

文章编号: 1000-0534(2005)05-0757-08

基于 EOS/MODIS 资料的沙尘 遥感监测模型研究

韩 涛, 李耀辉, 郭 锐

(1. 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: 在 EOS MODIS 资料可见光波段光谱特性的深入分析的基础上, 提出了一种完全用 MODIS 可见光波段监测沙尘信息的技术方法。充分利用 MODIS 资料可见光范围波段划分细致的特点, 构造了不同的光谱特征判别函数作为决策树的分支, 最后用决策树法成功地对几次沙尘暴过程进行了沙尘信息遥感监测。结果表明, 该方法具有良好的效果和实用性。

关键词: 沙尘暴监测; EOS/MODIS 卫星遥感资料; 可见光波段; 分类; 决策树

中图分类号: P445⁺.4 **文献标识码:** A

1 引言

沙尘暴是影响我国北方各省(区)的一种重要自然灾害。沙尘暴除了直接造成当时当地的危害和损失外, 还由于悬浮沙尘的辐射效应和沉降间接地影响其后的气候和自然生态环境。研究表明, 我国北方沙尘暴自 1990 年代中期以后为增多趋势^[1]。同时由于社会经济的发展, 每次沙尘暴所造成的直接和间接的危害和损失越来越大, 因此它已成为国内外自然环境研究方向的一个热点领域, 人们越来越认识到沙尘暴是不可忽视的气候和生态环境问题之一。

目前卫星遥感已成为监测沙尘天气的重要手段。近年来国内外对用气象卫星监测沙尘暴进行了大量研究^[2~10], 他们所采用的资料多是 NOAA 或 GMS 卫星资料, 而方法也多是利用悬浮的沙尘与云层及地表背景在反射和发射特性上的差异, 利用单波段阈值及多波段组合的方法(如 3.7 μm 和 11 μm 的辐射亮温差、红外分裂窗法等)进行沙尘监测。这些研究已取得了一些很好的成果, 可以认为目前这种基于 NOAA 或 GMS 资料的多波段方法已经较为成熟, 但是这些方法所采用的卫星资料(以 NOAA 为例)在空间分辨率、波段数量和宽度以及可见光仪器衰减等方面还存在一定的局限性。

搭载于 EOS 卫星上的 MODIS 仪器所获得的数据资料较 NOAA 卫星资料在前述的几个方面有重大改进。MODIS 数据具有更高的辐射分辨率(12 比特), 更高的地面分辨率(最大可达 250 m), 更多的波段(36 个)。另外采用可见光波段星上校准技术, 使长期观测的稳定度得到保证^[11]。MODIS 的另一个创新之处是大多数的可见光波段带宽都较窄, 从而避免了和水汽吸收重叠, 由于水汽吸收而引起的误差就大大减小了, 使得需要校正的量处于最小状态^[12]。熊利亚等^[13]曾分析了用 MODIS 资料进行沙尘信息定量化研究的内涵并设计了沙尘信息定量化研究的初步模型, 但这方面工作的具体文献和详细方法国内目前尚未见到。此外, 由于沙尘信息的遥感监测实质就是沙尘区的分类过程, 因此在卫星资料得到改进的基础上, 进而研究出合适的分类方法也很重要。本文通过对 2002 年 3 月 19 日沙尘暴过程的天气实况与同时次的 MODIS 各波段资料进行对比分析, 在对沙尘、云及其它地类在各波段的光谱特性进行深入研究的基础上, 首先发现了用于沙尘暴目视判别的三波段假彩色合成的 MODIS 波段; 其次探讨了对沙尘信息进行监测和提取时应选择的特征波段函数和技术方法; 然后用决策树法对上述结果进行了整合并对沙尘信息进行了分类; 最后用此方法对另外两次沙尘暴过程进行

收稿日期: 2004-03-03; 改回日期: 2004-06-11

基金项目: 科技部社会公益研究专项(37025)“西北干旱区沙尘暴预警服务系统研究”; 国家自然科学基金项目(40375011)共同资助

作者简介: 韩涛(1972—), 男, 吉林人, 副研究员, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: taohan72@hotmail.com

万方数据

了实际验证, 结果证明了这种方法的可行性。

2 MODIS 数据特性及预处理过程

MODIS 作为当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器, 具有 36 个光谱波段, 分布在 0.4~14 μm 的电磁波谱范围内。MODIS 可见光波段的仪器特性、波段范围和主要用途如表 1 所示^[12]。

表 1 MODIS 可见光波段仪器特性

Table 1 Instrument properties of MODIS visible bands				
通道	光谱范畴 1~7 通道/nm	信噪比 NE Δ T	主要用途	分辨率 /m
1	620~670	128	陆地、云边界	250
2	841~876	201		250
3	459~479	243	陆地、云特征	500
4	545~565	228		500
5	1230~1250	74		500
6	1628~1652	275		500
7	2105~2135	110		500

本文所用 MODIS 数据经过了以下预处理过程:

(1) 解包。将接收后形成的由一个一个按顺序排列的符合 CCSDS 规范包的文件(level-0)进行检验和解码, 形成 L1A(level-1A) HDF 格式的文件。

(2) 地理定位。计算 1000 m 分辨率各像素点的地理定位; 并通过加入分辨率与卫星资料一致的 DEM 资料, 校正了由地形及地球曲率变化所引起的定位误差; 最后地理定位精度误差 $<0.005^{\circ}$ (1000 m 分辨率下的半个像元)。地理定位得到的是各像素点 1000 m 分辨率的经纬度数据, 500 m 和 250 m 分辨率的经纬度数据由 1000 m 分辨率数据双线性内插重采样后得到。

(3) 资料校正。将 MODIS 原始数据转换为反射率(反射通道)或辐射值(发射通道)并对资料进行有关校正。资料校正主要指的是辐射量校正, 其中包括传感器校正、太阳高度角校正等。需要指出的是: 由于 MODIS 资料具有星上定标功能, 所以不需要进行可见光仪器衰减校正。另外对资料未做大气校正, 这是由于对沙尘天气而言, 沙尘气溶胶对太阳直接辐射的衰减要远大于瑞利散射等其它因素的衰减, 而且此时沙尘气溶胶的时空分布是很不均匀的^[14], 这使得一般的大气校正模式如 6S、MODTRAN 等不一定适合特定的沙尘区域。

3 沙尘暴天气实况

本文选择了 2002 年 3 月 19 日的沙尘天气过程进行 MODIS 卫星资料分析。受西伯利亚强冷空气的影响, 2002 年 3 月 19 日在甘肃省的河西、中部、陇东出现了大范围沙尘天气, 部分地方出现沙尘

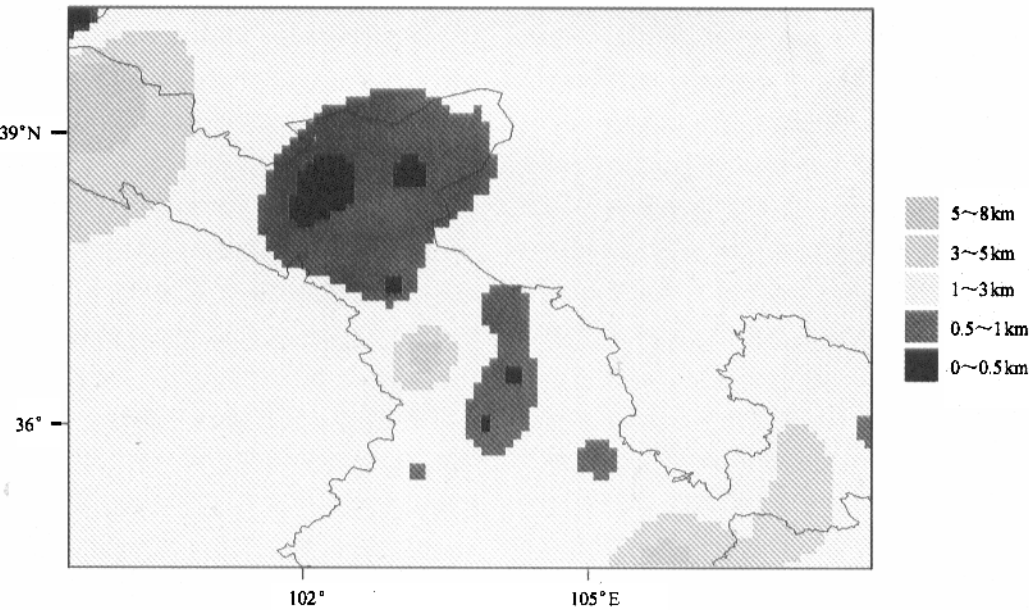


图 1 2002 年 3 月 19 日地面能见度分布

Fig. 1 Surface visibility distribution on March 19, 2002

暴。本次沙尘天气过程影响了甘肃省除临夏、甘南、武都三地区外的所有地市, 并且伴随有强降温和降雪天气。本次沙尘天气过程的移动路径属于北方路径。图 1 是将当天的天气实况表^[15]中能见度的实测值在地理信息系统下处理得到的地面能见度分布图。由图可看到, 最大的一个沙尘暴区(能见度在 1 km 以下)位于武威地区和金昌市范围内。

4 沙尘信息提取原理及技术方法

4.1 决策树法原理

决策树法^[16]是指根据影像的不同特征, 以树型结构表示分类或决策集合, 产生规则和发现规律的方法。它多以二类判别分析为基础, 分层逐次进行比较, 最后达到分类的目的^[17]。韩涛^[18]曾采用此方法在 TM 卫星资料的辅助下对祁连山地区的针叶林和灌木林进行了分类; 范一大等^[19]也曾用类似的分层信息提取法结合 NOAA 卫星资料进行了沙尘信息提取, 效果较好。因此, 针对本文所分类的类别不多(分为沙尘、云、雪、地表等)、易互相干扰(如沙尘和云等)的特点, 采用决策树法进行分类。这样当一种地物成功提取后, 就不会再对其它地物的分类造成干扰和影响; 同时由于该方法在每个结点处都有一个判别函数, 可分别对各个判别函数进行改进以提高精度, 而不至于互相干扰; 另外此方法在编程的算法上也易于实现, 更加有利于投入业务化监测时使用。

决策树法的基本流程是: 首先利用训练空间实体集生成判别函数, 其次根据不同的判别函数及其不同的取值建立树的分支, 在每个分支子集中重复建立下层结点和分支, 最后形成决策树。

4.2 沙尘目视判别的特征波段选择

如前所述, 决策树法的第一步就是要生成训练空间实体集, 也就是要从资料中提取训练样本; 样本训练区建立的正确与否是分类的基础, 选择合适的正确的训练区能大大提高分类的精度。因此, 如何选择合适的 MODIS 波段进行假彩色合成来反映沙尘信息就显得尤为重要。

MODIS 的 1, 2 波段基本与 NOAA 卫星资料的 1, 2 波段光谱范围相等; 而用 NOAA 卫星资料监测沙尘时, 大多数人均采用波段 4, 2, 1 或 3, 2, 1 进行合成, 效果较好^[7, 9, 10]; 同时 MODIS 的 1, 2 波段应用于陆表特征识别时效果较好^[12], 因此 1 和 2 波段入选。此外, 根据王式功等^[20]的研究: 在沙漠中, 沙尘颗粒流产生的上举力较大, 沙漠低

层的沙尘粒径最大, 中层次之, 上层主要是浮尘。而上层的粒子大小如杨东贞等^[21]所分析多在 2.1 μm 附近(是粒子半径的低值区)。而遥感探测到的沙尘信息以上层粒子为主, 因此 MODIS 的 7 波段(波长在 2.1 μm 附近)入选。最后选 7, 2, 1 波段进行假彩色合成以监测沙尘信息。

在 7, 2, 1 波段假彩色合成结果图上, 沙尘区呈深黄色, 云系呈白色, 植被区呈绿色, 水体呈黑色, 戈壁区呈褐色, 沙尘区非常容易得到区分; 沙漠或沙地虽也呈黄色, 但悬浮的沙尘与沙漠可以从纹理等其它特征上加以区分: 沙尘区顶部结构均匀, 顺着风向有纹理, 边界不清楚, 呈比较均匀的羽毛状。沙漠区则无以上特征, 而且能分辨出较大的沙丘, 因此沙尘和沙漠也很容易加以区分。这种合成方法充分发挥了 MODIS 资料空间分辨率比 NOAA 高的优势, 且由于沙尘区呈黄色, 色调也符合人眼的视觉习惯。需要说明的是: 由于 7 波段的分辨率是 500 m, 2 和 1 波段的分辨率是 250 m, 只将 7 波段重采样为 250 m 而与 1 和 2 波段简单合成后, 图像的细节不很清晰; 需要进行图像融合, 经试验发现采用 HIS 变换融合法效果较好。

最后通过将三波段合成图上判识出的沙尘区范围(图 2)和沙尘信息分类结果(图 3)与由天气实况得到的图 1 相对照, 结果基本吻合, 证明这种三波段合成方法能够有效监测沙尘。在以上工作的基础上, 经判读后分别提取沙尘、云、雪、沙漠、戈壁、植被等多个类别的多个样本子区, 生成了训练空间实体集, 为下面的分析并形成判别函数和特征值打下了基础。

4.3 生成特征判别函数

以往用气象卫星资料提取沙尘信息多采用可见光和红外通道多波段综合的方法^[7~9]。对于 MODIS 资料, 其红外波段地面分辨率与 NOAA 一样均为 1000 m, 因此为充分发挥 MODIS 资料可见光范围波段多、波段划分详细、地面分辨率高(500 m)等优势, 本文完全用 MODIS 的可见光多波段信息来构造特征判别函数, 进而用决策树法来提取沙尘信息。

4.3.1 生成云、雪及其它类别信息的特征判别函数

对沙尘信息的提取而言, 云作为反射率高值区, 其干扰一直是个问题, 同时在西北区积雪也同样会对沙尘信息提取产生干扰。因此, 本文在反复试验后, 采用先将云、雪聚为一类, 把沙尘和其它

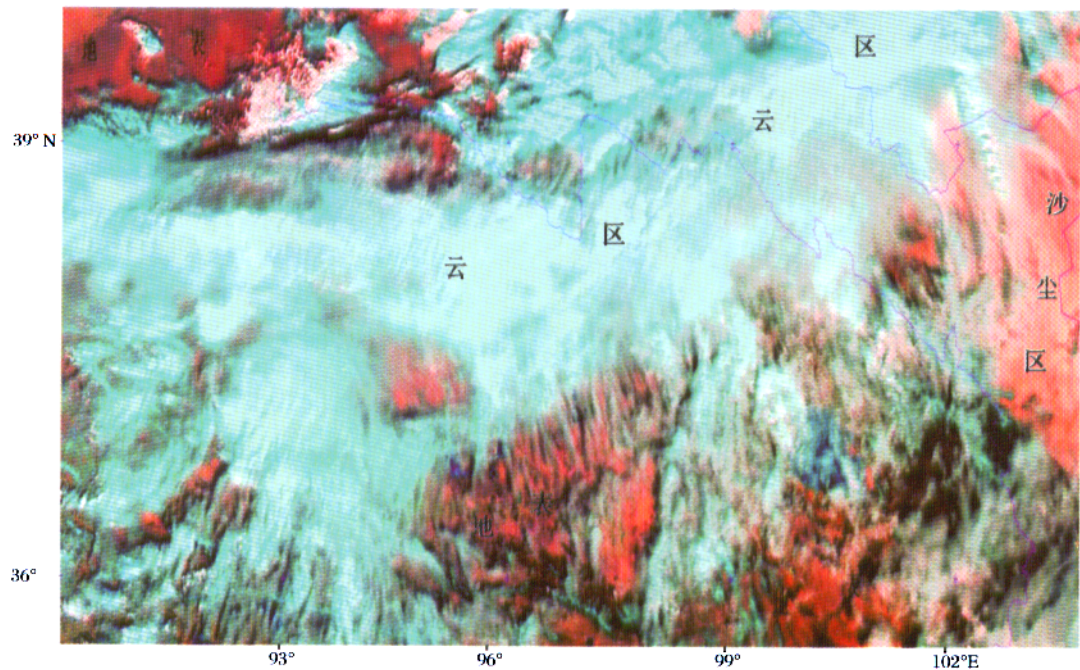


图 2 2002 年 3 月 19 日 MODIS 三波段合成

Fig. 2 MODIS three-band syntheric picture of dust storm on March 19, 2002

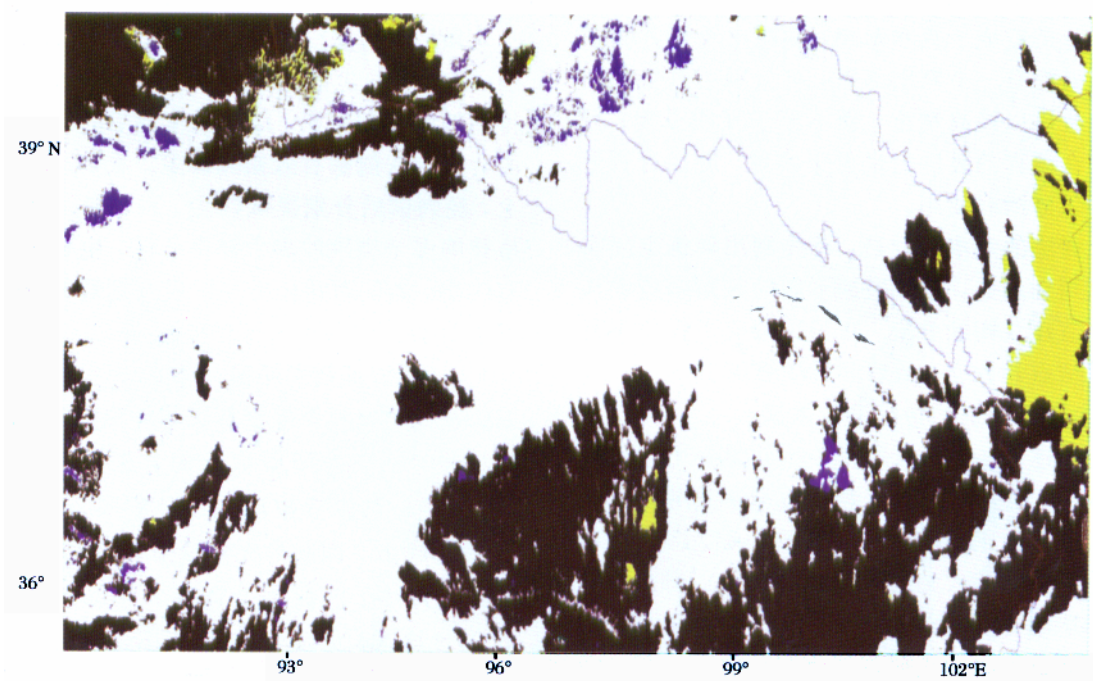


图 3 2002 年 3 月 19 日沙尘信息分类结果

Fig. 3 Classification of dust storm on March 19, 2002

所有地物聚为一类的方法，作为决策树的第一级分支。

在近红外光谱波段，云和雪在 1.6 μm 处一个为反射峰；另一个为反射谷^[22]。因此可用 1.6 μm 波段来鉴别云和雪，这也是我国 FY-1C 卫星上增加 1.6 μm 波段的重要原因之一。同时，由于该波段对水分较为敏感，而其它地物在此波段反射率变化不大^[23]。但是由于许多森林如针叶林、云杉等在 1.6 μm 波段反射率同样很低^[12]，因此若单独用 1.6 μm 波段易引起误判。通过分析 MODIS 图像上各类别信息的可见光波段光谱曲线，结果发现，从 MODIS 的 1.2 μm 波段(5 波段)到 1.6 μm 波段(6 波段)，随波长增加，云(包括高云和薄卷云)和雪的反射率变化值，即其反射率曲线的斜率要远大于其它类别(图 4)。图 4 是在 ENVI 软件下提取出的各类别在 MODIS 可见光 7 个通道上的反射率变化曲线，所以可用 5 和 6 波段结合来进行光谱聚类。

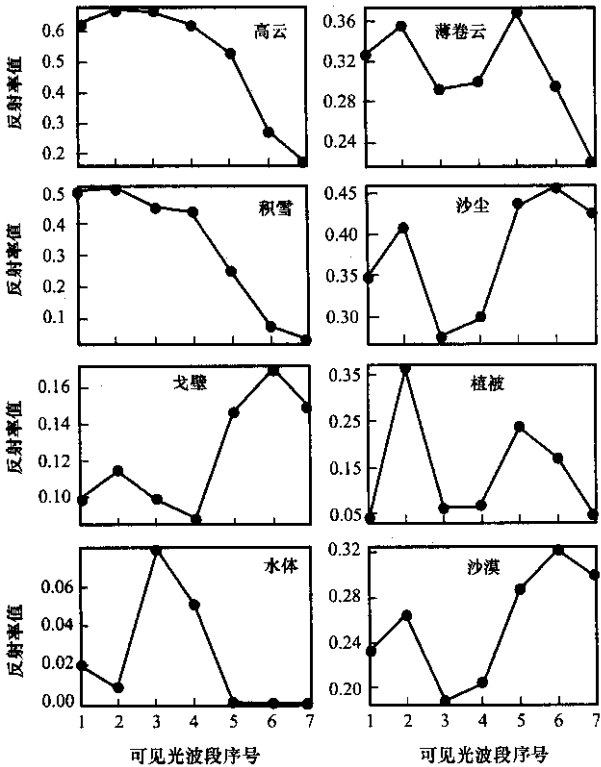


图 4 各类别信息反射率变化曲线

Fig. 4 Reflectance change curve on different information classes

同时由于在多波段图像中，波段之间由照射条件、大气条件等引起的变化是一致的，对两个波段的图像进行比值和差值运算能够达到减弱背景而突

出局部信息，即不同地物的波谱特征差别。这样可以拉开不同类地物的均值，缩小同类地物的方差，有利于区别分类^[17]。因此采用 5, 6 波段差值的绝对值作为决策树的第一级特征判别函数，成功地将云和雪聚为一类，将其它类别聚为一类，其公式如下：

$$Y_1 = | \rho_5 - \rho_6 | , \tag{1}$$

式中 ρ_5 和 ρ_6 分别代表 5, 6 波段的反射率值， Y_1 为第一级特征函数值。当 Y_1 大于某一阈值则聚为云和雪，反之则为其它类。另外，根据普查几次沙尘资料的情况来看，该阈值大致为 0.06 ± 0.005 。利用该函数对 2002 年 3 月 19 日各样本聚类后的点聚图(图 5)，在点聚图上云(包括高云和薄卷云)和雪均落在高值区且与其它类别的界限非常清楚。此外，为了进一步区分云和雪，在参考 NOAA 卫星资料相关研究^[24]的基础上，可采用 Hall^[25]的 MODIS 积雪制图算法构造下一级特征函数。该算法是在分析 TM 图像的基础上，采用阈值技术划分积雪和其它目标。针对 MODIS 的波段，其算法为

$$NDSI = [(\rho_4 - \rho_6) / (\rho_4 + \rho_6)] > 0.4, \tag{2}$$

$$\rho_2 > 0.11, \tag{3}$$

式中， ρ_2 和 ρ_4 及 ρ_6 分别表示 MODIS 的 2, 4, 6 波段的反射率，NDSI(Normalized Difference Snow Index)是归一化积雪指数。MODIS 的波段 2(0.858 μm)，4(0.555 μm)和 6(1.640 μm)分别对应 TM 的波段 4, 2 和 5。判别式(2)用于将积雪从土壤、岩石和植被等类别中区分出来，但该指数混淆了积雪和水体的区别，故采用判别式(3)区分积雪和水体。当波段 2 的反射率 > 0.11 ，并且 $NDSI > 0.4$ 时，该类别为积雪。该算法仅提取积雪这一类别，不划分其它类别，其优点在于非监督并且简单，这符合本文采用决策树法的需要。同时还由于 MODIS 的 4 波段在探测积雪时不会饱和^[12]，从而进一步增强了对积雪的探测能力。

4.3.2 生成沙尘与沙漠等其它类别信息的特征判别函数

在去除了云、雪等高反射率类别对分类的影响后，在可见光波段，沙尘与沙漠和沙地等最易混淆。MODIS 资料的 1 波段通常被用于陆表特征识别^[12]，但通过分析发现，在 1 波段沙尘与薄云覆盖下的沙地极易混淆，其原因可能是由于受大气中气溶胶散射的影响所致，因此仍需采用 1 波段与其它波段组合的方法。

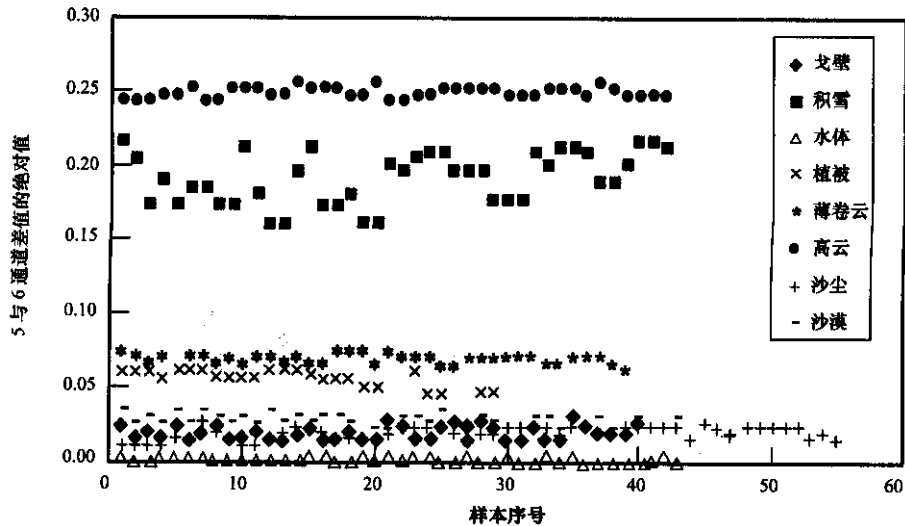


图 5 各类别 5 和 6 波段差值点聚图

Fig. 5 Scatter diagram of 5 minus 6 bands of different classes

按照光学厚度与波长 Angstrom 的关系，波长越长的波段对气溶胶越不敏感。MODIS 的 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 波段均是对气溶胶散射不太敏感而对地表特征仍然敏感的波段。由于在 $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 波段还需要对地表热辐射和水汽吸收进行订正，因此 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段的这种特性就更为人所常用^[12]。Kaufman 等^[26, 27]通过对飞机实测资料的分析，发现 $0.66\text{ }\mu\text{m}$ 红光和 $0.47\text{ }\mu\text{m}$ 蓝光的地表反照率与 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 近红外的地表反照率在植被密集的暗背景地表环境下成良好的线性关系。这一结果被直接用于 NASA 的 MODIS 气溶胶反演业务算法。另外，MODIS 的 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段与 TM 的 7 波段 ($2.2\text{ }\mu\text{m}$) 非常接近，而对 TM 资料的大气散射校正也常用到基于 7 波

段的暗背景法^[17]。Kaufman 等^[27]还进一步分析了 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段的特性，结果发现在 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段，常温地表(约 300K)的热辐射与反射辐射相比量级很小，所以仍能充分反映地物的反射特性；同时又由于此波段的波长比大多数气溶胶类型的粒子尺度又大得多，因此这些气溶胶对 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段影响很小，但在此波段沙尘气溶胶的影响却是不能忽略的。由于 MODIS 的 7 波段对沙尘敏感而受其它气溶胶影响最小的这种特性，选用 7 波段作为区分沙尘、沙漠与沙地等的第一优先级波段；同时又为了更好地区分其它地物并排除较弱浮尘的影响，将 1 波段作为第二优先级波段，经反复试验后，构造特征判别函数如下：

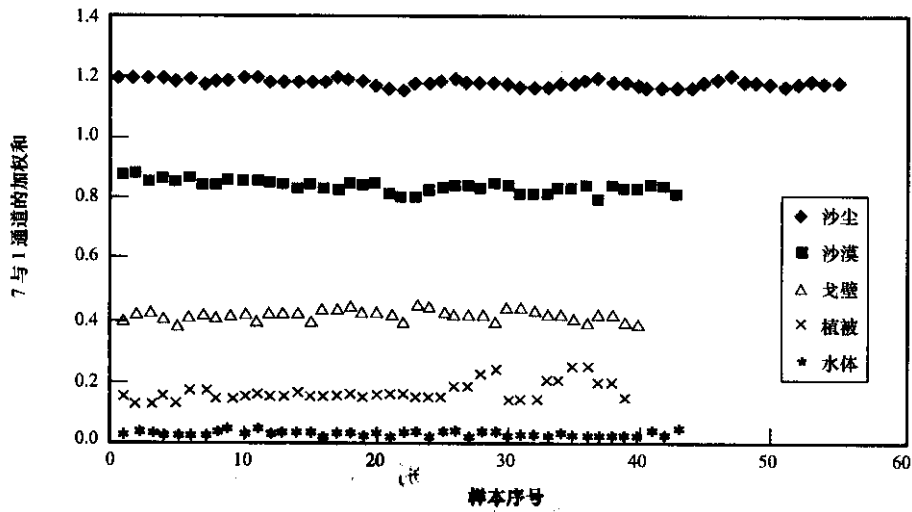


图 6 各类别信息 7 和 1 波段加权和点聚图

Fig. 6 Scatter diagram of 7 plus 1 bands of different information classes

$$Y_2 = 2 \times \rho_7 + \rho_1, \tag{4}$$

式中 ρ_7 和 ρ_1 分别表示 MODIS 的 7 和 1 波段的反射率。当 Y_2 大于某一阈值时，判别为沙尘；小于阈值则按 Y_2 值从大到小分别判别为沙漠、戈壁、植被、水体。由 2002 年 3 月 19 日资料样本得到的点聚图可看到(图 6)，各类别在同一个特征空间内界限非常清楚，从而成功地达到了分类的目的。

4.4 决策树的生成

综合以上的结果，最后生成的决策树，如图 7 所示。

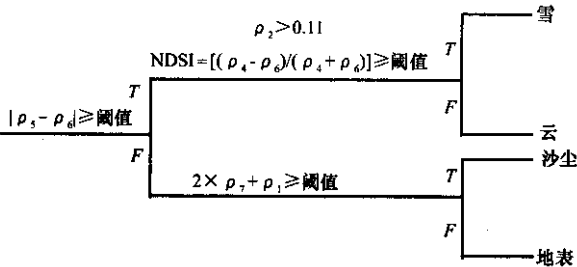


图 7 决策树示意图

Fig. 7 Schematic diagram of decision tree

5 实际分类结果

用前面所生成的决策树，对 2002 年 3 月 19 日的 MODIS 资料进行了分类处理，原始的 7, 2, 1 三波段合成图见图 2，分类结果图见图 3。将图 2 和图 3 与图 1 对比，最大且最强的沙尘暴区都位于武威地区和金昌市范围内，地面能见度的观测结果与三波段合成图和分类结果图均非常吻合，沙尘区与云、地表等的分类效果较好。唯一的缺点是积雪的判别有一定误差，这可能是由于所采用的积雪指数方法在本区域内需进一步修正的缘故。

为进一步验证本方法的有效性，我们还对 2003 年 4 月 9 日沙尘暴天气过程的 MODIS 资料进行了分类处理。2003 年 4 月 9 日在甘肃省河西和中部地区出现了大范围的大风、沙尘天气，金塔、张掖、民勤及兰州为沙尘暴天气，能见度在 900 m 以下；其中金塔为强沙尘暴，最大风速达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级)，能见度 300 m；本次沙尘暴天气开始时间为上午，在夜间结束。通过分别对比本次沙尘天气的 MODIS 三波段合成图以及决策树分类结果图(图略)，发现沙尘区与云区区分的较为清楚，缺点是较弱的浮尘区与地表有一定的混淆。这是由于弱浮尘区中沙尘粒子浓度较低，不能完全遮挡地表所造成的。同时云影与地表和浮尘等仍容易混淆，这是

今后需进一步改进之处。

6 小结

通过对上述天气过程的分析，本文所采用方法的特点为

(1) 在研究 MODIS 各波段光谱特性的基础上，用 5, 6 波段差值的绝对值来区分云、雪和地表、沙尘，用 7 和 1 波段加权和方法区分沙尘和地面信息，用积雪指数和 2 波段聚类的方法区分云和雪，最终采用决策树的方法进行 MODIS 图像的分层分类。实践证明该方法具有普适性。

(2) 完全用可见光波段来提取信息，发挥了 MODIS 可见光波段资料地面分辨率较高(500 m)、辐射分辨率高且衰减很小等优势，同时基于决策树的技术方法流程清楚且易于业务化。

由于用 MODIS 资料提取沙尘信息的工作目前在国内外可供借鉴的成果和经验还很少，本文在这方面做了一些探索性的工作，但难免存在一些缺陷。主要的缺点如下：

(1) 完全采用反照率来提取沙尘信息的方法虽说有其优势，但无法对夜间的沙尘信息进行监测，今后还将进一步研究采用亮温波段对夜间沙尘信息进行提取的方法。

(2) 从分类结果的分析来看，云影对分类的影响仍不能完全消除，云影及其覆盖下的其它地物类别常易引起混淆，这是造成分类误差的主要原因。另外，在本区域内的冬、春两个季节内，高原湖泊中湖冰的存在对分类也有一定影响。

(3) 云和雪的判别采用积雪指数加 2 波段聚类的方法仍有一定误差，需要针对本区域(青藏高原及西北干旱和半干旱区)进一步研究精度更高的方法。

(4) 大气校正及双向反射异性校正对 MODIS 反照率进而对沙尘信息遥感监测的影响也是需要进一步探讨的问题。

为改进上述缺陷，今后还将做更深入的研究，并在借鉴国内外他人最新研究成果的基础上，对本文所采用的技术方法做进一步的改进。同时还将在用 MODIS 资料判定并提取沙尘天气的强度及其载沙量方面做更深入的研究和探讨。

参考文献

[1] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽等. 中国北方年沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J]. 高原气象, 2003, 22(4):

338—345

[2] 张军华, 毛节泰, 王美华. 利用 TOMS 资料遥感沙尘暴的研究[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 457—465

[3] Carlson T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. Mon Wea Rev, 1979, 107: 322—335

[4] Norton C, F R Mosher, B Hinton et al. A model for calculating desert aerosol turbidity over the oceans from geostationary satellite data [J]. J Appl Meteor, 1980, 19: 633—644

[5] Criggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS—1 data [J]. Air Pollute Control Assoc, 1975, 25: 622—625

[6] Steven A A. Using the radiative temperature difference at 3.7 μm and 11 μm to track dust outbreaks [J]. Remote Sens Environ, 1989, 27: 129—133

[7] 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): 300—305

[8] 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

[9] 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

[10] 徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究[C]. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 88—91

[11] 王荣, 唐伶俐, 戴昌达. MODIS 数据在测量地物辐射亮度和反射率特性中的应用[J]. 遥感信息, 2002, 16(3): 21—25

[12] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001

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

[14] 辛金元, 张文煜, 袁九毅等. 沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 311—315

[15] 王锡稳, 王遂继, 冀兰芝等. 2002 年 3 月 19 日强沙尘暴预报与服务[J]. 甘肃气象, 2002, 20(4): 1—3

[16] 李德仁, 王树良, 李德毅等. 论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 221—233

[17] 宁书年, 吕松棠. 遥感图像处理与应用[M]. 北京: 地震出版社, 1995. 185—186

[18] 韩涛. 用 TM 资料对祁连山部分地区进行针叶林、灌木林分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 315—321

[19] 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

[20] 王式功, 杨德保, 孟梅芝等. 甘肃河西“5.5”黑风天气系统结构特征及其成因分析[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 28—31

[21] 杨东贞, 王超. 1990 年春季两次沙尘暴特征分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 18—26

[22] 陈渭民. 卫星气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 222—223

[23] P K Rao. 气象卫星—系统、资料及其在环境中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 354—355

[24] 殷青军, 杨英莲, 徐维新. NOAA 卫星资料云雪识别方法的研究[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 526—528

[25] Hall D K, G A Riggs, V V Salomonson. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data [J]. Remote Sens Environ, 1995, 54: 127—140

[26] Kaufman Y J, D Tanre, L Remer et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS—MODIS [J]. J Geoph Res, 1997, 102(D14): 17051—17068

[27] Kaufman Y J, A E Wald, L A Remer et al. The MODIS 2.1 μm channel—correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286—1298

Research on Dust Storm Monitoring Model Based on EOS/MODIS Data

HAN Tao, LI Yao-hui, GUO Ni

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

Abstract: Through analyzing the spectral characteristic of the MODIS visible bands, the methods of monitoring dust storm is putted forward by using MODIS visible bands data. Based on abundant informations of the MODIS visible bands, the distinguishing functions of different spectral features of varions surface information were construct as branches of decision tree. The some dust storm weather processes were timely monitored by using the decision tree. The monitoring results show that the methods are of valuable for practical use.

Key words: Dust storm monitoring; EOS/MODIS remote sensing; Visible band; Classification; 万方数据Decision tree