

文章编号:1004-4574(2003)02-0028-07

## 多源遥感数据沙尘暴强度监测的 信息可比方法

罗敬宁<sup>2,3</sup>, 范一大<sup>1,2</sup>, 史培军<sup>1,2</sup>, 陆文杰<sup>3</sup>, 周俊华<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源信息  
科学与工程研究中心, 北京 100875; 3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**综述了利用遥感技术进行沙尘暴监测研究的国内外进展,提出了利用多源遥感数据识别和提取沙尘暴信息的新方法,利用近红外 1.6 $\mu\text{m}$  波段特性,构建了可比沙尘强度指数。研究表明:利用卫星探测器 11 $\mu\text{m}$ , 12 $\mu\text{m}$  波段差值进行沙尘暴信息识别和提取,可以达到满意的效果,但不能刻画沙尘暴强度;构建的可比沙尘强度指数,能够解决多源遥感数据由于卫星平台、监测时间、监测区域等不同因素导致的监测结果不可比的问题;同时监测结果与地面气象站监测数据有较好的一致性,能够从时间、空间两方面刻画沙尘暴强弱分布,可以作为沙尘暴定量研究的参数,为利用多源遥感数据持续定值地监测沙尘暴的起源、移动、传输路径、扩散等特征奠定了基础。

**关键词:**可比沙尘强度指数;多源遥感数据;沙尘暴;信息提取

中图分类号:P425.5<sup>+</sup>5; TP79

文献标识码:A

### Information-comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing

LUO Jing-ning<sup>2,3</sup>, FAN Yi-da<sup>1,2</sup>, SHI Pei-jun<sup>1,2</sup>, LU Wen-jie<sup>3</sup>, ZHOU Jun-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center of Resources Information Engineering, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. National Satellite Meteorological Center, China Meteorology Bureau, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the advance in research on dust storm by remote sensing, this paper presents a new approach of identifying and extracting dust storm information by multisource data of remote sensing as well as a new index of comparable dust storm intensity by the nature of 1.6 $\mu\text{m}$  of NIR. The result shows that it can result in a good effect using the spectrum of 11 $\mu\text{m}$  and 12 $\mu\text{m}$  when identifying and extracting dust storm information, but it can not indicate the intensity of dust storm; The comparable dust storm index can resolve many unmatched problem coming from the difference of sensor of satellite, monitoring time and monitoring region. In addition, the monitoring result of remote sensing is consistent with the data of ground perfectly, which can indicate the distribution of dust storm intensity temporally and spatially. As a good parameter of dust storm, the index is a perfect method to persistently and quantitatively monitor the source, moving track and diffusion of dust storm by using multisource data of remote sensing.

**Key words:** comparable dust intensity index; multisource data of remote sensing; dust storm; information extraction

收稿日期:2003-02-20; 修订日期:2003-03-25

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999043406; C2000048701)

作者简介:罗敬宁(1974-),男,贵州贵阳人,工程师,硕士,主要从事气象卫星遥感灾害监测应用研究。

沙尘暴是由特殊的地理环境和气象条件形成的一种较为常见的自然现象<sup>[1]</sup>,主要发生在沙漠及其临近的干旱与半干旱地区。沙尘暴的频频发生,也是生态环境恶化的重要标志之一,有着警示作用<sup>[2]</sup>。沙尘暴过程对生态系统的破坏力极强,它能够加速土地荒漠化,对大气环境造成严重的污染,使城市空气质量显著下降,对人类健康、城市交通、通讯和供电产生负面影响。同时,沙尘气溶胶对气候、海洋生态系统和生物化学循环也有着重要影响。

沙尘暴的监测方法中,传统的地面监测方法受到许多因素的制约,不能很好地刻画沙尘暴过程。卫星遥感技术可以从空间上捕捉沙尘天气动态信息,而且时间分辨率高,是目前最为有效的监测、跟踪、分析沙尘天气的手段。随着遥感技术的不断发展,利用多源遥感数据监测沙尘暴,提取沙尘暴信息,定量分析沙尘暴的有关参数,已成为沙尘暴研究的热点。

国内外对沙尘暴的遥感监测方法进行了大量研究,基本上都是使用气象卫星数据。20 世纪 90 年代以前的沙尘暴研究工作仅局限于单通道信息的处理和分析<sup>[3,4]</sup>,之后,随着卫星探测器性能的不断改进,计算机处理能力的提高,加之相关理论和方法研究的重大突破,为利用多通道遥感数据进行沙尘暴监测的研究应用奠定了基础。其中郑新江等<sup>[5]</sup>根据光谱波长对沙尘暴的反应特征,建立了 0.63 $\mu\text{m}$  和 1.06 $\mu\text{m}$  波长反射率与 3.75 $\mu\text{m}$  和 11.0 $\mu\text{m}$  波长亮温的统计关系,用于沙尘暴监测,取得了较好的效果;方宗义等<sup>[6]</sup>利用 NOAA/AVHRR 通道 3,4 的差值来判识沙尘暴区,突出沙尘信息的纹理结构,并指出:如果将差值辐射亮温图与红外通道联合使用,可以解决差值辐射亮温图难以将沙尘区与云区有效区别开来的问题;范一大等<sup>[7]</sup>给出了利用查找表增强沙尘暴影像的方法,同时探讨了沙尘暴信息提取和强度监测的方法。此外,叶笃正<sup>[8]</sup>、孙司衡<sup>[9]</sup>等应用卫星遥感监测信息,并结合 GIS 技术,对 2000~2001 年沙尘暴过程的起源、空间分布、移动路径和降尘区域进行了研究;江吉喜等<sup>[10]</sup>的研究表明,利用 GMS-4 数字展宽红外资料和部分常规资料,可以分析出特强沙尘暴过程中强冷锋前部的中尺度对流系统(MCS)及其伴随的飑线的卫星云图特征;许多人<sup>[11-14]</sup>利用不同的卫星数据研究了沙尘暴光学厚度的反演方法,但由于陆面反射要比海面反射更为复杂,所以目前的方法都是在水面上进行的。由于下垫面状况是沙尘暴形成、加强以及时空分布主要因素之一,因此,近年来大量研究<sup>[15-18]</sup>趋向于通过遥感技术反演沙尘暴途经区域下垫面的有关参数,分析其与沙尘天气形成和演化间的关系,并取得了阶段性的成果。

本文利用气象卫星多源遥感数据,结合地面实测数据,提出了沙尘暴信息识别、提取的新方法;针对目前沙尘暴定量研究中存在的多源遥感数据监测结果不可比的问题,详细介绍了可比沙尘强度指数的构建方法,并结合近两年气象卫星沙尘暴遥感数据,对可比沙尘强度指数的特性进行了分析。

1 数据来源及预处理

目前,气象卫星是沙尘天气遥感监测的主要数据源,包括 NOAA/AVHRR, Terra/MODIS, GMS/VISSR 数据和 FY-1C/D 数据,空间分辨率从 250m~5km,光谱范围覆盖可见光、近红外和红外,其中 MODIS 数据的光谱分辨率有了显著的提高,通道数增加到了 36 个。

本文研究所用数据来源于中国气象局,主要包括 NOAA KLM 和 FY-1C/D 卫星遥感数据,以及相应气象站测得的能见度数据。NOAA KLM 系列卫星是由美国 NOAA 和 NASA 联合研制的新一代极轨气象卫星,1998 年该系列第一颗卫星 NOAA-15 发射成功,目前已经先后发射了 NOAA-16 和 NOAA-17。NOAA KLM AVHRR/3 探测器共有 6 个探测波段,但只有 5 个波段同时工作,波段 3A 和 3B 选择工作,目前在中国过境时只有波段 3A 处于工作状态。FY-1C/D 是我国自行研制的极轨气象卫星,多通道可见光红外扫描辐射计(MVIRS)是风云一号的主要探测仪器,共有 10 个探测波段。沙尘暴研究中常用波段及特征见表 1。

表 1 卫星遥感探测波段参数  
Table 1 Variables of satellite sensor bands

NOAA	波段号	CH1	CH2	CH3A	CH3B	CH4	CH5
KLM	波长/ $\mu\text{m}$	0.58~0.68	0.725~1.0	1.58~1.64	3.55~3.93	10.3~11.3	11.5~12.5
FY-	波段号	1	2	3	4	5	6
1C/D	波长/ $\mu\text{m}$	0.58~0.68	0.84~0.89	3.55~3.93	10.3~11.3	11.5~12.5	1.58~1.64

研究所用遥感数据空间分辨率为  $1\text{km} \times 1\text{km}$ , 数据的质量检验、定标、定位、太阳高度角订正、临边变暗订正和大气纠正等预处理, 全部由中国气象局卫星气象中心完成。数据经预处理后, 进行投影变换, 生成分通道的局地文件, 每个像元数值采用无符号双精度整数表示。由于本研究的图像处理工作是在 ERDAS IMAGINE 8.4 平台下实现, 因此, 需利用该软件提供的 IMPORT 模块, 将数据导入。其间需要选取地面控制点 (GCPs) 进行几何变换, 以纠正由于地球曲率和卫星观测角度的变化引起的图像扭曲。

## 2 监测原理

在遥感数据中, 可见光和近红外通道可用来测算下垫面的反射率, 对地表植被、云和水体较为敏感; 热红外通道可以用来测算下垫面的亮度温度。通过研究沙尘的光谱分布特征和粒子构成的物理特征表明, 沙尘信息在遥感数据的各波段上均有强弱不同的反映, 因此在沙尘的识别过程中, 必须综合考虑各有关波段的特性。

沙尘暴的发生改变了遥感信息的重要传输介质——大气的特性, 当利用卫星遥感技术对沙尘暴进行遥感监测时, 遥感信息在沙尘暴影响区的传输是相当复杂的。沙尘暴多由大粒子物质组成, 其粒子的反射特性更容易被卫星遥感探测获取, 沙尘暴的监测实质就是如何在遥感数据中区分沙尘、大粒子云、气溶胶等具有较大相似性的粒子。由于沙尘粒子的分布跨度较大, 观测到的粒子的半径  $r$  可以从  $0.1 \sim 100\mu\text{m}$ , 较强沙尘天气粒子半径分布最大值常在  $5 \sim 10\mu\text{m}$  之间<sup>[5]</sup>。在可见光波段, 当比值  $r/\lambda \gg 1$ , 出现无选择性散射。另外, 大气分子与微粒气溶胶对可见光有较强的散射, 成为大气沙尘遥感的干扰因素。而对于近红外  $1.6\mu\text{m}$  波段, 沙尘粒子半径与波长接近, 适合用米氏散射解释, 并且大气分子与微粒气溶胶对红外辐射干扰较小, 从而在监测较强的大气沙尘时, 可以忽略分子与微粒气溶胶的影响。同时  $1.6\mu\text{m}$  波段对大气沙尘的遥感特征是线性分布的, 即它的测值与沙尘强度的变化相一致, 这对沙尘暴的监测具有重要意义。

热红外辐射在沙尘天气遥感中也有重要意义。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、强度和消散等有显而易见的关系, 因此, 在沙尘天气的遥感监测中, 热红外辐射信息是重要变量。

## 3 方法研究

### 3.1 沙尘信息提取方法

沙尘信息提取是沙尘暴定量研究的关键步骤。新一代 NOAA 卫星和 FY-1C 卫星都配置了位于  $11\mu\text{m}$  和  $12\mu\text{m}$  的热红外波段, 经过大量研究已证实, 这两个波段对沙尘反映比较敏感。前人的研究中<sup>[19,20]</sup>将  $11\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$  波段的差值作为沙尘暴监测的主要参数, 并将其引入定量计算模型。

根据辐射传输理论, 干燥沙尘对  $11\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$  红外波段辐射有不同的吸收衰减, 其中对  $11\mu\text{m}$  波段衰减略强于  $12\mu\text{m}$  波段, 即在卫星传感器  $11\mu\text{m}$  波段上探测到的辐射通量将减少, 使得  $12\mu\text{m}$  波段的探测值大于  $11\mu\text{m}$  波段。因此, 可以利用卫星传感器在  $11\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$  波段探测值的差值提取沙尘信息, 提取公式为:

$$\Delta T = \begin{cases} T_{12} - T_{11} & (T_{12} - T_{11} \geq 1\text{K}) \\ 0 & (T_{12} - T_{11} < 1\text{K}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_{12}$  和  $T_{11}$  分别表示卫星数据在  $12\mu\text{m}$  和  $11\mu\text{m}$  波段的亮温。

通过大量数据验证, 当  $\Delta T \geq 1\text{K}$ ,  $T_{11}$  和  $T_{12}$  都小于  $290\text{K}$  时, 表明是沙尘暴影响区。如果把差值变成比值运算, 也可以确定沙尘信息提取的阈值。

利用上述方法, 对 2002 年 4 月 6 日 13 时的 NOAA/AVHRR 影像进行了沙尘信息提取 (如图 1), 取得了满意的结果。

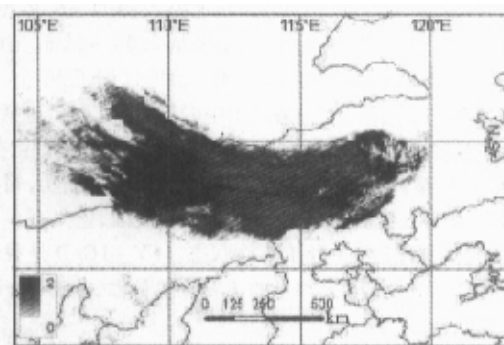


图 1 利用  $12\mu\text{m}$ 、 $11\mu\text{m}$  波段差值提取沙尘暴信息结果图 (NOAA/AVHRR2002-02-02)

Fig.1 Information extraction result of dust storm by difference of band between  $12\mu\text{m}$  and  $11\mu\text{m}$

通过进一步分析发现,随着沙尘浓度的增加, $\Delta T$  会出现先增后减的现象,即  $\Delta T$  与沙尘浓度之间呈非线性变化。图 2 为根据  $\Delta T$ 、可见光 0.65 波段反射率(记为  $R_{0.65}$ )和地面水平能见度数据绘制的沙尘暴在此三维空间中的分布图。

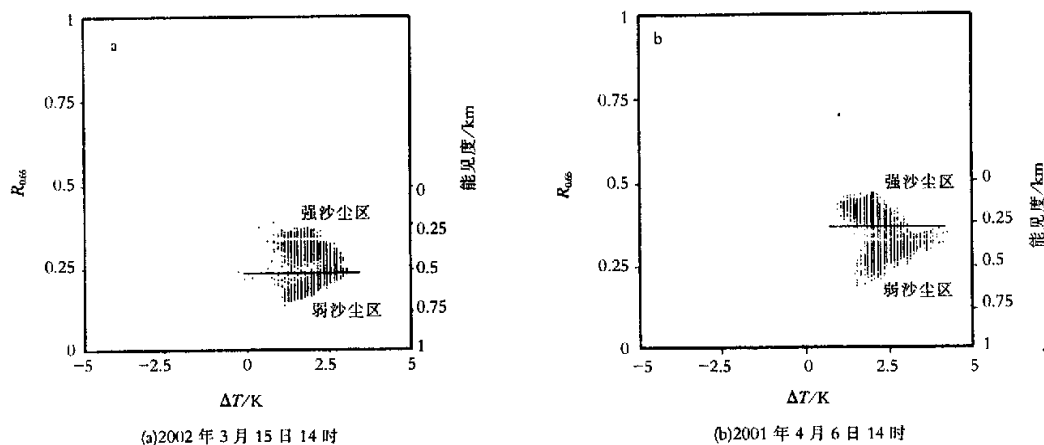


图 2 沙尘暴三维空间( $\Delta T$ ,  $R_{0.65}$  和能见度)分布图

Fig.2 Three dimension distribution of dust storm( $\Delta T$ ,  $R_{0.65}$  and visibility)

由于地面水平能见度是气象学中评价沙尘天气强弱的重要指标,同时  $R_{0.65}$  也与沙尘强度呈正相关,因此分析图 2 可知:随着沙尘强度的增大,  $\Delta T$  明显被分为两个区域。在弱沙尘区,  $\Delta T$  随沙尘强度线性变化,在强沙尘区则不然。在沙尘暴由弱到强的变化中,  $\Delta T$  会在某一强度达到峰值,然后开始下降。结合图 1 也可以得出类似的结论,即  $\Delta T$  的高值区域并不是强沙尘暴的分布区,这一点已经结合地面数据得到验证。

由此可见,尽管  $11\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$  波段的差值是沙尘暴信息识别、提取的有效参数,但不能刻画沙尘暴强度,不能作为沙尘暴强度定量计算的参数。

### 3.2 可比沙尘强度指数的构建

利用遥感技术对沙尘暴进行定量研究,遇到很多问题的困扰。其中多源数据的可比和不同时次数据监测结果的可比,是亟待解决的问题之一。影响遥感数据可比性的主要原因包括探测器性能和波段的差异、过境时间的不同、太阳光照条件的区别等。沙尘暴监测时,尽管遥感数据在使用前经过了预处理,但不能从根本上解决数据可比的问题。

由于  $11\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$  波段差值与沙尘暴强度变化不呈线性关系,可见光波段又受卫星过境时间和太阳光照影响比较大,因此,都不能作为沙尘暴强度定量研究的参数。经综合分析和试验,发现近红外  $1.6\mu\text{m}$  波段测值在沙尘暴监测中具有较高的稳定性,在多颗卫星数据中都具有较固定的沙尘区范围,受时空影响较小。同时,  $1.6\mu\text{m}$  波段也是目前气象卫星中最为接近沙尘暴粒子分布物理特征的探测波段,其受到干扰的情况相对于可见光波段要少得多,能较好地描述沙尘暴特征,且与沙尘强度呈线性关系,可以作为沙尘暴强度定量研究的参数。

然而,实际应用中,  $1.6\mu\text{m}$  波段仍然受到空间、时间、卫星等方面因素的干扰,监测结果仍不具可比性,不能满足多源(多时次、多平台)遥感数据在沙尘暴动态监测中定量分析的要求。为此,经反复试验,利用  $1.6\mu\text{m}$  波段特性,构建了可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ ),计算方法如下:

$$I_{\text{cnd}} = \alpha \times (e^{\beta \times R_{1.6}} - 1) \quad (2)$$

式中:  $R_{1.6}$  为可见光  $1.6\mu\text{m}$  波段测得的反射率;  $\alpha$  和  $\beta$  为调节因子,一般取值分别为 10 和 0.8。

### 3.3 实例分析

2002 年 4 月 6 日在我国华北发生了较大范围的沙尘暴天气,利用当天 13 时接收到的 NOAA/AVHRR 数据,计算了可比沙尘强度指数(图 3)。分析图 3 可知,这场沙尘暴起源于蒙古国南部,在我国内蒙古中东部地区得到加强,沙尘暴的高强度区在锡林郭勒盟,波及范围还包括河北省北部和山西、北京的局部地区。

根据沙尘暴途经区域地面气象站点当日 14 时所测的能见度数据分析,其中西乌旗气象站(117.6°E,44.6°N)能见度为 0.3km,属中强度沙尘暴;东苏旗气象站(113.3°E,43.8°N)能见度为 0.1km,属强沙尘暴;满都拉气象站(110.1°E,42.5°N)和蒙古国一气象站(108.3°E,44.4°N)能见度分别为 8km 和 2km,属扬沙天气,结果发现可比沙尘强度指数( $I_{csd}$ )与地面数据有较好的一致性,能够准确地刻画沙尘暴强度的空间分布。

目前,我国投入业务运行的气象卫星中,探测器具有 1.6 $\mu$ m 波段的包括 FY-1C/D、NOAA-16/17 和 EOS/MODIS,而一颗卫星每天只能对同一区域重访 2 次(白天和夜间),如果上述卫星同时使用,可以保证间隔 3h 以内监测沙尘暴的能力,这无疑有助于对沙尘暴的起源、移动、传输路径、扩散等持续动态监测,这就要求在每个时段得到的沙尘暴监测结果具有一致性和可比性,而可比沙尘强度指数( $I_{csd}$ )巧妙地解决了这一关键问题。

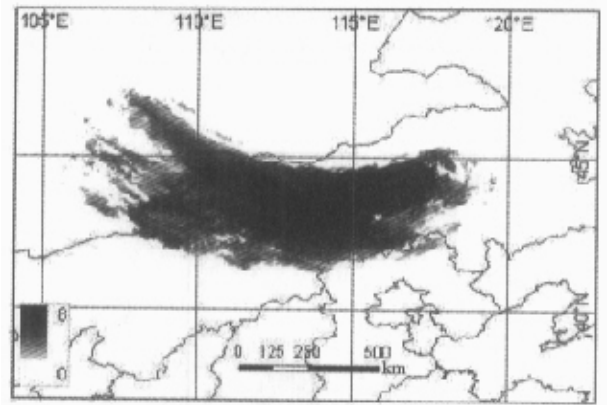


图 3 可比沙尘强度指数分布图(NOAA/AVHRR 2002-04-06)

Fig.3 Distribution of comparable dust intensity index

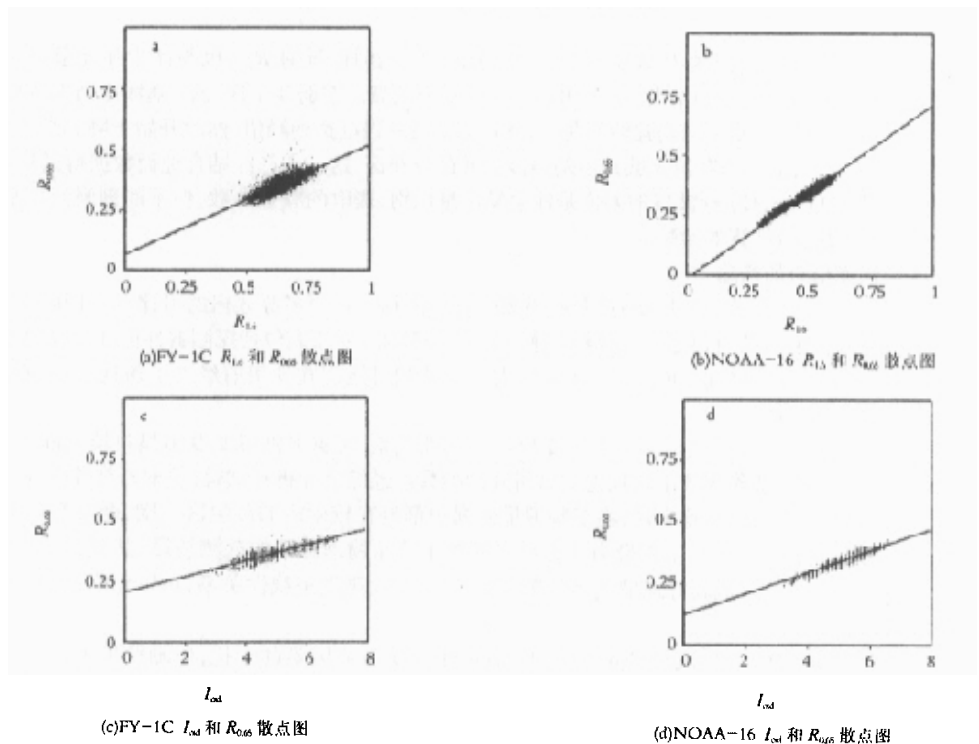


图 4 不同平台(FY-1C、NOAA-16)遥感数据  $I_{csd}$  指数稳定性分析

Fig.4 Stability analysis of  $I_{csd}$  in different satellite sensor data

图 4 是 FY-1C(2002 年 4 月 6 日 08 时)和 NOAA-16(2002 年 4 月 6 日 13 时)两颗卫星在不同时间获得的同一场沙尘暴监测结果分析。图 4(a)和图 4(b)分别是据 FY-1C 和 NOAA-16 的 1.6 $\mu$ m 波段测值与 0.65 $\mu$ m 波段测值所作的散点图,并经一元回归分析计算了散点分布的直线方程,两者的斜率分别是 0.42 和

0.72, 差别较大;图 4(c)和图 4(d)分别是利用相应 FY-1C 和 NOAA-16 的  $1.6\mu\text{m}$  波段测值,构建的可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )与  $0.65\mu\text{m}$  波段测值所作散点图,两者的直线方程斜率(0.31 和 0.35)非常接近。从这一斜率变化特点上可以证明,可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )在沙尘暴监测方面较好地解决了不同遥感平台沙尘暴强度监测结果的可比问题,稳定性比较高,为利用多源遥感数据定量动态监测沙尘暴过程奠定了基础。

同样,也对利用同一颗卫星在不同时间和不同区域计算的可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )作了类似的分析(见图 5)。数据由 NOAA-16 极轨气象卫星获得,时间分别为 2001 年 4 月 7 日 12 时、2002 年 3 月 15 日 14 时和 2002 年 4 月 23 日 15 时,涉及区域为我国的东北地区、华北地区和南疆地区,时间和空间跨度比较大。图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)分别是这 3 场沙尘暴沙尘区据  $1.6\mu\text{m}$  波段侧值与  $0.65\mu\text{m}$  波段测值所作的散点图;图 5(d)、图 5(e)和图 5(f)分别是相应可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )与  $0.65\mu\text{m}$  波段测值间的散点图,上述散点图拟合直线方程斜率见表 2。可见, $1.6\mu\text{m}$  波段构建的可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )和其本身在沙尘暴监测结果的一致性方面有了很大的改进,表明可比沙尘强度指数( $I_{\text{cnd}}$ )同样也可以解决不同时空条件下沙尘暴强度监测结果的可比问题。

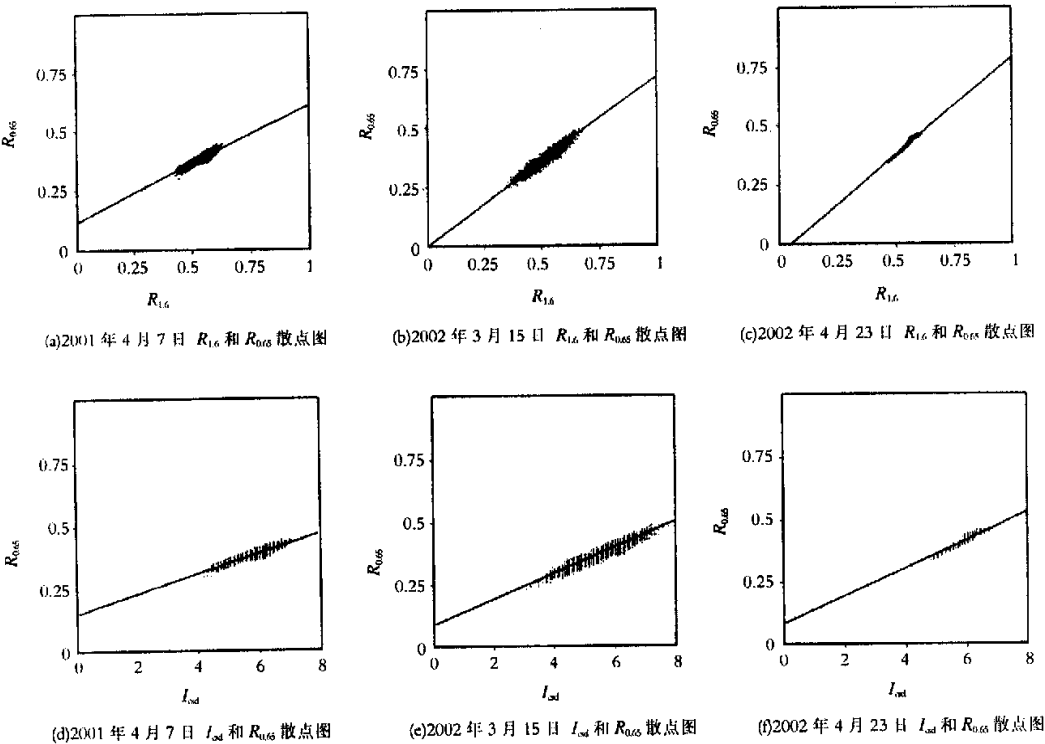


图 5 不同时段遥感数据  $I_{\text{cnd}}$  指数稳定性分析(NOAA-16)

Fig.5 Stability analysis of  $I_{\text{cnd}}$  in different time(NOAA-16)

表 2 $R_{1.6}$ 和 $I_{\text{cnd}}$ 与 $R_{0.65}$ 散点图拟合直线方程斜率变化			
Table 2 Line slope variety of the simulation of $R_{1.6}$ , $I_{\text{cnd}}$ and $R_{0.65}$			
	东北地区 (2001-04-07)	华北地区 (2002-03-15)	南疆地区 (2002-04-23)
$R_{1.6}$	0.45	0.72	0.83
$I_{\text{cnd}}$	0.42	0.41	0.45

## 4 结论

(1) 大气红外窗区  $11\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$  波段差值可以作为沙尘暴信息识别、提取的参数,但由于这一差值并不与沙尘强度完全线性相关,因此不能作为沙尘暴强度定量计算的指标。可见光波段由于受卫星过境时间和太阳光照等条件的影响较大,同样也不能用于沙尘暴强度定量研究。

(2) 近红外  $1.6\mu\text{m}$  波段是气象卫星中最为接近沙尘暴粒子分布物理特征的探测波段,其测值与沙尘暴强度呈线性关系,但由于受到空间、时间、卫星等方面因素的干扰,监测结果仍不能满足多源遥感数据沙尘暴动态监测中定量分析的要求。

(3) 利用  $1.6\mu\text{m}$  波段特征构建的可比沙尘强度指数 ( $I_{\text{cd}}$ ),能够解决多源遥感数据由于卫星平台、监测时间、监测区域不同等因素导致的监测结果不可比的问题,同时监测结果与地面气象站监测数据有较好的一致性,能够从时间、空间两方面刻画沙尘暴强弱分布,可以作为沙尘暴定量研究参数,为利用多源遥感数据持续定量地监测沙尘暴的起源、移动、传输路径、扩散等特征奠定了基础。

(4) 可比沙尘强度指数的建立,为进一步建立遥感数据与地面观测数据间的对应关系创造了条件,也为今后沙尘强度、沙尘光学厚度和沙尘浓度等参数的反演提供了新的数据源。

## 参考文献:

- [1] 潘耀忠,范一大,史培军,等.近50年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布—初步研究[J].自然灾害学报,2003,12(1):1-8.
- [2] 史培军,张宏,王平,等.我国沙区防沙治沙的区域模式[J].自然灾害学报,2000,9(3):1-7.
- [3] Curlson T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. Monthly Weather Review, 1979, 107:322-335.
- [4] Shenk W E, Curian R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements [J]. Monthly Weather Review, 1974, 102:820-837.
- [5] 郑新江,陆文杰,罗敬宇.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):300-305.
- [6] 方宗义,张运刚,郑新江,等.用气象卫星遥感监测沙尘的方法和初步结果[J].第四纪研究,2001,21(1):48-55.
- [7] 范一大,史培军,潘耀忠,等.基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测[J].自然灾害学报,2001,10(4):46-51.
- [8] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘暴天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513-521.
- [9] 孙司衡,郑新江.沙尘暴的卫星遥感监测与减灾服务[J].测绘科学,2000,25(2):33-36.
- [10] 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.
- [11] Fraser R S. Optical thickness of atmospheric dust over Tadzhikistan[J]. Atmospheric Environment, 1993, 27A:2533-2538.
- [12] 赵风生,徐青山.利用星载多波长辐射计观测资料反演大气气溶胶光学厚度[J].量子电子学报,1998,15(2):149-154.
- [13] 毛节奏,刘利,张军华. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究[J].气象学报,2001,59(3):353-359.
- [14] 邱金恒,杨金辉.沙尘暴的光学遥感及分析[J].大气科学,1994,18(1):1-10.
- [15] 范一大,史培军,王秀山,等.中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J].地球科学进展,2002,17(2):289-294.
- [16] 张增祥,周全斌,刘斌,等.中国北方沙尘灾害特点及其下垫面状况的遥感监测[J].遥感学报,2001,5(5):377-382.
- [17] 张国平,张增祥,赵晓丽,等.2000年华北沙尘天气遥感监测[J].遥感学报,2001,5(6):466-471.
- [18] 顾卫,蔡雪鹏,谢峰,等.植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨—以内蒙古中西部地区为例[J].地球科学进展,2002,17(2):273-277.
- [19] Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. The Asian dust events of April 1998[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106:5621-5630.
- [20] 卢乃锰,胡秀清,邱红.利用静止气象卫星监测沙尘暴的业务方法[A].沙尘暴监测预警服务研究[M].北京:气象出版社,2002.34-39.