

文章编号: 1001-4675(2007)02-0268-05

# 沙尘暴 EOS/MODIS 卫星遥感监测指数模型\*

肖继东<sup>1</sup>, 汪溪远<sup>2</sup>, 陈爱京<sup>3</sup>

(1 新疆气象局遥感中心 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 新疆大学 新疆 乌鲁木齐 830001;

3 新疆农业大学 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**利用 EOS/MODIS 数据,采用最佳波段组合指数法和方差-协方差矩阵特征值法,从 36 个 MODIS 波段中筛选出用于沙尘暴图像最佳彩色合成增强的组合波段是  $B_{20}$ 、 $B_{11}$ 、 $B_{29}$ ( $B_{XX}$ 表示波段号位 XX 的反照率或亮温值,下同)。在敏感性差异分析的基础上,应用波段数学组合的方法,建立了判别沙尘暴的条件: $1 \leq (B_{17} - B_8) / (B_6 - B_2) < 10$ ,  $1 \leq (B_{23} - B_{32}) / (B_{17} - B_8) \leq 1.6$ ,  $(B_{17} - B_8) / (B_6 - B_2) > (B_{23} - B_{32}) / (B_{17} - B_8)$ ,构建了提取沙尘暴区域范围和强度等级信息的沙尘暴卫星遥感监测指数  $SVI = (B_{17} - B_8) / (B_6 - B_2)$ ,利用指数 SVI 值的大小对沙尘暴进行了 5 个等级的定级和分类。

**关键词:**沙尘暴;MODIS;遥感;监测;指数

**中图分类号:** P425.5+5 **文献标识码:** A

随着遥感技术的发展和 GIS 技术的不断进步,遥感技术成为人们研究大尺度自然变化的重要手段之一。20 世纪 70 年代,国外就开展了利用卫星遥感技术监测沙尘暴的研究,如 Griggs,Shenk 和 Curran 等利用卫星的可见光与红外波段监测沙尘,Carlson 利用卫星观测的亮度资料研究撒哈拉地区沙尘的爆发机制;Norton 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沙尘暴的传输情况;Steven 利用  $3.7 \mu\text{m}$  和  $11 \mu\text{m}$  的辐射亮温差来监测沙尘暴的移动路径。在我国沙尘暴遥感监测方法的研究与应用从 20 世纪 80 年代末开始明显增加,尤其是近几年更是受到高度的关注,可以说已成为目前的研究热点<sup>[1~9]</sup>。

遥感特别是卫星遥感资料在综合观测系统中的作用越来越大。尽管卫星遥感探测上还存在理论上的问题,需要深入研究,但目前我国对沙尘暴的监测主要来源于气象台站的定时观测,还有许多局限性。环保部门仅在各地区级和少数特设点进行观测,观测资料有天气现象和能见度,观测内容主要有强度、浓度、组成成分、降尘量等项目。在西部广大地区的范围内,各监测台站设置稀疏,尤其在沙尘暴发生的源区——沙漠、荒漠地带,人口稀少,监测站点更少。对造成严重灾害的强沙尘暴过程,常规资料还难以跟踪其源地、移动路径和强度变化。由于常规地面

观测资料对沙尘暴监测有很大的局限性,所以利用气象卫星遥感资料对沙尘暴进行监测是一种有效的方法。

## 1 数据处理和分析

在对问题的处理过程中,总是希望能简化问题的复杂性。由于沙尘暴的发生总是伴随一定的天气过程,大范围的天气过程会给遥感识别分析沙尘暴带来困难。为了从大幅面观测的遥感影像中提取出沙尘暴的信息,本文设计的处理步骤是:首先通过彩色合成法确定沙尘暴发生的区域,其次通过分析特定发生区域内的影像确定识别方法,最后通过对识别出的区域分析确定沙尘暴的定级分类。

### 1.1 MODIS 沙尘暴图像最佳彩色合成组合波段的筛选

针对多光谱遥感数据,如何选择合适的光谱波段组合来合成彩色增强图,是能否从众多地物类型中分离出所需要的特定地物信息的关键。彩色增强处理中最主要的工作是选择哪 3 个波段或已处理的分量(如比值影像、差值影像、主成分影像等)作为假彩色合成的分量。最佳假彩色合成变量的选择依赖于对遥感影像特征的分析。一般有以下几种方法:信息量分析、影像统计特征分析、波段间相关系数分析、最佳波段组合指数法、方差-协方差矩阵特征值

\* 收稿日期:2006-03-13; 修订日期:2006-08-12

基金项目:国家自然科学基金(70361001)项目

作者简介:肖继东(1961-),男,湖北丹江口人,高级工程师,从事生态环境、自然灾害、特色农业遥感监测与评价研究。E-mail: xjd-xj

126.com

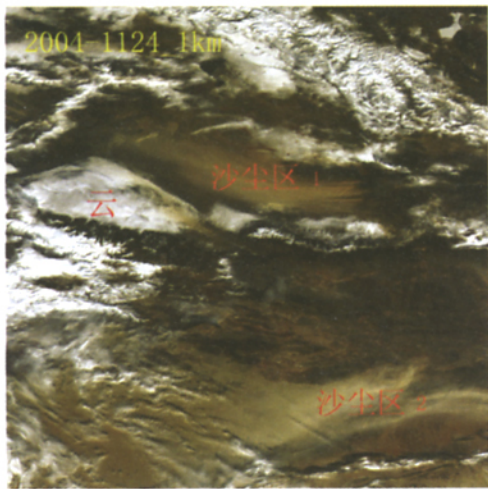


图 1 2004 年 11 月 24 日 RGB 彩色增强合成图( B<sub>1</sub> ,B<sub>4</sub> ,B<sub>3</sub> )  
Fig.1 RGB color-enhanced composed image on November 24 ,2004 ( B<sub>1</sub> , B<sub>4</sub> and B<sub>3</sub> )

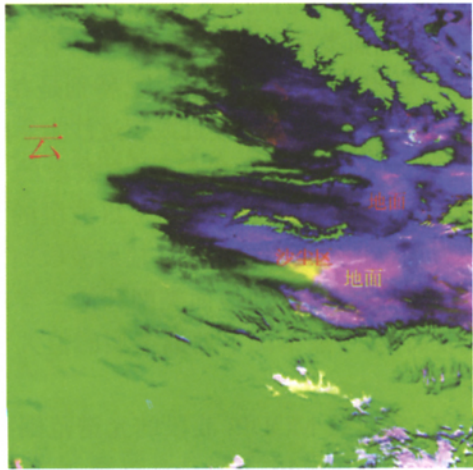


图 2a 2005 年 4 月 5 日 RGB 彩色增强合成图( B<sub>20</sub> ,B<sub>1</sub> ,B<sub>29</sub> )  
Fig.2a RGB color-enhanced composed image on April 5 ,2005 ( B<sub>20</sub> , B<sub>1</sub> and B<sub>29</sub> )

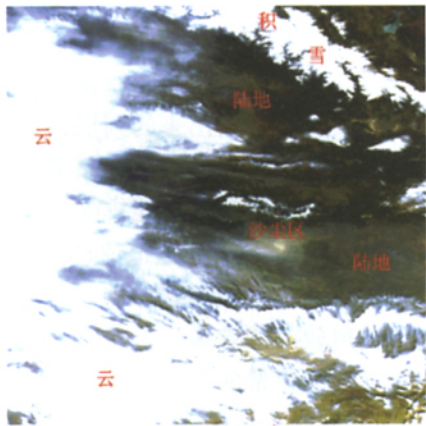
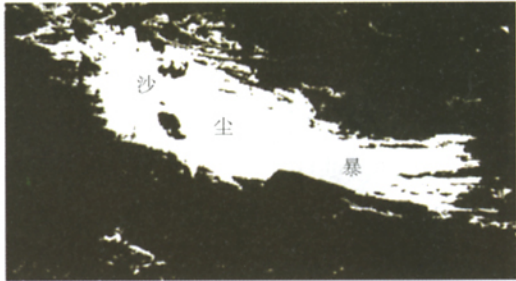


图 2b 2005 年 4 月 5 日 RGB 彩色增强合成图( B<sub>1</sub> ,B<sub>4</sub> ,B<sub>3</sub> )  
Fig.2b RGB color-enhanced composed image on April 5 ,2005 ( B<sub>1</sub> , B<sub>4</sub> and B<sub>3</sub> )



( 图中黑色部分表示为非沙尘暴类 ,零散的亮斑为图像噪音 )  
图 3 分类后的结果图

Fig.3 Image of the classified results

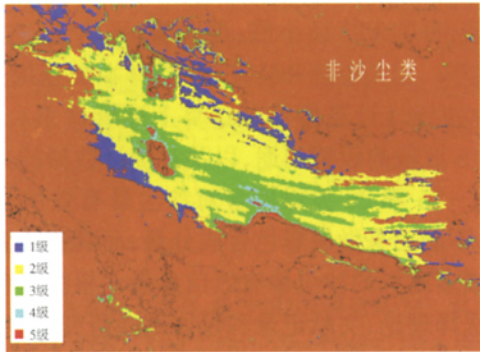


图 4 SVI 等级图  
Fig.4 Image of SVI grades

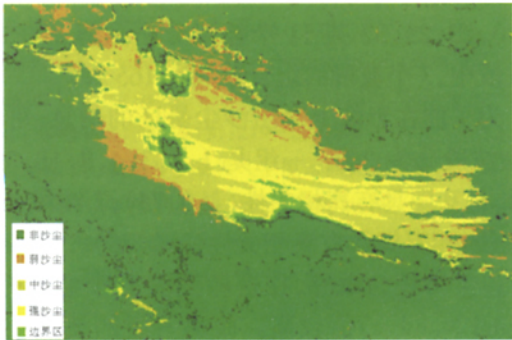


图 5 SVI 分类图  
Fig.5 Image of SVI classification

法 ,主成分分析 ,多维亮度重叠指数法<sup>[10~13]</sup>。

MODIS 有 36 个波段 ,要从 38 个波段的 8 436 种 3 波段组合中筛选出最佳的组合是很困难的。所以选择了应用最佳波段组合指数法和方差 - 协方差矩阵特征值法来挑选出合适的波段组合。根据资料 ,应用 MODIS 数据的沙尘暴彩色增强的波段组合种类有 4 种 ,分别是( 1 ,4 ,3 )组合、( 1 ,15 ,20 )组合、( 1 ,2 ,29 )组合和( 1 ,15 ,29 )组合<sup>[14~17]</sup>。对以上的波段组合 ,以及其他所有可能的组合作一个筛选评价从中找出最佳的组合 ,本文使用了最佳波段组合指数法( OIF 法) 。该方法是 Chavez( 1982 )提出的 ,即用 3 个波段的标准差及两两之间的相关系数

计算一个最佳指数因子(optimum index factor, OIF):

$$OIF = \sum_{i=1}^3 S_I / \sum_{j=1}^3 |r_{ij}| \quad (1)$$

式中:  $S_I$  为  $I$  波段的标准差;  $r_{ij}$  是第  $i$  波段与第  $j$  波段之间的相关系数。在众多的组合中, OIF 越大, 说明此 3 个波段包含的信息量越大, 波段间的相关性越小。因此, 可选用最佳指数因子 OIF 最高的作为最佳组合。

应用统计方法对 2004 年 11 月 24 日的 MODIS 影像图(图 1)进行了分析, 计算了全部 36 波段的统计数值, 得到包括最小值、最大值、平均值、方差、协方差矩阵、相关矩阵和特征值数据(本文利用 ENVI 4.0 中的统计计算模块来计算上述统计量)。根据 MODIS 波段的设置用途, 以及对统计数据进行分析认为, 10~16 和 26 波段所含对沙尘暴有效的信息量很少, 不能用来做假彩色合成分量, 而其它各波段都含有或多或少的沙尘暴有效信息量。根据彩色合成变量选择理论、文献记录和以往试验研究的经验, 将波段间具有很高相关性的以及含有较少信息的 5, 6, 9, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36 波段剔除, 简化研究内容。对剩下的 1~4, 7, 8, 18, 20, 23, 29, 32 共 11 个波段分析运算。在这 11 个波段中, 3 个波段的组合数共有 165 种。

为了能在影像上突出沙尘暴区的信息, 可将这 11 个波段分为 2 组, 一组是 1, 2, 3, 4, 8, 18, 29, 32 波段, 相互间具有高相关性( $>0.75$ ); 7 波段与 20, 23 波段, 相互间具有高相关性( $>0.75$ )。另一组波段对沙尘暴较为敏感, 在这些波段上沙尘区的 DN (Digital Number) 值较高。而前一组的波段中 1~4, 8, 18 波段对云比较敏感, 而对沙尘暴敏感性稍差, 反映在影像上沙尘区的 DN 值小于云区的 DN 值。而在 29, 32 波段沙尘区的 DN 值高于云, 小于陆地。根据以上分析, 结合最佳波段组合指数法的原理, 计算得出了 1, 2, 3, 4, 7, 8, 18, 20, 23, 29, 32 间 3 波段组合的 165 个 OIF 值。经过分析对比这些波段组合的 OIF 值发现, 最大 OIF 值波段组合为 3-7-20 (OIF 指数), 20 波段所处的  $3.7 \mu\text{m}$  光谱处, 已经证明是对沙尘比较敏感的波段。进一步分析 OIF 值较高的前 30 种波段组合, 可以得出这些波段组合都有 1 个可见光波段和 2 个不同波上红外波段组成。为了能够证明所选组合的普遍性, 选择了 2005 年 4 月 5 日的影像进行合成显示分析。图像显示的结果表明, 最佳的波段组合是: 1-20-29。在这种组合图像中, 沙尘区为黄色, 云为绿色, 陆地为蓝色,

沙漠为红色, 分类结果图像见图 2。为了尽量使显示的图像符合观察习惯, 做了 RGB 通道的导入选择。显示时沙尘区的颜色是黄色, 因而设定 20 波段为 R 通道, 1 波段为 G 通道, 29 波段为 B 通道。

## 1.2 沙尘暴的判识条件

在实现了对原始图像初步分类的基础上, 为了确定影像上各种地物在不同波段的光谱(DN)值的变化, 根据遥感地物光谱特征分析理论, 首先选取典型地物, 如云、地面、沙地、沙尘暴区等, 其次对这些不同类型地物统计它们的各波段均值, 然后对比不同地物间的光谱差异。在对多幅影像采用光谱特征值分析后得出:

(1) 在反射率波段范围内, 6, 5, 7 通道对沙尘暴和地面类型的敏感性最大, 波段的 DN 值也较其它波段高。8, 1, 3 通道对云的敏感性较强, 不论是低云还是高云, 它们的 DN 值都大于沙尘暴和各类地面。地面类别中除陆地的值在所有波段上都为最低外, 沙漠和戈壁的变化较大, 特别是在 6, 7, 8, 9 它们的 DN 值有时可以接近或超过沙尘暴的值。

(2) 在辐射亮温波段内, 所有波段的 DN 值都呈现相似的变化趋势, 但在 23~28 波段的 DN 值变化较为复杂。还可以得出云在辐射波段的 DN 值比其它地物类型都低, 而地面类型和沙尘暴的 DN 值都比较高, 在一般情况下地面类型的值大于沙尘暴的值。

(3) 在对照 MODIS 波段的光谱范围和相应的用途后, 发现 10~16 主要是对海洋、水体进行观测用的, 它们的 DN 值在各类地物上都很大, 没有应用于沙尘暴的价值; 另外, 26 近红外波段主要用来观测卷云, 30 波段用于观测臭氧, 同样都对观测沙尘暴没有效果; 33~36 波段的用途是观测云顶高度, 但是对于沙尘暴的研究效果不大。

沙尘暴信息提取的首要问题就是找到能够将其从众多地物类型中分离出来的判识条件。为了将沙尘暴信息从其它地物中凸显出来, 就需要建立判别条件将地面类别和云类别尽可能排除。根据前人经验和对光谱特征值的分析, 单通道信息在判别沙尘暴信息时比较困难, 而应用多通道信息组合来判别沙尘暴信息可以获得较好的效果。本文应用了波段间的代数运算来建立沙尘暴的判识条件。运算的目标是将属于云和地面的像元值尽量减小, 同时保持或增大沙尘暴的像元值, 所以选用波段间的差值运算来达到这个目的(本文使用 ENVI 4.0 中提供的计算工具)。前面分析得出, 在反射率波段云和沙尘暴、地物类型的

敏感性波段不相同 而且部分波段还呈反向变化。这样通过波段差值计算就能很好地区分出云类别。经过反复试验研究 总结出以  $B_{17} - B_8$   $B_{23} - B_{32}$  和  $B_6 - B_2$  组合构成判识条件。将前面选取波段组合导入到  $R(B_6 - B_2) \wedge (B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8)$  假彩色合成增强中显示 能清晰地看到黄白色的沙尘暴区域 而且亮度越高 表明沙尘暴越强。用光谱特征值的分析方法 提取不同地物类型的光谱特征值进行分析 可利用  $(B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2)$  和  $(B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8)$  值的大小作为沙尘暴的判断依据。用以上 2 个比值的合成彩色图像 分析了图像的剖面线的数值变化 再结合影像分析 可以得出沙尘暴的判识条件 (a)  $1 \leq (B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) < 10$  (b)  $1 \leq (B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8) \leq 1.6$  (c)  $(B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) > (B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8)$ 。通过实际应用得到了较为满意的结果。分类图像见图 3。

1.3 沙尘暴区域的定级、分类

确定了沙尘暴的判识条件 就能将沙尘暴的范围划分出来 如图 3。而怎样表现沙尘暴的强度就是提取沙尘信息的另一个关键问题。从上面的 2 个比值判别条件中可以发现判别条件  $(B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2)$  的比值适合用来表现沙尘暴的强弱等级 - 沙尘暴信息指数 (SVI Sand Storm Value Index) 这是一个无量纲的数值 仅表现沙尘暴的强弱 而与其它定量信息无关。

$$SVI = (B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) \quad (2)$$

式中 SVI 是沙尘暴信息指数  $B_{XX}$  表示波段号位 XX 的反照率或亮温。

由于条件  $1 \leq (B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) < 10$  在取值时就已经规定了范围 所以将 SVI 数值的等级 按 (2) 式的步长均匀地划分成 5 个等级。即 1 级  $1 \leq SVI < 2$  2 级  $2 \leq SVI < 4$  3 级  $4 \leq SVI < 6$  4 级  $6 \leq SVI < 8$  5 级  $8 \leq SVI \leq 10$  这样就得到了沙尘暴的等级图。SVI 1 级表示弱沙尘暴 SVI 2 级表示中等强度沙尘暴 SVI 3 级表示强沙尘暴 SVI 4 级、5 级表示沙尘暴的边界区 (图 4~5)。

2 结论与讨论

通过对前人研究工作的分析和总结 首先采用 OIF 指数方法和方差 - 协方差矩阵特征值法联合 筛选最佳的波段组合 并对前人提出的假彩色增强分类的波段组合进行了验证 最后得到最佳的组合为  $(B_{20}, B_1, B_{29})$  在显示图像时提高了对沙尘的识别能力。万方数据

其次 在参考了大量前人对沙尘暴光谱特征波段研究的基础上 通过提取光谱特征值的方法寻找合适的波段代数组合来提取沙尘暴信息 找到了能用于判识沙尘暴的条件  $1 \leq (B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) < 10$   $1 \leq (B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8) \leq 1.6$   $(B_{17} - B_8) \wedge (B_6 - B_2) > (B_{23} - B_{32}) \wedge (B_{17} - B_8)$ 。经过对多幅不同沙尘暴影像的应用试验 证明这些条件具有一定的普适性。

其后 构建了沙尘暴信息指数 (SVI) 并依据沙尘暴信息指数 (SVI) 值的大小对沙尘暴进行了 5 个等级的定级和分类。通过多幅沙尘暴影像图上的应用 证明沙尘暴信息指数可以反映沙尘暴的浓度信息 达到了提取信息的目的。通过与地面实测数据的比较 表明该方法提取出来的沙尘暴信息符合实际情况 是可行可信的。

参考文献 (References):

[1] 方宗义 朱富康 江吉喜 等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997. [ Fang Zongyi, Zhu Fukang, Jiang Jixi, et al. Studies on Sand Dust Storms in China[M]. Benjing: Meteorology Press, 1997. ]

[2] 李虎 肖继东. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴的遥感监测[J]. 新疆农业大学学报, 1999, 22(3): 219 - 223. [ Li Hu, Xiao Jidong. The monitoring for sand-storm in centre of Taklamagan desert by using remote sensing[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 1999, 22(3) 219 - 223. ]

[3] 肖继东 等. 新疆沙尘暴天气卫星云图类型分析[J]. 干旱区地理, 2001 24(增刊): 33 - 36. [ Xiao Jidong, et al. Analysis of satellite images types of sandstorm in Xinjiang[J]. Arid Land Geography 2001 24(suppl) 33 - 36. ]

[4] 王旭 马禹 陈洪武. 新疆沙尘暴天气的气候特征[J]. 中国沙漠, 2003 23(5): 539 - 544. [ Wan Xu, Ma Yu, Chen Hongwu. Climatic characteristics of sand storm in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research 2003 23(5) 539 - 544. ]

[5] 王伟 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 366 - 381. [ Wan Wei, Fang Zongyi. Review of dust storm weather and research progress[J]. Journal of Applied Meteorological Science 2004, 15(3) 366 - 381. ]

[6] 范一大 史培军 罗敬宁. 沙尘暴卫星遥感研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 367 - 373. [ Fan Yida, Shi Peijun, Luo Jingning. Advances in studying dust storm using remote sensing [J]. Advance in Earth Sciences 2003, 18(3) 367 - 373. ]

[7] 胡秀清 卢乃锰 邱红 等. 利用静止气象卫星监测沙尘暴[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 101 - 106. [ Hu Xiuqing, Lu Naimeng, Qiu Hong, et al. Dust storm monitoring using geostationary meteorological satellites[J]. Climatic and Environmental Research 2003, 8(1) 101 - 106. ]

[8] 高庆先 任阵海 张运刚 等. 利用静止卫星资料跟踪沙尘天气的发生、发展及其传输[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 24 - 29.

[Gao Qingxian, Ren Zhehai, Zhan Yungang, et al. Dust event and its formation, development and transportation based on satellite data[J]. Resources Sciece, 2004, 26(5):24-29.]

[9] 师庆东, 肖继东, 潘晓玲, 等. 近 20 a 来新疆植被覆盖变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4):389-394. [Shi Qingdong, Xiao Jidong, Pan Xiaoling, et al. Study on the change of vegetation coverage in Xinjing since recent 20 years[J]. Arid Zone Research, 2004, 21(4):389-394.]

[10] 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. [Fan Yida, Shi Peijun, Pan Yaozhong, et al. Monitoring the intensity of regional dust storm using NOAA/AVHRR data[J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(4):46-51.]

[11] 罗敬宁, 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. [Luo Jingning, Fan Yida, Shi Peijun, et al. Information comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2):28-34.]

[12] 张杰, 郭妮. 春季沙尘暴强度的 NOAA-14 气象卫星监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6):290-292. [Zhang Jie, Guo Ni. Study on monitoring sand storm intensity in spring by using NOAA-14 satellite data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(6):290-292.]

[13] 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. [Fan Hong, Chen Guilin. Application of Mie theory in dust channel selection of meteorological satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4):271-275.]

[14] 钱乐祥, 等. 遥感数字影像处理与地理特征提取[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [Qian Leqiang, et al. Remote Sensing Numeral Image Processing and the Geography Feature Extraction[M]. Beijing: Science Press, 2004.]

[15] 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):327-334. [Xiong Liya, Li Haiping, Zhuang Dafang. Discuss on quatitative method study of sand-dust information using MODIS data[J]. Progress in Geography, 2002, 21(4):327-334.]

[16] 张树誉. EOS/MODIS 资料在陕西自然灾害监测中的应用[J]. 陕西气象, 2003(5):33-35. [Zhang Shuyu. Application of natural disasters monitoring in Shanxi province using EOS/MODIS data[J]. Journal of Shanxi Meteorology, 2003(5):33-35.]

[17] 敖艳红, 裴浩, 杨丽萍, 等. 应用卫星遥感技术监测沙尘暴的研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4):99-104. [Ao Yanhong, Pei Hao, Yang Liping, et al. Research on monitoring sand dust storm using satellite remote sensing technique[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(4):99-104.]

Study on Satellite Remote Sensing Index Model for Monitoring Dust Storms Using EOS/MODIS Data

XIAO Ji-dong<sup>1</sup>, WANG Xi-yuan<sup>2</sup>, CHEN Ai-jing<sup>1</sup>  
(1 Remote Sensing Center, Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China; 2 Xinjiang University, Urumqi 830001, China)

**Abstract :** In this paper, the optimal combination wavebands (B20, B1 and B29) are screened out from 36 MODIS wavebands for deriving the color-enhanced composed images of monitoring dust storms using EOS/MODIS data, optimal band combination index method and variance-covariance matrix eigenvalue method after analyzing and summarizing the predecessors' research achievements. Based on referring the research achievements about the spectral characteristics of dust storms, analyzing the sensitivity difference of wavebands and using the waveband mathematical combination, the conditions of recognizing dust storms are explored:  $1 \leq (B17 - B8) / (B6 - B2) \leq 10$ ,  $1 \leq (B23 - B32) / (B17 - B8) \leq 1.6$ ,  $(B17 - B8) / (B6 - B2) > (B23 - B32) / (B17 - B8)$ . After comparing and analyzing some different images of dust storms, it is verified that these conditions have universality. The satellite remote sensing index ( $SVI = (B17 - B8) / (B6 - B2)$ ) of monitoring dust storms is developed for deriving the information of extent and intensity grades of dust storms, on which dust storms are classified into 5 grades using SVI values.

**Key words :** dust storm; MODIS; remote sensing; monitoring; index.