

沙尘暴同一化监测模型与灾害评估研究*

罗敬宁 徐 喆
马 岚 陆文杰

(中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要 阐述了将 GIS/RS (地理信息系统/遥感) 一体化技术应用在沙尘暴灾害的监测与评估工作中的方法, 提出利用不同遥感数据源建立同一化的沙尘暴监测模型的方法, 将沙尘暴监测由定性研究转变为定量特征参数计算。引入 GIS 技术建立了可业务使用的沙尘灾害评估模型, 通过对下垫面数据的集成与叠合分析, 可以快速、机动、准确、可靠和多层次进行沙尘暴的灾后评估。

关键词: 沙尘暴; 地理信息系统; 同一化模型; 灾害评估; 卫星遥感

文章编号 1006-9585 (2004) 01-0092-09 **中图分类号** P412. 27 **文献标识码** A

1 引言

沙尘暴是近年来对自然生态环境、人类生产生活造成重大影响的一种自然灾害。由于沙尘天气, 尤其是沙尘暴, 通常发生在荒漠地区, 常规气象站十分稀少, 故在沙尘天气的监测方法中, 传统的地面监测方法不能很好的刻画沙尘天气过程^[1~3]。卫星遥感技术可以从空间上对其进行全面监测, 而且具有较高的时间分辨率, 是目前最为有效的监测、跟踪、分析沙尘天气的手段, 特别是利用多种遥感数据监测沙尘暴, 提取沙尘信息, 定量分析沙尘暴的有关特征参数, 已成为沙尘暴研究的热点课题。

本文详细阐述了利用不同遥感数据在同一标准模型下进行沙尘暴监测处理的方法, 并提出了沙尘暴监测由受时空影响较大的定性研究向同一标准的定量特征提取转变的技术思路, 同时还提出了综合应用卫星遥感监测与地理信息系统 (GIS) 技术, 对沙尘暴灾害进行灾后评估的技术方法。

我们将 GIS/RS (地理信息系统/遥感) 一体化技术应用在沙尘暴灾害的监测与评估工作中, 为沙尘暴灾害的大面积、客观、实时监测提供了技术保障; 并可实现对遥感获取的沙尘暴灾情信息与下垫面实况信息的有机结合, 进行各种空间分析与专题分析, 为有关部门尽快了解沙尘暴灾情提供重要的决策支持。由此, 建立起完善的沙尘灾害监测与评估体系, 可为政府和有关部门提供及时、准确和可靠的数据, 使防灾减灾决策有充分的科学依据。

2004-01-08 收到, 2004-02-10 收到修改稿

* 国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目 (Y0101) 资助

2 卫星遥感监测沙尘暴的方法

2.1 卫星遥感数据源概述

目前，气象卫星数据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 250~5000 m，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。

NOAA KLM 系列卫星是由美国国家海洋和大气管理局（NOAA）和美国国家航空与航天局（NASA）联合研制的新一代极轨气象卫星，目前已经先后发射了 NOAA-15、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 是我国自行研制的三轴稳定太阳同步极地轨道业务气象卫星，其主要功能是用于天气预报、气候研究及环境监测。多通道可见红外扫描辐射计（MVIRS）是风云一号的主要探测仪器，共有 10 个探测波段。我们在监测沙尘暴方法中常用的 6 个波段具体参数见表 1。

表 1 卫星遥感探测波段参数

NOAA	波段号	CH1	CH2	CH3A	CH3B	CH4	CH5
KLM	波长/ μm	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-1	波段号	1	2	3	4	5	6
C/D	波长/ μm	0.58~0.68	0.84~0.89	3.55~3.93	10.3~11.3	11.5~12.5	1.58~1.64

2.2 沙尘暴卫星遥感监测的原理

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，并不能简单的在各单波段取相应的阈值，必须利用多波段融合技术动态地获取沙尘区信息（图 1）。

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，观测到的粒子半径 r 可以从 0.1~100 μm ^[1,4]，较强沙尘天气中观测到的分布最大值常在 5~10 μm 之间^[1,5]。对于可见光波段，沙尘粒子半径与波长的比值 $r/\lambda \gg 1$ ，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 1.6 μm 近红外波段，沙尘粒子半径与波长接近，适合用米散射解释，并且大气分子与微粒气溶胶对红外辐射干扰较小，从而在遥感较强的大气沙尘时，可以忽略分子与微粒气溶胶的影响。同时，1.6 μm 近红外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。同时，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、强度和消散等有密切的关系，因此，在

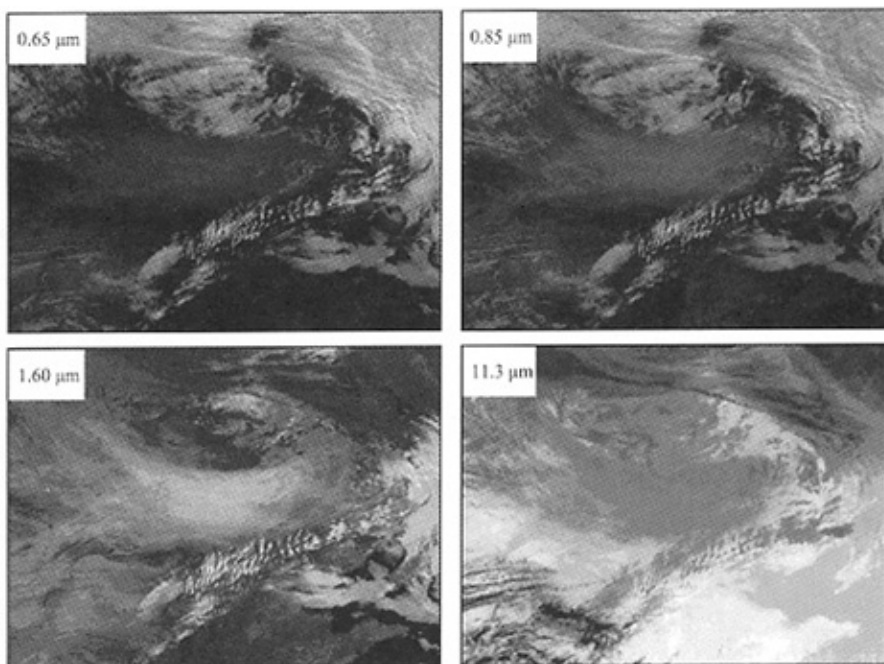


图1 沙尘暴遥感图像分波段显示

沙尘天气的遥感监测中,热红外辐射是观测的重点。

3 卫星遥感沙尘暴同一化方法研究

利用卫星定性监测分析沙尘暴的技术已较成熟,但沙尘天气受时空变化影响较大,必须建立一致的沙尘暴监测标准,也就是将沙尘暴监测由定性研究转变为可操作的定量计算。我们针对 NOAA KLM 和 FY-1C/D 两种系列卫星,完成了沙尘监测同一化标准的研究。卫星监测沙尘的标准会受到多种因素影响,比较明显的是探测波段的差异、过境时间的不同、太阳光照条件的区别等,对监测结果有相当显著的影响,即使同一颗卫星也会因此产生不一致的监测结果。本文提出的沙尘暴遥感监测同一化方法可以解决沙尘暴监测不一致的问题,同时为定量计算沙尘暴特征参数提供了标准的信息提取方法。我们将同一化监测方法分为两部分,首先利用遥感数据准确地识别沙尘暴的影响区域,热红外波段是主要的使用数据源;其次在获取影响区的基础上,用实际的遥感数据模拟沙尘暴的定量分布参数,包括强度、厚度、扩散速度、移动速度等。 $1.6\ \mu\text{m}$ 近红外波段可以很好地模拟沙尘的分布规律^[6],而且它本身又对以上参数的计算有很大帮助,可以作为主要的定量基础数据源使用。

3.1 沙尘暴影响区域监测的标准方法

作为沙尘暴遥感监测的第一步,首先应该获取沙尘暴的影响区域。以前的很多研究已经证实位于热红外的 $11\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 波段对沙尘的反映比较敏感。很多监测方法都

使用 11 μm 、12 μm 波段的差值作为沙尘暴监测的主要依据^[7~9]，并将其引入定量计算模型。但我们的研究发现，11 μm 、12 μm 波段的差值很难准确地描述沙尘暴的实际强度变化，这个差值对于沙尘暴监测仅具有影响区域识别的意义，而不能作为定量数据用于特征参数的计算。

无论是与 0.65 μm 波段，还是与地面水平能见度相比较，11 μm 、12 μm 波段的差值的先增后减情况都非常明显。沙尘暴区在由弱到强的过渡过程中，11 μm 、12 μm 波段的差值会在某个强度下达到一个峰值，然后开始下降，且这个峰值不具有普遍一致性，仅仅与每个特定的观测数据相关，因此，11 μm 、12 μm 波段的差值无法引入定量计算模式。

另一方面，11 μm 、12 μm 波段的差值在获取沙尘暴影响区域方面确有重要作用，对多次沙尘暴过程的资料分析表明，发现在这个差值达到 1 K 以上，而 11 μm 和 12 μm 波段测值都小于 290 K 时，即可以认为此区域为沙尘暴影响区。同时，在实际使用过程中，我们用 11 μm 、12 μm 波段的比值代替 11 μm 、12 μm 波段的差值，这样可以提供一个无量纲值，可以更好的用于确定沙尘影响区的阈值。

3.2 利用 1.6 μm 波段定量描述沙尘暴监测结果

在准确获得沙尘暴影响区域的基础上，可充分利用 1.6 μm 近红外波段特性对大气沙尘进行定量遥感。1.6 μm 近红外波段测值与沙尘强度有线性关系，使其具有了定量描述沙尘暴监测结果的能力。尽管如此，1.6 μm 近红外波段的测值仍然受空间、时间、卫星等方面的影响，为了准确监测沙尘暴，我们需要的是一种具有稳定性和长期可比性的数据，使得不同状态下得到的结果是基于同一标准的，而且任何两次沙尘暴的监测结果都可以进行对比分析。为此，引入可比沙尘强度指数 (I_{csd})^[6]作为 1.6 μm 波段测值变化后的结果：

$$I_{\text{csd}} = \alpha \times (e^{\beta R_{1.6}} - 1),$$

式中， $R_{1.6}$ 为可见光 1.6 μm 波段测得的反射率； α 和 β 为调节因子，一般取值为 10 和 0.8。

对发生在不同时间和不同区域的沙尘暴，使用可比沙尘强度指数 (I_{csd}) 和 1.6 μm 波段测值 ($R_{1.6}$) 与 0.65 μm 波段测值 ($R_{0.65}$) 作散点图分析 (图 2)。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 2a、2b 和 2c 分别是这三场沙尘暴沙尘区 1.6 μm 波段测值与所作散点图；图 2d、2e 和 2f 分别是相应可比沙尘强度指数 (I_{csd}) 与 0.65 μm 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 μm 波段构建的可比沙尘强度指数 (I_{csd}) 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_{csd}) 可以解决不同时空条件下的沙尘暴强度监测结果的可比问题。

表 2 $R_{1.6}$ 和 I_{csd} 与 $R_{0.65}$ 散点图拟合直线方程斜率变化

	东北地区 (2001 年 4 月 7 日)	华北地区 (2002 年 3 月 15 日)	南疆地区 (2002 年 4 月 23 日)
$R_{1.6} - R_{0.65}$ 拟合斜率	0.45	0.72	0.83
$I_{\text{csd}} - R_{0.65}$ 拟合斜率	0.42	0.41	0.45

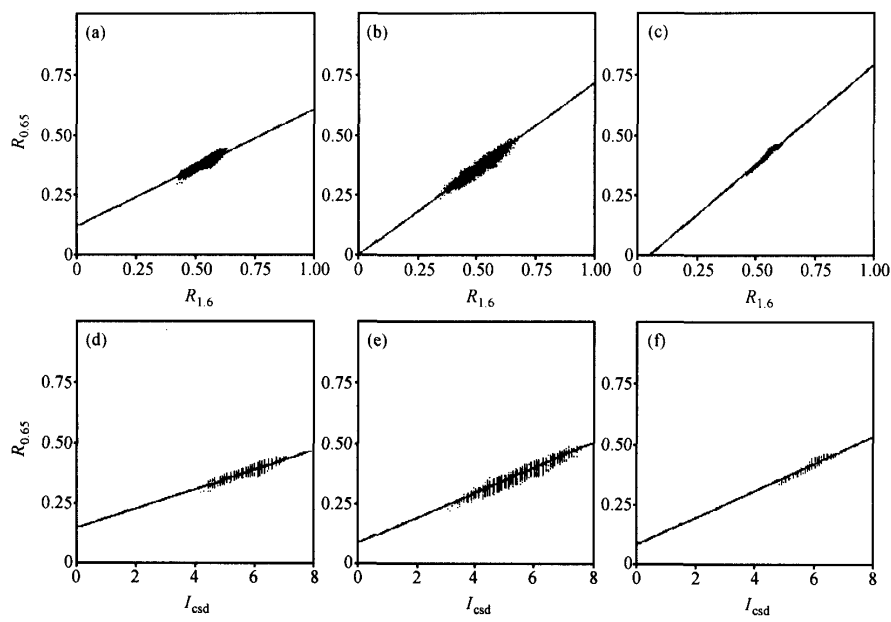


图 2 不同时次遥感数据 I_{csd} 指数稳定性分析 (NOAA-16)

(a) 2001 年 4 月 7 日 $R_{1.6}$ 和 $R_{0.65}$ 散点; (b) 2002 年 3 月 15 日 $R_{1.6}$ 和 $R_{0.65}$ 散点;
(c) 2002 年 4 月 23 日 $R_{1.6}$ 和 $R_{0.65}$ 散点; (d) 2001 年 4 月 7 日 I_{csd} 和 $R_{0.65}$ 散点;
(e) 2002 年 3 月 15 日 I_{csd} 和 $R_{0.65}$ 散点; (f) 2002 年 4 月 23 日 I_{csd} 和 $R_{0.65}$ 散点

可比沙尘强度指数不同时空状态下有较好的稳定性, 为我们在在此基础上更深入地计算沙尘特征参数提供了必备的基础。同时 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段本身也是目前最为接近沙尘暴粒子分布物理特征的探测波段, 比其他波段受到的干扰要少得多。

如上所述, 沙尘暴监测的同一化方法研究可以尽量避免监测结果的不一致, 在物理结构上也可以非常好的描述沙尘暴分布特征。利用同一化方法, 我们可以进一步计算更多的沙尘暴定量参数, 包括沙尘分布指数、沙尘强度等, 这些参数的精度在经过同一化处理后可以接近实际观测水平, 从而将遥感获取的结果直接应用于沙尘暴的实际分析中。

另外, 由于目前只有极轨卫星的探测器具有 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段, 而一颗极轨卫星对同一地区一天内仅可以获取白天和夜间各一幅影像, 故在实际监测中我们需要将许多不同极轨卫星的资料同时使用, 这样才能保证一天中对沙尘暴的监测和跟踪具有较高的时间频率。目前, 常用的卫星包括 FY-1C/D、NOAA-16/17、EOS/MODIS 等, 在时间安排上这些卫星可以使具有间隔 3 小时以内的监测沙尘暴的能力, 对沙尘暴的起源、移动、传输路径、扩散等都可以进行持续监测。这就要求在每个时段内得到的沙尘暴监测结果都具有一致性和可比性, 利用沙尘暴监测同一化方法可以很好地解决多颗卫星监测结果的匹配问题。

4 地理信息系统与沙尘暴灾害评估

沙尘暴灾害评估涉及到区域环境因子（如土地利用状况）、沙尘暴特征（沙尘暴分布范围、强度）和区域社会经济发展状况（如人口、GDP）。其中，土地利用状况与沙尘暴特征应作为沙尘暴灾害评估的重要因子，这些因子均具有明显的空间特征，表现为空间数据，而地理信息系统技术正是空间数据管理与分析的重要技术手段，对沙尘暴灾害评估起到了极大的支持与辅助作用^[10~12]。

4.1 空间数据的集成

地理信息系统为沙尘暴评估提供了各种基础数据，以反映下垫面的状况^[13]。针对我们的工作，集成了以下空间数据：

（1）全国 1:100 万比例尺行政数据。包括国界，省、地区、县行政边界，地市级以上居民地位置，县城位置。

（2）全国 1:100 万比例尺土地利用数据。将中国土地利用现状划分为耕地、园地、林地、牧草地、水域、城乡居民及工矿用地、交通用地和难利用地 8 大类型和 20 子类，全面、概括地反映了我国土地利用现状及其地域分布规律。

（3）全国 1:400 万比例尺植被类型数据。将全国植被类型划分为自然植被、农业植被、无植被地段、湖泊 4 大类 12 子类。

4.2 属性数据的集成

地理信息系统技术可将区域社会经济发展状况属性数据赋予其所在的空间区域，为沙尘暴灾害评估提供更丰富的数据平台。

4.3 空间分析技术的支持

GIS 技术构建了沙尘暴灾害评估系统的技术平台。应用 GIS 技术，可以将沙尘暴特征与下垫面性质进行空间特征的几何分析，即以空间要素的定位数据为基础，通过数据集合的几何分析方法，确定空间要素多重属性的特征及其相互间的联系。在沙尘暴灾害评估中，我们应用的核心技术是多边形叠置分析。

多边形叠置分析是将同一地区、同一比例尺的两组或两组以上多边形要素的数据文件进行叠置，根据两组多边形边界的交点来建立具有多重属性的多边形或进行多边形范围内的属性特征统计分析。叠置分析的目的是精确地计算一种要素（例如，沙尘暴分布范围）在另一种要素（例如，行政区域）的某个区域多边形内的分布状况和数量特征（包括拥有的类型数、各类型的面积及其所占总面积的百分比等等），或提取某个区域范围内某种专题内容的数据。

5 沙尘暴灾害评估的指标模型

沙尘暴灾害的灾情评估的指标体系，因研究的目的、方式、方法，以及应用部门的需求可有一定区别。在常规研究方法所采用的指标体系中，许多灾情要素指标量无法通过遥感图像解译直接获取。为了适应采用 RS 与 GIS 方法进行沙尘暴灾害灾情评估的需要，必须寻找相应的灾情要素评估指标体系。同时，沙尘暴灾害的形成与发展还

受制于多种自然与社会经济因素。本文结合沙尘暴监测的研究经验，提出以下两种评估模型。

5.1 区域社会经济状况模型

区域社会经济状况主要描述沙尘暴灾害分布的区域范围、涉及行政区划、影响人口数等指标。区域社会经济状况模型主要利用沙尘暴空间分布与区域的行政区划等空间数据，以及区域社会经济属性数据进行叠置分析，以图、表的形式反映出沙尘暴灾害对区域的影响。

以 2002 年 3 月 21 日的一次沙尘过程为例，图 3 中的沙尘影响区是通过气象卫星遥感技术获得的，通过与区域行政区划数据的叠加分析，可以得到沙尘影响范围示意图（图 3），从图中可以清楚地看到此次沙尘暴的影响空间范围，同时还可以定量地计算出此次沙尘暴影响到的省、地、县数量以及各省受沙尘暴影响的面积（表 3）。



图 3 沙尘影响范围与行政区划示意图

表 3 2002 年 3 月 21 日沙尘过程影响统计

区域名称	影响地区/个	影响县/个	影响面积/km ²
北京	1	4	4804.8
河北	4	17	51917.8
吉林	3	17	49306.13
辽宁	3	9	17579.14
内蒙古	5	35	265493.01
境外			63738.61

图 3 和表 3 较好地反映了这次沙尘暴灾害影响的空间分布和在不同行政区域的影响程度，同时也反映了此次沙尘暴过程对区域社会经济状况的影响。

5.2 下垫面的土地利用状况模型

下垫面的土地利用状况很大程度上反映了区域的社会经济状况，通过分析沙尘暴对各种土地利用类型影响的叠置分析、聚类统计，也可以反映出沙尘暴灾害的影响程

度。

仍以 2002 年 3 月 21 日的沙尘过程为例，图 4 是将沙尘区域与土地利用信息叠加分析，从而获得沙尘暴对各种土地利用类型的影响面积统计（表 4）。

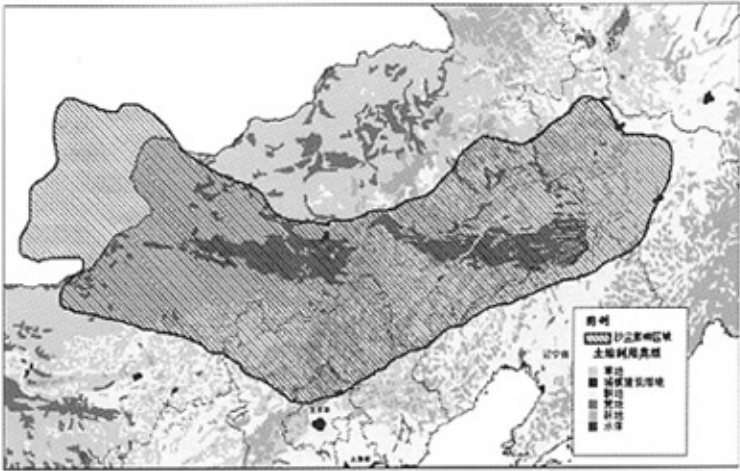


图 4 沙尘影响范围与土地利用示意图

表 4 2002 年 3 月 21 日沙尘过程影响各土地利用类型面积统计表

	草地/km ²	耕地/km ²	林地/km ²	荒地/km ²
北京	2338.71	677.22	1654.12	
河北	26157.02	15823.97	9836.96	3.56
吉林	14704.70	31762.11	2098.70	529.60
辽宁	2168.09	12073.98	2997.81	338.69
内蒙古	153432.81	46421.23	11363.79	53889.11

6 结论

- （1）大气红外窗区 11 μm 、12 μm 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 μm 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，直接用于计算沙尘光学厚度、沙尘浓度、大气含沙量等定量参数时还有一定难度。
- （3）应用遥感与地理信息系统一体化技术进行沙尘暴监测与评估具有快速（几小时内作出反映、24~48 h 取得灾情评估初步结果）、机动（任意区域评估）、准确（定位、定性、定量结合）、可靠（实现应急和常规运行任务）和集成（灵活的适应不同应用目标和任务需求）的特点。

(4) 沙尘暴灾害评估模型还有待完善。目前使用的沙尘暴灾害评估模型是采用以统计或模糊推判为主的方法,较为理想的模型应该是将遥感的沙尘特征信息、影响区域社会经济人口的历史信息及影响区域现实土地资源损失信息融为一体的层次化模型。要完成这样一种模型的设计和组构,还需要进一步开展大量的典型试验。

参 考 文 献

- 1 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,遥感学报,2001,5(4),300~305.
- 2 陈洪滨、吕达仁,关于卫星遥感干旱草原路面过程的方法和应用研究,气候与环境研究,1997,2(3),316~319.
- 3 孙司衡、郑新江,沙尘暴的卫星遥感监测与减灾服务,测绘科学,2000,25(2),33~36.
- 4 张仁健、王明星、浦一芬等,2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特征分析,气候与环境研究,2000,5(3),259~266.
- 5 Shenk, W. E., and R. J. Curian, The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements, *Mon. Wea. Rev.*, 1974, 102, 820~837.
- 6 罗敬宁、范一大、史培军等,多源遥感数据沙尘暴强度监测信息可比方法研究,自然灾害学报,2003,12(2),28~34.
- 7 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,第四纪研究,2001,21(1),48~55.
- 8 毛节奏、刘莉、张军华, GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究,气象学报,2001,59(3),353~359.
- 9 邱金恒、杨金辉,沙尘暴的光学遥感及分析,大气科学,1994,18(1),1~10.
- 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,自然灾害学报,2001,10(4),46~51.
- 11 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,地理学报,2000,55(5),513~521.
- 12 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,地球科学进展,2002,17(2),273~277.
- 13 高志强、刘纪远,基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究,气候与环境研究,2000,5(2),155~164.

Integrated Model for Dust Storm Monitoring and Disaster Evaluation

Luo Jingning, Xu Zhe, Ma Lan, and Lu Wenjie

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract The application of an integrated technology of remote sensing and geographical information system in monitoring and evaluating of dust storm disasters is discussed, and an identical mathematical model for dust storm monitoring using remote sensing technology is obtained, it explains that the operational system used in dust storm disaster evaluation using GIS technology. Based on the overlay analysis of the dust storm information and the ground information, the system can assess the dust storm disaster rapidly and exactly.

Key words: dust storm; geographical information system; identical mathematical model; disaster evaluation; remote sensing