改进了云检测产品的效果。

关键词: 云检测; 热红外通道; 沙尘气溶胶; MODIS

中图分类号: P445.4

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.05.007

1 引言

作为影响气候变化的一个重要因子, 云在地球大气能量收支平衡中具有特别显著的调节作用。云检测的目的是要判定一个像元是否被云或厚的气溶胶覆盖, 或是否有云阴影的晴空点, 从而为反演大气和地表特征提供必需的辅助数据, 因此云检测的正确与否会影响到其它参数的反演结果。气象卫星所提供的资料与中尺度数值模式的分辨率相近, 在资料同化过程中, 云的信息可以改进初始场, 也可检验和订正数值模式的预报结果, 有助于确定雾、云和降水的覆盖范围, 有助于对天气气候变化的理解和正确预报^[1]。

云检测是美国国家航空航天局(NASA)的一项重要业务工作, NASA 会实时向全球发布其 MODIS(中分辨率成像光谱仪)业务云检测产品 MOD35。目前由于云检测结果的检验还没有很好的、客观的方法, 很多研究采用以下两种方法检验: (1) 人工目视

识别检验; (2) 与 NASA 的 MODIS 业务云检测产品对比检验。另外, NASA 的 MODIS 业务云检测产品是其它云参数和定量产品反演的辅助数据。因此, 考察 NASA 的 MODIS 业务云检测产品的监测效果就显得很有必要。已有研究表明 MOD35 的云检测结果虽能满足很多应用(如暗背景下的气溶胶光学特性的反演), 但对于以沙漠和戈壁为主的地表, 由于其反射率较大, MOD35 的结果往往将许多晴空地区判定为有云或可能有云; 另外对于发生扬沙或沙尘暴天气的地区, MOD35 容易将含沙尘较多的像元判定为有云^[2]。

本文研究了 NASA 的 MODIS 业务云检测产品 MOD35 的检测效果, 参考国家气象中心的沙尘天气产品, 发现 MOD35 存在将沙尘气溶胶误判为云的问题。针对这一问题, 通过分析中国北方地区白天沙尘气溶胶个例的沙尘与云的散点图, 得到沙尘气溶胶在热红外通道 11 μm、12 μm 的亮温差阈值以及 11 μm、3.7 μm 通道的亮温范围, 综合利用热红外通道和近红外通道进行沙尘气溶胶辅助检测, 以求改

收稿日期: 2009-02-20; 修订日期: 2009-09-22

基金项目: 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题 (LAPC-KF-2008-01) 资助

通讯作者: 叶晶, 男, 江西省人, 在读博士研究生, 主要从事大气辐射与遥感应用方面的研究。E-mail: ye1999jing@sina.com

进 MODIS 业务云检测效果。

2 资料和算法

2.1 资 料

利用卫星探测资料检测云时常受到仪器光谱分辨率、时间空间分辨率的约束。中分辨率成像光谱仪(MODIS)作为地球观测系统(EOS)的主要仪器之一，在 $0.412\text{--}14.24\mu\text{m}$ 范围内有36个波段，覆盖了可见光和红外波段，为利用多光谱通道进行云检测提供了有利手段。目前在2颗卫星(Terra、Aqua)上都搭载了MODIS仪器，使得同一地区每天最少可以接收2次白天数据和2次夜间数据，并且接收的数据星下点分辨率为1 000 m，最高可达250 m。这些特点都有助于提高实时云检测识别的能力。

沙尘天气是影响中国北方地区的主要灾害性天气之一，为了适应沙尘天气科学的研究的需要，国家气象中心整编了《沙尘天气年鉴》。年鉴中的有关结果来源于全国各地气象局及广大气象台站的观测资料，并有卫星三通道真(假)彩色沙尘暴影像识别图。本文为研究在中国北方地区NASA的云检测业务产品MOD35监测结果，特别是它对沙尘暴天气过程中气溶胶的识别效果，首先从2004年和2005年的年鉴找出有沙尘暴或强沙尘暴天气过程的日期，然后考虑到MODIS在中国北方地区的过境时间及覆盖范围，筛选出了如表1中的6个沙尘个例，前4个沙尘个例用来统计分析，得到沙尘气溶胶监测的阈值，后2个个例(2004年5月5日和2005年4月6日)用沙尘天气的MODIS产品来做重点分析，利用《沙尘天气年鉴》给出的这2天的沙尘监测结果作为参考数据^[3-4]。

表1 研究的6个沙尘个例
个例3的资料来自Terra卫星，其余来自Aqua卫星。

序号	个例日期	世界时	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$
1	2006/03/09	06:05	36~45	100~117
2	2006/03/10	05:10	40~50	102~116
3	2004/03/27	03:40	39~45	103~114
4	2005/04/29	05:30	40~53	101~120
5	2004/05/05	05:25	41~47	116~124
6	2005/04/06	05:25	41~52	110~123

2.2 MOD35产品

美国NASA采用的云检测业务算法是MODIS Cloud Mask小组开发的MODIS Cloud Mask算法。该算法得益于以前众多利用卫星资料进行全球云检

测的研究工作，如ISCCP方法^[5-8]、APOLLO方法^[9-11]、CLAVR方法^[12]、CO₂薄片法^[13]等。考虑到MODIS自身多通道、高分辨率的特点，MODIS云检测业务算法利用了MODIS一级数据的19个通道数据和辅助数据(如太阳天顶角、海陆标记、地表高程、下垫面地理数据等)，采用多光谱阈值云检测法(如红外亮温差法、CO₂通道高云检测法、近红外卷云检测法和可见光通道反射率检测等)，可满足全球所有地表和光照条件，输出的业务产品为MOD35，分辨率为1 000 m和250 m。

MODIS云检测业务算法注意到大气中出现厚的气溶胶时会影响对晴空区的检测，因此对于出现厚的气溶胶(如沙尘暴、火山爆发和森林大火)的区域会进行气溶胶检测，并在云检测的输出结果中标记视场中被气溶胶污染的程度^[14]。气溶胶检测方法来源于文献[15]，其依据是沙尘暴的热红外通道亮温差(BT11 μm -BT12 μm)常为负值。

作为NASA发布的MODIS云检测业务产品，MOD35并不是MODIS的最终产品，它要为其它云参数和地表参数等产品提供辅助数据，因此云检测的好坏对其它MODIS产品的精度有很大影响。MOD35云检测结果不是简单的有云或无云，而是用可信度来表示，有四级可信度：云、可能晴空、可信的晴空和高可信度的晴空。另外，它包含许多其它信息(如气溶胶、海陆信息等)。虽然在大多数情况下被判定为云时表明该像元被云覆盖，但是也有可能被厚的气溶胶覆盖，因此在使用云检测结果时要与产品中的气溶胶信息相结合进行分析。

2.3 沙尘气溶胶识别

目前气象卫星沙尘遥感监测主要考虑了沙尘粒子的发射和散射特征，其基本原理是沙尘在可见光、近红外和红外波段的光谱特性与地表和云的差异性。沙尘粒子一方面反射、散射和吸收来自太阳的辐射，同时也吸收沙尘下方地表的长波辐射，并向外发射长波辐射。一般来说，在可见光通道，沙尘区的反射率介于晴空地表和云之间；在热红外波段，沙尘区的亮度温度介于云和晴空地表之间；在近红外波段，沙尘产生的辐射效应包含了反射、散射和热辐射三部分^[16-18]。

热红外波段辐射在沙尘天气遥感中有重要意义，地表加热状况、边界层热输送、沙尘层厚度、潜热转换以及辐射传递中的吸收消光等与沙尘天气的起因、强度和消散等有密切的关系，因此在沙尘天气监测中，热红外信息是重要的变量^[19]。利用热

红外通道监测沙尘的工作已有很多, Shenk 等^[20]利用单通道(10.5~12.5 μm)的亮温确定陆地沙尘, Ackerman^[21]利用红外温差(BT3.7 μm-BT11 μm)监测沙尘的爆发, Zheng 等^[22]利用气象卫星的亮温差(BT3.7 μm-BT11 μm)和反射率(R1.06 μm)的关系进行了沙尘暴监测研究, Gu 等^[23]综合用到 MODIS 热红外通道亮温差(BT11 μm-BT12 μm)和 11 μm 通道亮温两个判据研究了一次中国北部的沙尘暴; 延昊等^[24]利用辐射传输方程分析了不同沙尘气溶胶光学厚度下的热红外通道温差(BT11 μm-BT12 μm)的变化, 表明利用热红外通道温差进行陆地沙尘识别是可行的。Qu 等^[25]提出归一化沙尘指数, 可用来监测亮地表上的沙尘暴; Zhang 等^[26]研究了一次沙尘过程, 发现沙尘区的 BTD(11 μm-12 μm)常为负值, 并通过模拟发现 BTD(11 μm-12 μm)与沙尘粒子大小有准线性关系, 而 11 μm 的亮温 BT11 与沙尘光学厚度有准线性关系; Evan 等^[27]用 AVHRR 数据监测水面上光学厚度较大的沙尘, 算法主要基于沙尘与云的空间辐射均一性、BT11 和 BT12 的差异。利用热红外通道亮温监测沙尘的核心部分在于确定亮温差阈值。由于在热红外的 11 μm、12 μm 波段大气吸收较小, 而沙尘在 12 μm 波段的辐射要比在 11 μm 波段的辐射大, Ackerman^[15, 28]指出沙尘区域在 11 μm、12 μm 的亮温差 BTD(11 μm-12 μm)为负值。Gu 等^[23]通过统计研究进一步提出沙尘的 BTD 阈值应为 -0.5 K; Zhang 等^[26]和 Evan 等^[27]均采用了 -0.5 K 的阈值来识别沙尘。

利用热红外波段监测沙尘在亮地表和白天时较可见光波段具有明显的优势, 不过仅仅使用 11 μm、12 μm 的亮温差 BTD 监测沙尘是不够的, 因为沙尘的 BTD 与某些裸露地(如沙漠)的相近。由于沙尘气溶胶有一定的高度, 在热红外通道上沙尘的亮温是介于高温地表和低温云体之间。另外, 在近红外

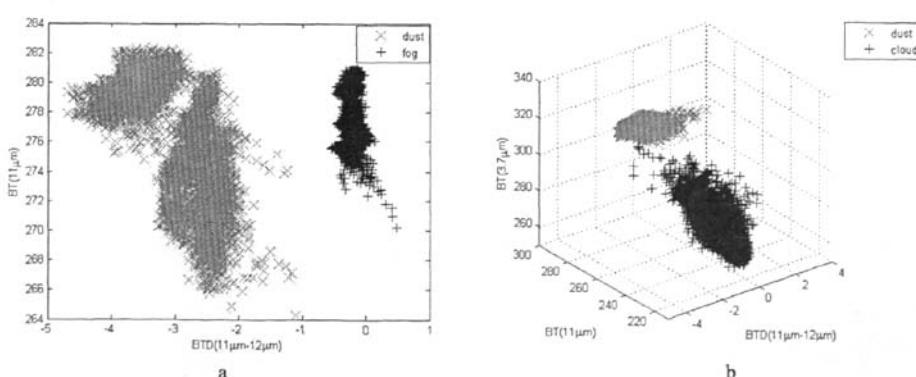
波段, 随着沙尘粒子的增大沙尘散射的能量成倍增加, 使得近红外波段成为沙尘的敏感波段, 是探测沙尘暴的理想波段。郭锐等^[29]利用 AVHRR 资料研究监测沙尘暴的方法时发现, 沙尘在 3.7 μm 通道上的亮温异常偏高, 并将其作为监测沙尘暴的指标, 取得了较好的效果。因此本文综合利用 MODIS 热红外通道和近红外通道来监测沙尘暴。

本文侧重讨论沙尘与云的区别, 为获取沙尘暴 11 μm、12 μm 的亮温差 BTD(11 μm-12 μm)、11 μm 亮温 BT11 μm 和 3.7 μm 亮温 BT3.7 μm 的监测阈值, 从表 1 所示的前 4 个沙尘个例中选择沙尘和云的样本。具体方法参考文献[25-26]的采样方法: 从 MODIS 三通道真彩色图像上可分辨出明显的棕黄色沙尘区域和白色的云区域, 根据这些特征选取 4 个个例沙尘和云的样本。考虑到区域大小的选择会影响样本的多样性, 我们尽量在沙尘区域的多个位置进行选择, 并考虑到不同种类的云(包括低云或雾、卷云、积云等)。图 1a 为雾与沙尘的 BTD(11 μm-12 μm)、BT11 μm 散点图, 虽然雾与沙尘的 11 μm 亮温有相似的表现形式, 但利用 BTD(11 μm-12 μm)可以很好地进行区分。根据选择的样本可得到 4 个个例沙尘和云的 BTD(11 μm-12 μm)、BT11 μm 与 BT3.7 μm 的散点图, 分别如图 1b~1e 所示, 从图中可看出沙尘和云呈现分离的聚类分布特征。

对于 BTD(11 μm-12 μm)、BT11 μm 和 BT3.7 μm 阈值的确定, 参考文献[30]确定降水判别阈值的方法, 引入损失率 f , 将其定义为,

$$f = \frac{D_c}{D} + \frac{C_d}{C} \quad (1)$$

其中 D 为沙尘总像元数, D_c 表示判断为沙尘实际为云的像元数; C 为云像元总数; C_d 表示判断为云实际为沙尘的像元数。



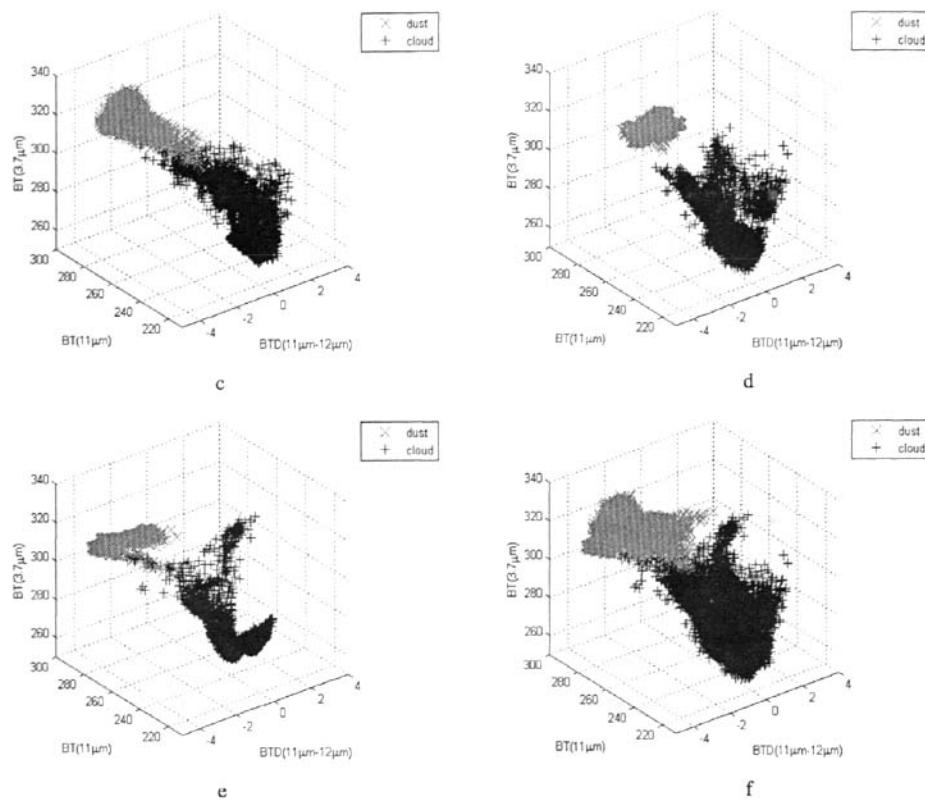


图 1 沙尘和云的散点图 a. 雾与沙尘的 $\text{BTD}(11 \mu\text{m}-12 \mu\text{m})$ 、 $\text{BT}11 \mu\text{m}$; b. 2004 年 3 月 27 日个例;
c. 2005 年 4 月 29 日个例; d. 2006 年 3 月 9 日个例; e. 2006 年 3 月 10 日个例; f. 所有沙尘和云样本。

考虑到不同时次不同区域沙尘的差异性,本文对 4 个个例的所有样本进行综合分析,如图 1f 为所有沙尘和云样本的散点图。计算阈值的方法:首先从散点图估算沙尘的 $\text{BTD}(11 \mu\text{m}-12 \mu\text{m})$ 、 $\text{BT}11 \mu\text{m}$ 和 $\text{BT}3.7 \mu\text{m}$ 的大致范围,然后依次计算在此范围内取不同值时的损失率,最后当损失率最小时得到 $\text{BTD}(11 \mu\text{m}-12 \mu\text{m})$ 、 $\text{BT}11 \mu\text{m}$ 和 $\text{BT}3.7 \mu\text{m}$ 的阈值。计算表明,当 $\text{BTD}(11 \mu\text{m}-12 \mu\text{m}) < -0.9 \text{ K}$, $260 \text{ K} < \text{BT}11 \mu\text{m} < 283 \text{ K}$, $307 \text{ K} < \text{BT}3.7 \mu\text{m} < 329 \text{ K}$ 时,损失率最小为 0.16%,因此将其作为本文判定沙尘区域的算法。

3 个例分析

应用上面分析得到的沙尘气溶胶监测算法,选择 2004 年 5 月 5 日和 2005 年 4 月 6 日 2 个有沙尘天气个例进行试验。国家气象卫星中心以 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $3.7 \mu\text{m}$ 波段反射率为沙尘识别的特异性信息,同时使用 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 波段的亮温差和 $11 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$

波段亮温差作为沙尘识别的普遍信息,根据地面实况资料和卫星真彩色图像进行综合分析,建立了准确的沙尘信息提取模型^[31]。本文使用了国家气象卫星中心发布的沙尘卫星监测产品来验证本文算法识别沙尘气溶胶的效果。在识别沙尘气溶胶的基础上,结合 MOD35 产品自身的厚气溶胶标记,对云检测数据进行了改进。

3.1 个例 1

根据国家气象卫星中心发布的沙尘监测结果,2004 年 5 月 5 日午后,受蒙古气旋大风区影响,内蒙古自治区东南部、辽宁西部、吉林西部等地出现扬沙天气。图 2a 是国家气象卫星中心发布的 EOS 环境卫星 5 月 5 日 05:21(世界时,下同)监测到的沙尘图像,棕黄色部分表示沙尘区域。为研究 NASA 的业务云检测对这片沙尘区域的判识结果,找到相应位置 1 000 m 空间分辨率的 MODIS 一级数据和 MOD35 云检测产品,将 MODIS 通道 1($0.65 \mu\text{m}$)、通道 4($0.55 \mu\text{m}$) 和通道 3($0.46 \mu\text{m}$) 合成三通道图(图 2b),另外读取 MOD35 的云检测结果(图

2c), 其中灰色代表云, 黄色代表可能晴空, 青色代表可信的晴空, 黑色代表高可信度晴空。参照国家气象卫星中心发布的沙尘监测结果, 从图 2b 和 2c

上在相应位置标出沙尘区域(红箭头所示)。从图 2c 的 MOD35 云检测结果来看, 它把这一区域判定为有云区域, 这应该是不合理的。

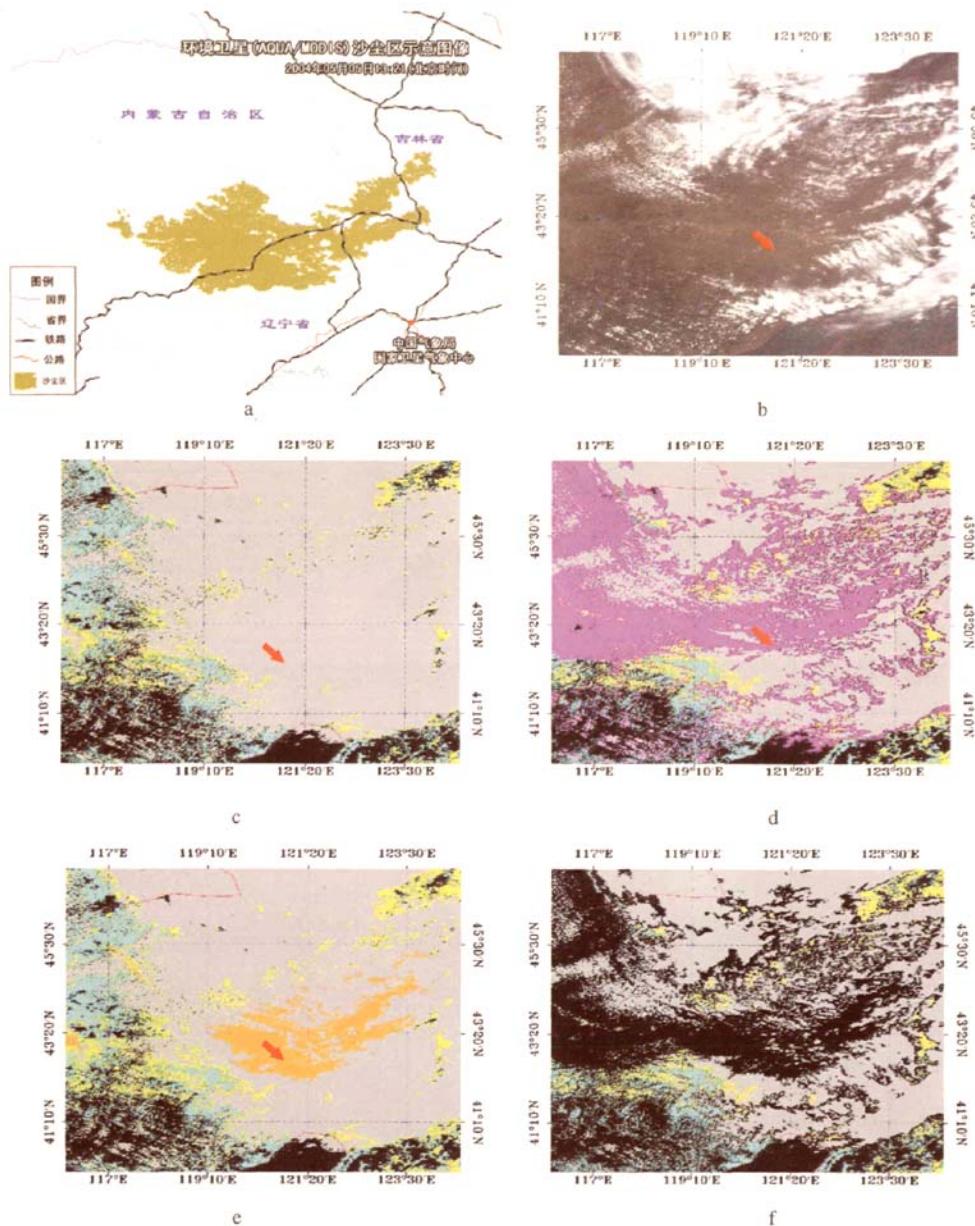


图 2 2004 年 5 月 5 日沙尘个例分析 a. 国家气象卫星中心发布的沙尘监测示意图; b. MODIS 三通道合成图 (RGB 分别为通道 1、4、3); c. NASA 发布 MOD35 云检测产品结果 (灰色代表云, 黄色代表可能晴空, 青色代表可信的晴空, 黑色代表高可信度晴空); d. NASA 发布 MOD35 云检测产品中气溶胶信息 (紫色代表气溶胶, 其余同 c.); e. 利用本文给出的沙尘气溶胶监测算法监测的沙尘结果 (橙色代表沙尘, 其余同 c.); f. 改进后的云检测结果 (颜色说明同 c.)。

由于 MOD35 云检测结果中有云意味着像元可能被云覆盖, 也有可能被厚的气溶胶覆盖, 因此要

检查像元是否被厚的气溶胶覆盖。为了检验此例中的沙尘区域是否已在 MOD35 中标记为气溶胶区域,

读取了 MOD35 的气溶胶信息 (图 2d), 其中紫色代表气溶胶, 灰色代表云, 黄色代表可能晴空, 青色代表可信的晴空, 黑色代表高可信度晴空。从图 2d 紫色区域来看, 它遗漏了大片沙尘气溶胶。

针对 MOD35 产品对沙尘气溶胶区域检测存在的问题, 利用本文给出的沙尘气溶胶监测算法进行沙尘区域的辅助判识, 得到监测结果如图 2e 所示, 其中橙色代表沙尘, 其它颜色同图 2c。图 2e 所示的沙尘区域基本与图 2a 的监测结果相符, 其左上、左中还存在小部分沙尘区域, 这可能是由于地表为沙

地所致。监测出沙尘区域后, 结合 MOD35 所标记的厚气溶胶区域, 将两者从云检测结果中设置为无云区域, 最终得到改进后的 MOD35 云检测结果 (图 2f), 颜色说明同图 2c。与三通道图 2b 和 2c 的对比表明, 改进后的结果较为合理。

3.2 个例 2

按照个例 1 的分析方式, 研究了 2005 年 4 月 6 日的个例 (图 3)。2005 年 4 月 6 日从蒙古国和我国内蒙古西部刮起大风, 北部沙漠戈壁的沙尘随风而起, 导致内蒙古自治区锡盟、呼盟出现沙尘天气。

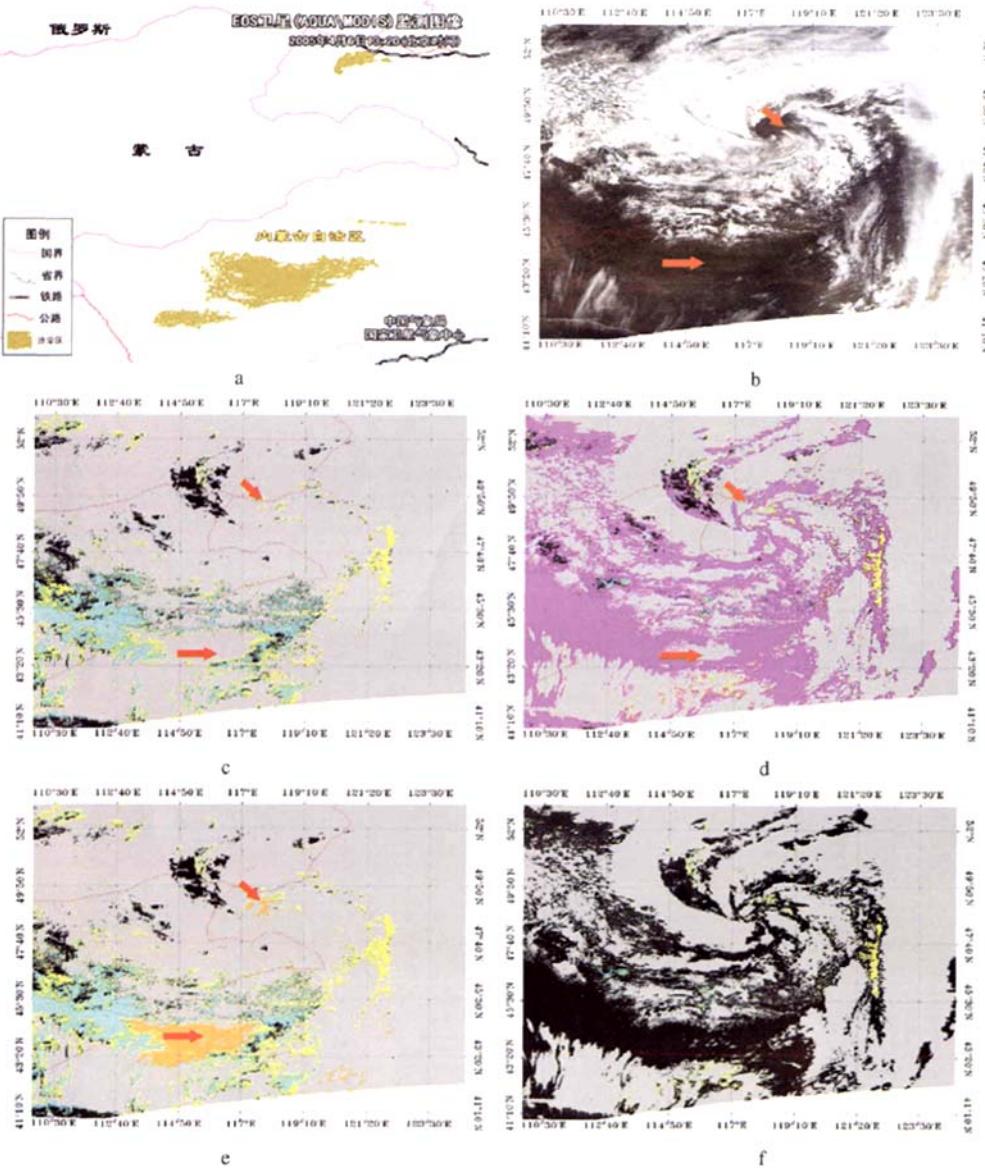


图 3 2005 年 4 月 6 日沙尘个例分析 说明同图 2。

图 3a 为国家气象卫星中心发布的沙尘监测示意图, 沙尘区域为棕黄色区域所示。在 1 000 m 空间分辨率的三通道图 3b 和 MOD35 云检测结果图 3c 中的相应位置, 红箭头标记出相应的沙尘区域)。图 3c MOD35 云检测结果显示它把这一沙尘区域判为有云区域。在图 3d 中, MOD35 云检测产品中气溶胶信息用紫色表示, 可以发现它虽然能标记出部分沙尘区域, 但是仍然遗漏了非常明显的沙尘。图 3e 显示了利用本文给出的沙尘气溶胶监测算法进行沙尘区域的辅助判识后得到监测结果, 代表沙尘的橙色区域与国家气象卫星中心发布的图 3a 监测结果比较符合。图 3e 右中、右下存在的沙尘区域, 图 3c 显示此处确实存在扬沙现象。综合利用沙尘区域的辅助判识结果和 MOD35 所标记的厚气溶胶区域, 得到改进后的云检测结果(图 3f)。参考三通道图 3b 与 3c 相比改进后的结果较为合理。

4 结 论

(1) 通过分析 NASA 的 MODIS 云检测业务产品 MOD35 对中国北方地区白天 2 个有沙尘气溶胶区

域的判识结果, 可知虽然产品能够识别出大部分厚气溶胶区域, 但仍会将部分沙尘区域误判为云。

(2) MOD35 中使用热红外通道亮温差法虽然对于一般沙尘发生区域的判别效果较好, 但考虑到某些裸露地(如沙漠)的亮温差与沙尘的亮温差相近, 需要使用热红外通道亮温差结合热红外通道和近红外通道亮温进行沙尘气溶胶的辅助判识, 结果表明此算法能有效地监测出产品中误判为云的沙尘区域。结合 MOD35 产品自身的厚气溶胶标记可得到改进的云检测产品。

(3) MOD35 是一个覆盖全球的云检测产品, 需要继续研究在非洲等其它沙漠地区是否也存在容易将含沙尘较多的像元判定为有云的问题。

(4) 文中只分析了白天数据, 由于算法使用的是热红外通道和近红外通道, 理论上也能监测出夜间的沙尘区域, 实际情况还需要进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 盛夏, 孙龙祥, 郑庆梅. 利用 MODIS 数据进行云检测[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(4): 99-102.
- [2] 汤琦, 毛节泰, 李成才. 利用 MODIS 资料对中国西部地区的云检测[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 990-1 000.
- [3] 中国气象局. 沙尘天气年鉴(2004 年)[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 75.
- [4] 中国气象局. 沙尘天气年鉴(2005 年)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 41.
- [5] ROSSOW W B. Measuring cloud properties from space: A review[J]. J Climate, 1989, 2(3): 201-213.
- [6] ROSSOW W B, GARDNER L C, LACIS A A. Global seasonal cloud variations from satellite radiance measurements Part I: Sensitivity of analysis[J]. J Climate, 1989, 2(5): 419-458.
- [7] SEZE G, ROSSOW W B. Time-cumulated visible and infrared radiance histograms used as descriptors of surface and cloud variations[J]. Int J Rem Sens, 1991, 12: 877-920.
- [8] ROSSOW W B, GARDNER L C. Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP[J]. J Climate, 1993, 6(12): 2 341-2 369.
- [9] SAUNDERS R W, KRIEBEL K T. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data[J]. Int J Remote Sens, 1988, 9(1): 123-150.
- [10] KRIEBEL K T, SAUNDERS R W, GESELL G. Optical properties of clouds derived from fully cloudy pixels[J]. Contr Phys Atmos, 1989, 62: 165-171.
- [11] GESELL G. An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data: An extension to the APOLLO software package[J]. Int J Remote Sensing, 1989, 10: 897-905.
- [12] ACKERMAN S A, STRABALA K I, MENZEL W P, et al. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS[J]. J Geophys Res, 1998, 103(D24): 32 141-32 157.
- [13] WYLIE D P, MENZEL W P, WOOLF H M, et al. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS[J]. J Climat, 1994, 7(12): 1 972-1 986.
- [14] ACKERMAN S A, STRABALA K I, MENZEL W P, et al. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS: Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35) [R]/Algorithm Theoretical Basis Document. (<http://eospso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>) , 1997.
- [15] ACKERMAN S A. Global satellite observations of negative brightness temperature difference between 11 and 6.7 μm [J]. J Atmos Sci, 1996, 53(19): 2 803-2 812.

- [16] 范红, 陈桂林. 应用米氏理论选择气象卫星探测沙尘暴的波段[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 271-275.
- [17] 吴润, 罗燕, 王卫国, 等. 矿气尘溶胶短波辐射效应的初步研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(3): 328-336.
- [18] 罗燕, 吴润, 王卫国. 利用 MODIS-GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 638-647.
- [19] 罗敏宁, 范一大, 史培军, 等. 多源遥感数据沙尘暴强度监测的信息可比方法[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 28-34.
- [20] SHENK W E, CURRAN R J. The Detection of Dust Storms overland and Water with Satellite Visible and Infrared Measurements[J]. Monthly Weather Review, 1974, 102(12): 830-837.
- [21] ACKERMAN S A. Using the radiative temperature difference at 3.7 and 11 μm to track dust outbreaks[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 27: 129-133.
- [22] ZHENG X J, LU W J, LUO J N. Research on the Dust storm Monitoring Using Multi-Channel Meteorological Satellite Data [J]. Journal of Remote Sensing China, 2001, 5(4): 300-305.
- [23] GU Y X, ROSE W I, BLUTH G J S. Retrieval of mass and sizes of particles in sandstorms using two MODIS IR bands: A case study of April 7, 2001 sandstorm in China[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(15): 1 805-1 815.
- [24] 延昊, 候英丽, 刘桂清, 等. 利用热红外温差识别沙尘[J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 471-474.
- [25] QU J J, HAO X J, MENAS K, et al. Asian dust storm monitoring combining terra and aqua MODIS SRB measurements[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(4): 484-486.
- [26] ZHANG P, LU N M, HU X Q, 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.
- [27] EVAN A T, HEIDINGER A K, PAVOLONIS M J. Development of a new over-water Advanced Very High Resolution Radiometer dust detection algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(18): 3 903-3 924.
- [28] ACKERMAN S. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations[J]. J Geophys Res, 1997, 102(D14): 17 069-17 079.
- [29] 郭锐, 梁芸. 利用 MODIS 资料定量判识沙尘暴方法研究[J]. 干旱气象, 2006, 26(1): 1-6.
- [30] LOVEJOY S, AUSTIN G L. The delineation of rain areas from visible and IR satellite data for GATE and mid-latitudes[J]. Atmos-Ocean, 1979, 20: 77-92.
- [31] 国家卫星气象中心 MODIS 共享平台建设沙尘暴监测与快速发布课题组. EOS/MODIS 沙尘暴监测与快速发布技术报告[R]. 北京: 国家卫星气象中心, 2004.

THE STUDY ON THE IMPROVEMENT OF CLOUD MASK PRODUCT OF MODIS BASED ON THE DETECTION OF DUST AEROSOLS IN NORTHERN CHINA

YE Jing^{1,2}, LI Wan-biao^{1,3}, LIU Hui-zhi³, CAI Shuang-peng²

(1. Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University,
Beijing 100871, China; 2. No.95871 PLA, Hengyang 421002, China;

3. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The operational cloud mask product of NASA named MOD35 is not only the primary ancillary input to other products for the atmosphere and land surface, but also the main criteria in the study of cloud detection at present. In order to evaluate the MOD35, the products that contain dust storms in northern China are studied in this paper. The cases show that some dust aerosols are misclassified as clouds in the MOD35. Based on the scatter diagram analysis of four daytime dust storms in northern China, the brightness temperature difference of thermal infrared bands (11 μm and 12 μm) and the brightness temperature range of these bands are obtained by calculating the loss rate, resulting in the improvement of the algorithm for detection of dust aerosols with the MODIS data. As the results of the improved algorithm are consistent with the dust products distributed by China Meteorological Administration, it is applied to distinguish the dusts that have been misclassified as clouds in MOD35 product and then to correct the MODIS cloud mask product combining the heavy aerosol signs in MOD35 itself.

Key words: cloud detection; thermal IR channel; dust aerosol; MODIS