

# 利用 MODIS 资料定量判识沙尘暴方法研究

郭 锐, 梁 芸

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘 要:** 为了利用 MODIS 资料对沙尘暴的范围和强度进行定量判识, 应用多时次 MODIS 多波段资料, 在对沙尘暴、云、雪和沙漠光谱特征进行较为细致分析的基础上, 寻找出能区分沙尘、云和地表的波段, 构建了 2 个定量判别沙尘暴范围和强度的沙尘指数, 并利用沙尘指数对 2002~2005 年多次 MODIS 沙尘暴的范围和强度进行判识。研究结果表明: 1) 沙尘在反射光谱段的光谱特征为反射率随着波长的增加而增大, 与土壤光谱特征相近; 大粒径沙尘反射率增长速率大于小粒径沙尘。2) 小粒径沙尘具有较典型的气溶胶特征, 对 0.46  $\mu\text{m}$  蓝光波段敏感, 对 1.6 和 2.1  $\mu\text{m}$  短红外波段不敏感。3) 大粒径沙尘不具有气溶胶特性, 对蓝光波段不敏感, 对短波红外敏感。4) 3.7  $\mu\text{m}$  和 8.5  $\mu\text{m}$  是对沙尘敏感波段, 2 波段的差可以作为判别沙尘的指标, 并在一定程度上反映沙尘强度。5) 设计的 2 个沙尘指数对监测沙尘十分有效, 且方法简单, 适于业务应用。

**关键词:** 沙尘暴; MODIS; 沙尘指数; 判识

**中图分类号:** TP79

**文献标识码:** A

## 引 言

沙尘暴是干旱半干旱地区常见的一种自然灾害, 沙尘暴不仅给所到之处的经济和社会带来较大的冲击, 而且对环境产生很大的影响。沙尘暴携带大量沙尘气溶胶粒子进入大气, 改变地气系统辐射平衡, 对地球系统产生重要影响。沙尘暴常发生在沙漠及其边缘地区, 中国西北干旱区为世界沙尘暴多发区之一。由于沙尘暴常发生在自然条件恶劣的地区, 常规观测站点极其稀少, 给沙尘暴的监测、预报和研究带来困难。

卫星覆盖范围广, 探测波段多, 是监测沙尘暴的有效手段。Carlson, T. N.<sup>[1]</sup>利用卫星观测的亮度资料确定撒哈拉地区沙尘的爆发及其相应的大气扰动, Norton, C.<sup>[2]</sup>等利用静止气象卫星在可见光波段的观测资料监测海洋上空的沙尘爆发, 并估算其光学厚度, Steven, A. A.<sup>[3]</sup>利用 3.7  $\mu\text{m}$  和 11  $\mu\text{m}$  的辐射亮温来监测沙尘爆发的路径, Kaufman<sup>[4]</sup>利用 TM 资料监测沙漠地区沙尘暴, 方宗义<sup>[5]</sup>等介绍了气象卫星监测沙尘暴的原理和方法, 郑新江<sup>[6]</sup>等利用气象卫星多通道信息监测沙尘暴, 江吉喜<sup>[7]</sup>等利用气象卫星云图资

料对沙尘暴的成因做了分析, 郭锐<sup>[8]</sup>等利用 AVHRR 数据, 通过对沙尘暴光谱特征分析, 研究定量提取沙尘暴范围和强度的方法, 取得了很好的效果。

搭载在 Terra 和 Aqua 上的 MODIS 探测器, 在 0.4~14  $\mu\text{m}$  的电磁波谱范围内有 36 个波段, 提供了较以往卫星探测器更多的信息, 为更有效地监测沙尘暴提供了丰富的信息源。韩涛<sup>[9]</sup>等根据 MODIS 可见光和近红外波段数据, 构造了不同的光谱特征判别函数, 利用决策树法对沙尘暴进行定量监测, 熊利亚<sup>[10]</sup>等运用新一代 MODIS 数据, 进行沙尘信息的遥感定量化提取方法研究。

本文通过对多次沙尘暴过程 MODIS 光谱特征的研究分析, 设计了定量判识沙尘暴范围及其强度的沙尘指数, 确定了定量监测沙尘暴的方法, 经过 2002~2005 年多次沙尘暴个例验证, 本方法能有效地监测沙尘暴且简单实用, 适用于沙尘暴业务监测。

## 1 资料来源及处理方法

MODIS 资料来源于中国气象局兰州干旱气象研究所 EOS/MODIS 卫星资料接收系统接收的 Terra

和 Aqua 的 MODIS 资料,该系统由中国气象局中国华云技术开发公司研制。选 2002、2004 和 2005 年多次沙尘过程 MODIS 资料,经过地理定位和辐射校正,并将 MODIS 各波段探测值转换为反射率或亮温。

## 2 研究方法

沙尘暴发生时,大量的沙尘粒子飘浮在空中形成沙尘云,沙尘粒子一方面反射、散射和吸收来自太阳的辐射,同时也阻挡沙尘下方下垫面的长波辐射,并向外射出长波辐射,使卫星传感器的探测值发生变化。MODIS 多通道资料为监测沙尘暴提供了有利条件。通过对多次沙尘暴过程 MODIS 光谱特征分析,确定对沙尘敏感的波段,对几个敏感波段进行组合,构建定量监测沙尘暴的沙尘指数,对沙尘暴范围和强度进行定量监测。

### 2.1 沙尘暴光谱特征分析

根据前人研究结果,沙尘在太阳反射波段表现为较高的反射率,反射率一般介于云和地表之间,在热红外波段则为较低的辐射亮温,亮温值在云、积雪和地表之间。由于云的类型多样、分布广泛,加之高山、戈壁、沙漠等复杂下垫面,给沙尘卫星遥感定量判识带来困难。研究表明,浓密的沙尘往往与云混淆,而较轻的沙尘又难以与沙漠、戈壁等高反射率的地表区分开来。中亚沙尘暴多发地分布着大片的戈壁、沙漠、盐碱地等高反射率的地表,同时西北地区海拔高度不均一,使沙尘暴的反射和辐射特征与某些下垫面相似,致使沙尘暴的定量监测更为复杂。

#### 2.1.1 沙尘暴个例

2004 年 3 月 27 日,受蒙古气旋南侧偏西大风影响,蒙古国东南部和内蒙古中部地区出现了大范围的沙尘暴,同时甘肃省河西走廊和青海柴达木盆地也出现了沙尘天气。图 1 是 11:36 分(北京时间)TERRA/MODIS 真彩色合成图(R、G、B:1、4、3),可以看到中国内蒙古中部与蒙古国交界处有一大片东北—西南走向的沙尘区,这片沙尘区的西面还有一些小范围的沙尘带;甘肃河西走廊和柴达木盆地也有较大范围的沙尘区存在。可以看到东部沙尘区与西部和南部沙尘颜色上有较大的差异,表明东部为沙尘暴,西部和南部为浮沉或扬沙天气。

万方数据

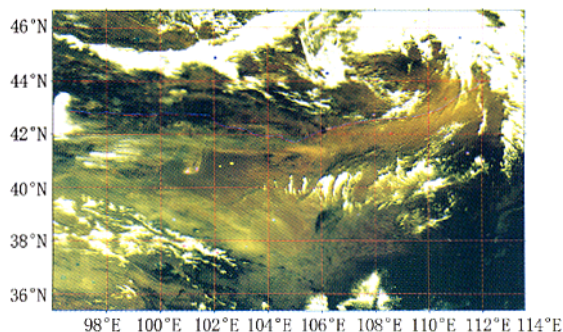


图 1 2004 年 3 月 27 日 Terra/MODIS 真彩色合成图

Fig. 1 The MODIS true color image on March 27, 2004

分别在东部沙尘区(红色)、西部和南部沙尘区(浅蓝和绿色)、沙尘边缘地表(紫色)、云区(蓝色)、积雪(浅红)、沙漠(黄色)选取若干个样本区,来分析云、雪、沙尘暴、沙漠、戈壁等不同样本区光谱特征。

#### 2.1.2 沙尘暴的反射特征

图 2 是不同样本区反射光波段光谱曲线,图中横坐标为波长,纵坐标为反射率。可以看到沙尘区、沙尘边缘地区、沙漠区光谱曲线有一致性,均随着波长的增加而增大,但在各波段表现不同。东部沙尘区在 0.469  $\mu\text{m}$  的蓝光波段(通道 3)反射率较西部和南部沙尘低,约 0.15,随着波长的增加反射率迅速上升,在近红外波段与西部和南部沙尘接近,通道 6(1.64  $\mu\text{m}$ )达最大约 0.4,7 通道略有下降。西部沙尘与南部沙尘特征很相似,2 条曲线几乎重合,在蓝光波段反射率约 0.23,较东部沙尘高,随着波长的增加反射率缓慢上升,也在 6 通道达最大,约 0.34。其它类型地表(沙漠、沙尘边缘地区、盐碱地)反射率也随波长增加,沙漠、沙尘边缘地区反射率低于沙尘区,盐碱地高于沙尘区。

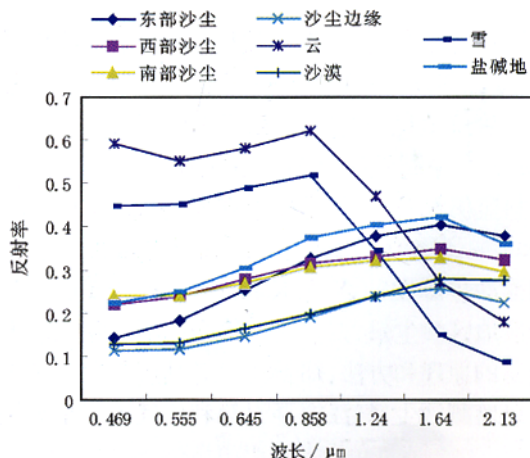


图 2 不同样区反射光波段光谱曲线

Fig. 2 Spectrum curves of reflectance from various sample regions

云和积雪反射率在可见光和近红外波段较高，在短波红外区直线下降，7 通道达最低。在近红外波段( 通道 2 )沙尘与其他样本差异最大，是区分沙尘的最佳波段。

比较 MODIS 单通道图像可以发现，3 通道图像上( 图略 )，云、积雪呈白色，东部的沙尘色调很暗与周围地表相近，西部和南部沙尘较亮，呈灰白色。随着波长的增加，东部沙尘逐渐白亮起来；在红光和近红外波段( 通道 1、2 )图像中，云、沙尘和各类地表均比较清晰，沙尘为灰白色；至短波红外的 6、7 通道，东部沙尘区变得更加清晰( 为白亮色 )，而西部和南部沙尘则与周围陆地很难区分开来。由气溶胶在蓝光波段散射较强，地表反射率通常比较暗，以及 2.1 μm 对气溶胶不敏感的特点可知，西部和南部沙尘具有较典型的气溶胶的特征，为粒径较小浮尘。而东部沙尘粒子粒径较大，不具有气溶胶的特征，对蓝光波段不敏感，对位于短波红外的 6、7 通道敏感。由于 Aqua/MODIS 通道 6 有很严重的干扰条带，因此选通道 7 为监测沙尘的通道。

根据以上分析，设计了利用 MODIS 反射波段判别沙尘暴的沙尘指数  $NDSI$ ，

$$NDSI = (B7 - B3) / (B7 + B3) \tag{1}$$

式中  $B3$ 、 $B7$  分别为通道 3 和 7 的反射率。

从各样本区在  $NDSI$  和通道 2 上的散点图( 图 3 )中可以看到， $NDSI$  能够很好地将沙尘和云、雪区分开来，对东部沙尘暴判别较好，但对西部和南部沙尘与沙漠等高反射率地表判别不好。如以  $NDSI$  和通道 2 为判别指标，在沙漠等高反射率地表和较弱沙尘的判别上会产生误差。

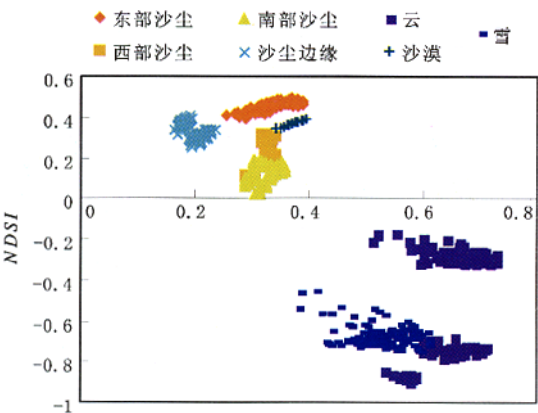


图3 各样本区在  $NDSI$  和通道 2 上的散点图

Fig. 3 The scatter plots of  $NDSI$  and band 2

from various sample regions

2.1.3 沙尘暴的辐射特征

沙尘暴发生时，气流把大量的沙尘粒子带到大气中，形成沙尘云。沙尘粒子一方面反射、散射太阳短波辐射，另一方面阻挡并吸收地球长波辐射。在短波红外波段，既包含太阳短波辐射，又有地气系统热辐射，沙尘产生的辐射效应包含反射、散射和热辐射 3 部分。

根据范红<sup>[10]</sup>等研究结果，沙尘的散射能力与沙尘粒径有很大关系，沙尘粒径越大所产生的散射越强。直径为 1.5 μm 的沙尘粒子在波长为 0.7 和 3.9 μm 的散射效率因子分别为 2.3125 和 0.395；当直径增加到 2.5 μm 时，粒子在这 2 个波段散射效率可达 2.7988 和 1.7984，比直径为 1.5 μm 的沙粒增加了 1.21 和 4.55 倍。而且，当散射效率因子 > 1 时，被粒子扰动的那块入射波波阵面面积要大于粒子本身的几何截面，粒子可以扰动它所占有截面以外的电磁波并把它散射出去。这表明在短波红外波段，随着沙尘粒子的增大，沙尘散射的能量成倍增加。

上述结果说明，短波红外波段为沙尘的敏感波段，是探测沙尘暴的较好波段。郭锐<sup>[8]</sup>等利用 AVHRR 资料研究监测沙尘暴的方法时发现，沙尘在 3.7 μm 上亮度温度异常偏高，并用其作为监测沙尘暴的指标，取得了较好效果。

从 MODIS 红外波段亮度温度变化曲线( 图略 )，可以看到在 3.75、8.55、11 和 12 μm 波段处沙尘与其他样本区差别较大。通过分析发现 8.55 μm 包含较多沙尘信息，提出另一个沙尘指数  $DSI$ ：

$$DSI = (B20 - B29) \tag{2}$$

式中  $B20$ 、 $B29$  分别为 MODIS 通道 20 和 29 的亮温，单位：K。

在以  $NDSI$ 、 $DSI$  这 2 个沙尘指数为坐标的散点图上( 图 4 )，可以看到利用 2 个沙尘指数能将沙尘与其他目标很好地区分开来。东、西和南部的几个沙尘区不仅与云、积雪很好地区分开来，也与沙漠等无沙尘地表区分开来。通过对多次沙尘暴个例研究表明， $DSI$  不仅可以区分沙尘暴，其数值大小还可以反映沙尘强度。



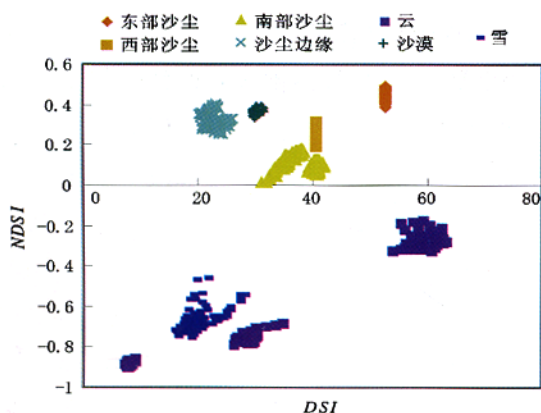


图4 沙尘指数的散点图

Fig. 4 The scatter plots of two indices from various sample regions

### 3 判别结果

分别取  $NDSI > 0$  和  $DSI > 33$  为判别阈值,对 2004 年 3 月 27 日 Terra/MODIS 资料进行沙尘定量判别,并根据  $DSI$  大小对沙尘强度进行划分,结果如图 5 所示。与图 1 对比,可以看到沙尘暴的范围和强度与 MODIS 真彩色合成图目视结果一致,与气象站沙尘暴监测记录对比,除云覆盖下沙尘卫星无法判别外,其他地区判别结果令人满意。

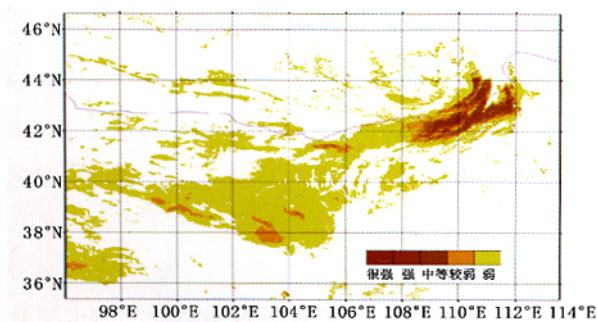


图5 利用沙尘指数对 2004 年 3 月 27 日沙尘暴判别图

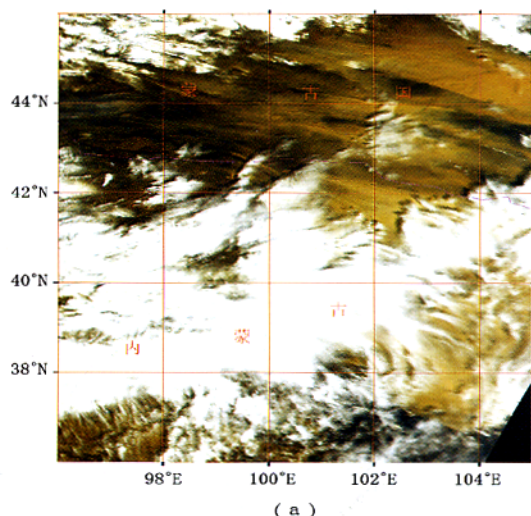
Fig. 5 The result extracting sand dust using two indices on March 27 2004

### 4 个例验证

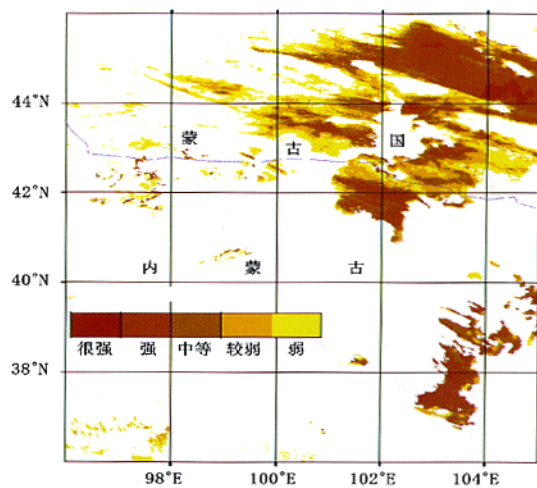
为了检验本判别方法的通用性,分别选取 2002 年 3 月 19 日席卷蒙古国南部、中国北方大部分地区,并影响到日本的特强沙尘暴,2002 年 2 月 19 日发生在甘肃和内蒙交界处的局地沙尘暴,2002 年 3 月 29 日发生在中国西北部中等程度沙尘暴,2004 年 3 月 28 日发生在内蒙中部和蒙古境内的沙尘暴以及 2005 年 4 月 17-18 日影响我国中东部的沙尘暴进行验证。

将 Terra/ MODIS 资料按本文研究方法计算  $NDSI$  和  $DSI$  2 个沙尘指数,并对沙尘暴强度进行区分。

图 6a、6b 是 2002 年 3 月 19 日 Terra/ MODIS 真彩色合成图和沙尘定量判别结果图。由图 6 a 可以清楚地看到,蒙古国南部有大片沙尘区,主要分布在  $102^{\circ}\text{E}$  ~  $105^{\circ}\text{E}$ ,  $44^{\circ}\text{N}$  ~  $46^{\circ}\text{N}$  范围内,我国内蒙古西部和西北部地区也有大范围沙尘区存在,由于有大范围云遮挡,仅能看见内蒙西部地区沙尘区。MODIS 真彩色合成图和沙尘定量判别结果显示,这次强沙尘暴有 2 个中心,一个位于蒙古国南部,沙尘范围大,强度强;另一中心位于我国内蒙西部和甘肃西部,受云的影响,卫星定量判别结果仅能显示部分沙尘区域,可以看到沙尘范围、强度判别效果与实际一致。



(a)



(b)

图6 2002 年 3 月 19 日沙尘暴真彩色合成图(a)和沙尘定量判别结果(b)

Fig. 6 The true color image on March 19 2002(a) and quantitative identification result of dust sand(b)

图 7a、7b ,分别是 2002 年 2 月 19 日甘肃、内蒙交界处的局地沙尘暴 MODIS 真彩色合成图和沙尘定量判识图 ,可以看到沙尘的范围和强度定量判识结果与彩色图目视结果相吻合。

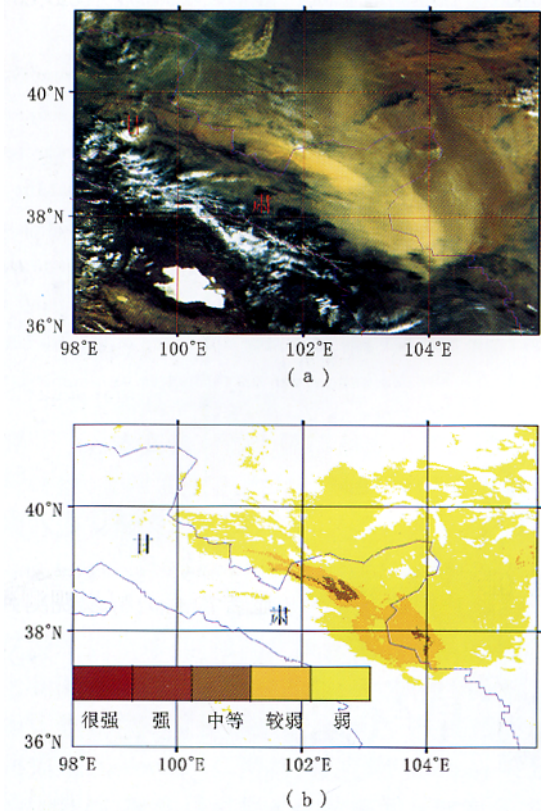


图 7 2002 年 2 月 19 日沙尘暴真彩色合成图( a )及沙尘定量判识( b )

Fig. 7 The true color image on Feb. 19 2002( a ) and quantitative identification result of dust sand( b )

其他几次沙尘个例卫星判别结果也与实际非常接近 ,在此就不赘述。在几次沙尘判别中 ,所用的阈值几乎非常接近 ,表明本方法对沙尘暴判识有很好的适用性。

5 结论与问题

( 1 ) 沙尘在 MODIS 反射光波段光谱特征为反射率随着波长的增加而增大 ,大粒径沙尘反射率增长速率大于小粒径沙尘。

( 2 ) 小粒径沙尘具有较典型的气溶胶特征 ,对 0. 46  $\mu\text{m}$  蓝光波段敏感 ,对 1. 6 和 2. 1  $\mu\text{m}$  短红外波段不敏感。大粒径沙尘不具有气溶胶特性 ,对蓝光波段不敏感 ,对短波红外敏感。

( 3 ) 3. 7  $\mu\text{m}$  和 8. 5  $\mu\text{m}$  是对沙尘敏感波段 ,2 波段的差可以作为判别沙尘的指标 ,并在一定程度上反映沙尘强度。

( 4 ) 本文设计了定量判别沙尘范围和强度的 2 个沙尘指数 ,经实际检验对监测沙尘十分有效 ,且方法简单 ,适于业务应用。

( 5 ) 由于缺乏地面沙尘强度观测数据 ,本文沙尘强度的判别是相对的 ,还需要在这方面做更多的工作。

参考文献 :

[ 1 ] Carlson T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data[ J ]. Monthly Weather Review ,1979 ,107 :322 - 335.

[ 2 ] Norton C , Mosher F R , Hinton B , et al. A model for calculating desert aerosol turbidity over the oceans from geostationary satellite data[ J ]. Journal of Applied Meteorology ,1980 ,19 :633 - 644 .

[ 3 ] Steven A A. Using the radiative temperature difference at 3. 7  $\mu\text{m}$  and 11  $\mu\text{m}$  to track dust outbreaks[ J ]. Remote Sensing of Environment ,1989 ,27 :129 - 133.

[ 4 ] Yoram J Kaufman , Arnon Karnieli , Didier Tanré. Detection of Dust Over Deserts Using Satellite Data in the Solar Wavelengths[ J ]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 2000 ,38 : 252 - 531.

[ 5 ] 方宗义 , 张运刚 , 郑新江 , 等. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[ J ]. 第四纪研究 2001 21( 1 ) :48 - 55.

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[ J ]. 应用气象学报 ,1995 6( 2 ) :177 - 184.

[ 8 ] 郭锐 , 倾继祖. NOAA 卫星沙尘暴光谱特征分析及信息提取研究[ J ]. 高原气象 2004 23( 5 ) 643 - 647.

[ 9 ] 韩涛 , 李耀辉 , 郭锐. 基于 EOS/MODIS 资料的沙尘信息遥感定量监测模型研究[ J ]. 高原气象 2005 24( 5 ) :757 - 764.

[ 10 ] 熊利亚 , 李海萍 , 庄大方. 应用 MODIS 数据研究沙尘信息量化方法探讨[ J ]. 地理科学进展 2002 21( 4 ) 327 - 332.

[ 11 ] 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.

## A Study on Quantitative Identification of Sand and Dust Storm Using MODIS Data

GUO Ni , LIANG Yun

( Institute of Arid Meteorology , CMA , Key Laboratory of Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province , Lanzhou 730020 , China )

**Abstract** In order to detect the scope and intensity of sand and dust storm quantitatively by using MODIS data , the spectrum characteristics of sand and dust storm , cloud and snow were analyzed in detail using several MODIS data , bands that can distinguish sand and dust from cloud and surface were detected , two indices for determining the scope and intensity of sand and dust storm were found out and tested in several cases. Our study shows : 1 ) The spectrum characteristic of sand and dust in solar wavelengths is that the reflectance increases with the wavelength , this is similar to soil , and the reflectance of large size dusts increases faster than small size dusts. 2 ) Small size dusts show typical characteristic of aerosol , which are sensitive to blue band of  $0.46\ \mu\text{m}$  and insensitive to short - wave infrared bands of  $1.6$  and  $2.1\ \mu\text{m}$ . 3 ) Large size dusts do not have aerosol characteristic , they are insensitive to blue band and sensitive to short - wave infrared bands. 4 ) Dusts are sensitive to bands of  $3.7\ \mu\text{m}$  and  $8.5\ \mu\text{m}$  , and the difference of the two bands can be used to identify sands and dusts and reflect the intensity to certain extent. 5 ) The two indices are very effective to monitor sands and dusts , and the method is simple and easy for operational use.

**Key words** dust storm ; MODIS ; sand index ; identification

## 欢迎订阅 2006 年《干旱气象》

《干旱气象》是中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办的专业学术期刊 , 国内外公开发行人。《干旱气象》辟有研究论文、短论、应用技术报告、研究综述和学术争鸣等栏目 , 主要刊登有关干旱气象的最新研究成果、发展动向和趋势 ; 气象科学各学科具有创造性的论文 ; 有推广价值的技术经验 ; 有关国内外气象科技的新理论、新技术、新方法等方面的短论和研究综述。《干旱气象》已被《中国期刊网》、《中国学术期刊( 光盘版 CAJ - CD )》、万方数据 - 数字化期刊群、中国核心期刊( 遴选 ) 数据库全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强 , 是进行学术交流的窗口。适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为季刊 2005 年正刊 4 期 , 每期定价 16 元 , 全年 64 元。欢迎广大读者订阅 , 并可以随时邮局汇款购买 , 款到开正式发票。

联系地址 : 甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部

邮政编码 : 730020 电话 : ( 0931 ) 4670216 - 2270

电子信箱 : GSQX@ chinajournal. net. cn

银行汇款 : 兰州市工商银行拱星墩分理处

户 名 : 中国气象局兰州干旱气象研究所

帐 号 : 2703001509026401376

邮 汇 : 兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部