

基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测

范一大, 史培军, 潘耀忠, 景贵飞

(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 100087; 2. 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875)

摘要: 利用 NOAA/AVHRR 数据, 通过查找表增强显示沙尘暴信息和利用经验模型提取沙尘信息, 探讨了区域沙尘暴强度监测的方法。研究发现, 利用可见光、近红外和远红外通道多光谱合成遥感数字图象对沙尘暴的监测和沙尘信息的提取效果明显; 在低植被覆盖区域, 利用 GVI 指数提取沙尘信息是不可行的, 但这一指数有助于提取海面上的沙尘信息; 并对沙尘浓度提取进行了探讨, 以期显示区域沙尘暴的强度。

关键词: 沙尘暴; NOAA/AVHRR; 沙尘浓度; 监测

中图分类号: P425.5^{1,2} **文献标识码:** A

Monitoring the intensity of regional dust storm using NOAA/AVHRR data

FAN Yi-da, SHI Pei-jun, PAN Yao-zhong, JING Gui-fei

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China, 2. Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This paper discussed the methods about the intensity monitor of regional dust-storm with NOAA/AVHRR data, which highlighted dust-storm images by Lookup Table (LUT) and extracted dust-storm spatial information with empirical model. The study showed that the multi-spectral image of visible, near-infrared and far-infrared bands can monitor the dust-storm and sort its information efficiently; and in the region of lower rate of vegetation coverage, it is not feasible to extract dust-storm information by the global vegetation index I_{GV} , but it is helpful in ocean region. Furthermore, the study tried to display the intensity of regional dust-storm by extracting the dust-storm density.

Key words: dust-storm; NOAA/AVHRR; dust-storm density; monitor

沙尘暴是严重的生态环境灾害^[1,2]。上个世纪 90 年代, 我国北方的沙尘暴天气呈现增长的趋势, 尤其是在 2000 年春天多次发生的沙尘暴天气, 其时间之早、频率之高、范围之广、强度之大, 为历史同期所罕见^[3], 仅北京及其周边地区就连续 12 次遭受沙尘暴和浮尘天气的袭击。同时, 沙尘暴的跨洋过海受到国际社会的广泛关注^[4]。进入 21 世纪, 2001 年 1 月 1 日和 2 月 1 日, 内蒙古锡林郭勒盟及其周边地区在遭受白灾的同时, 又遭受到历史罕见的沙雪暴灾害。

沙尘暴研究对我国北方地区的生态环境建设和可持续发展有着重要的意义。通过研究沙尘暴引起的大气中气溶胶的变化, 及其对气候的反馈影响, 对于在区域及全球尺度上理解大气状况乃至气候变化, 全球

收稿日期: 2001-07-09; 修订日期: 2001-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目 (G2000018604)

作者简介: 范一大 (1968-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事自然灾害遥感监测研究。

变化都非常重要^[9]。

沙尘暴动态监测和灾后评估, 以及建立预警系统是沙尘暴研究和寻求有效减灾措施的 3 个重要环节。目前, 地面观测主要利用气象观测站网, 但由于气象站点分布的不均匀、不合理, 沙尘源区(尤其在沙漠、戈壁地区)气象站点分布非常稀少, 甚至一些沙漠腹地往往因交通不便, 常常为气象观测的空白区。因此, 利用这些稀疏的点状信息, 很难准确测量出沙尘暴的空间分布, 这给研究沙尘暴带来了很大的困难。利用气象卫星 NOAA/AVHRR 遥感技术可以弥补地面观测的这一不足, 在大尺度、中尺度全球动态观测研究中较其它遥感数据有着明显的优势, 已成为沙尘暴监测不可缺少的重要手段。

利用 GMS 卫星红外通道的数据, 可以分析出沙尘区位置^[6]; 利用 NOAA/AVHRR 数据合成的遥感图像中, 沙尘暴呈现为沙尘羽的形式(dust plume)^[7,8]; 一些研究结果定性描述了大气中的沙尘粒子或气溶胶在遥感数据中的反射辐射特征及其空间分布^[8~10]。

沙尘暴发生时, 沙尘中含有的大量矿物质, 通过吸收和散射太阳辐射及地面和云层长波辐射, 影响地球辐射收支和能量平衡^[9,11], 同时影响着大气的浑浊度(能见度), 在 NOAA/AVHRR 的各通道上表现出光谱特征的差异。由于沙尘的光谱特性与下垫面背景是有区别的, 因而为沙尘暴的监测提供了可能。NOAA/AVHRR 可见光第 1 通道(0.580~0.680 μm)和近红外第 2 通道(0.725~1.10 μm)反射率, 以及中红外第 3 通道(3.55~3.93 μm)、远红外第 4 通道(10.30~11.30 μm)亮温对大气中的沙尘较为敏感。第 1 通道和第 2 通道主要反映了地物对太阳光的反射特性, 对地表植被、云和水体较为敏感; 在可见光通道, 大气沙尘对它的影响往往要高于对近红外通道的影响^[9], 尤其在地表植被盖度较高时更为明显; 由于第 3 通道的对地观测数据包括放射辐射和反射太阳辐射两部分, 而第 4 通道主要反映地物的辐射特征。因此, 研究中主要利用 NOAA/AVHRR 数据的第 1, 2, 4 通道提供沙尘信息。

1 沙尘暴遥感监测方法

采用 NOAA/AVHRR 的第 4, 2, 1 通道数据彩色合成后, 图象可以清晰分辨出地表和云的信息, 但对于沙尘区空间分布的目视判读不十分理想, 尤其是对稀薄沙尘覆盖的区域。因此, 本文主要采取两种方法处理 NOAA/AVHRR 遥感数字图象。一是基于各通道关于不同地物的统计特征建立图像显示查找表(lookup table, LUT), 以增强显示沙尘特征信息, 同时也保证云及下垫面特征的清晰可辨; 二是基于沙尘、下垫面、云等探测目标在 NOAA/AVHRR 各通道光谱特征的差异, 建立经验模型, 提取沙尘信息。

1.1 基于查找表变换的沙尘暴信息快速增强方法

这种方法时效性比较高, 适合灾害监测机构的业务流程, 一旦沙尘暴天气发生, 可以在短时间内生成沙尘暴卫星影像, 在 GIS 技术的支持下分析沙尘信息的空间分布特征, 结合气候模型判断发展趋势。

理论上讲, 沙尘暴的发生改变了地表的反射和辐射平衡, 因此, NOAA/AVHRR 的 5 个通道都应该可以用来监测沙尘暴。研究中, 通过对几次发生沙尘暴的遥感数据进行分析, 证明利用 NOAA/AVHRR 资料的任何一个通道, 的确可以监测到沙尘暴信息。但是, 只有在强沙尘暴天气发生时, 效果才比较明显; 当沙尘暴天气很弱时, 若想分辨出沙尘暴信息以及它的空间分布, 难度比较大。经反复验证, 在 NOAA/AVHRR 数据的 1~4 通道的反射率(或亮温)特征中, 下垫面数值分别集中在 17%, 18%, 302K 和 290K 处, 沙尘区数值分别集中在 28%, 25%, 296K 和 265K 处, 云区数值分别集中在 50%, 45%, 275K 和 230K 处。

基于三基色原理, 遥感图像所显示出的不同光谱通道的数值, 决定着相应被观测物颜色的亮度值。查找表则是一个函数, 它建立了原始遥感合成图像各通道数值与显示遥感图像各通道亮度值之间的映射关系, 目的是对遥感数字图像进行增强处理, 以突出图像特征。要建立适合于沙尘暴信息增强的查找表, 必须综合考虑遥感图像中所含的特征信息, 在考虑突出沙尘信息特征的同时, 也要考虑突出云和下垫面相应特征, 使之有更好的视觉效果。试验中我们对第 1, 2 通道分别作线性增强以突出地表特征, 对第 4 通道依照不同目标的亮温数值区间作相应增强减弱处理, 以突出辐射特征。变换曲线如图 1。

通过查找表变换, 将 1, 2 通道的反射率和 4 通道的辐射率拉伸到图像中的 [0, 255] 的灰度范围, 这样就充分利用了辐射分辨率的潜力。其中, 第 1、2 通道变换曲线相同(如图 1a), 大约在 [5%, 40%] 这个反射率区间, 主要是下垫面(如地表和水域)和沙尘区的反射率范围, 采用线性增强的方法, 可以更加详细地刻画

地表特征,同时将沙尘区数值范围拉开,这有利于分析沙尘密度。通道 4 的变换曲线主要目的是线性拉开沙尘区的辐射亮温,即将约[250, 272]区间的沙尘辐射亮温映射到[220, 255]图象灰度区间,同时将具有高辐射特征的下垫面灰度压低,以间接突出 1, 2 通道的信息。变换曲线都将云的反射率和辐射率映射到灰度为 255 的数值,以尽可能地减小云的数值表达范围,相应增加其它特征信息的数值表达空间,这样也可使云在遥感图象中呈白色,适合视觉习惯。

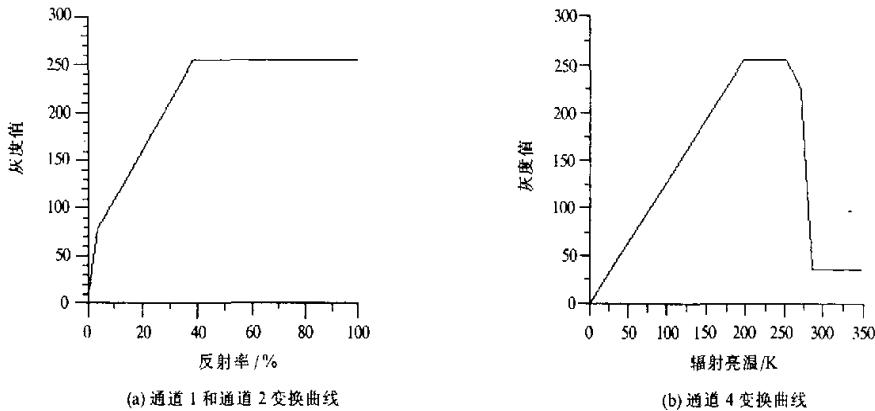


图 1 查找表变换曲线

Fig.1 Transform curves of lookup table

1.2 基于经验模型的沙尘暴信息提取方法

这种方法有利于在全球或区域的尺度上研究沙尘暴的沙源、空中远距离运输和沙尘的沉降区域,提高沙尘暴天气的预报能力和评估灾害损失的准确度。沙尘信息的提取技术也是从定性到定量研究沙尘暴天气的关键技术。

沙尘信息提取是将沙尘区从云和下垫面的陆面、海面分离出来。由于下垫面组成成分复杂多样,导致光谱特性也复杂多样,给沙尘信息的提取增加了难度。为此,本文直接采用单波段和多波段数据组合作为自变量,通过统计分析,建立了利用 NOAA/AVHRR 多波段数据组合提取沙尘信息的经验模型。在该模型建立中,主要考虑了以下因素:

(1) 去云处理 利用云的高反射特性和低辐射特性从图像中去除云的部分,阈值为:通道 1 > 34% 或通道 4 < 251K。这个条件在多数情况下将云和水体归为一类,将沙尘暴区和下垫面归为一类。

(2) 去下垫面 利用下垫面的低反射特性和高辐射特性从图像中去除大部分下垫面信息。阈值为:通道 1 < 24% 和通道 4 > 276 K。这个阈值不能去除下垫面中海面的部分,同时也将裸地或低植被覆盖区域的低密度沙尘区去除了,因此需要进一步处理。

(3) 低密度沙尘区提取 这种方法主要用于提取裸地或低植被覆盖区域上空的低密度沙尘,并不适合于植被覆盖较高的区域。阈值为:21% < 通道 1 < 24% 和 276 K < 通道 4 < 286 K。

(4) I_{GV} 指数

根据 NOAA/AVHRR 通道 1, 2 计算产生的各种描述植被生长状况的参数中,最普遍使用的是 I_{NDV} 和 I_{GV} , 计算公式分别为

$$I_{NDV} = \frac{C_{CH2} - C_{CH1}}{C_{CH2} + C_{CH1}} \quad (1)$$

$$I_{GV} = 100(I_{NDV} + 1) = \frac{200C_{CH2}}{C_{CH2} + C_{CH1}} \quad (2)$$

式中: C_{CH1} , C_{CH2} 分别代表通道 1, 2 的反射率。

I_{GV} 将 I_{NDV} 值域范围从[-1,1]线性拉伸到[0, 200],在指数图像中数值与灰度值相等,便于定量分析植被

指数的空间分布特征。为此，本文利用同一时次的 NOAA/AVHRR 数据，在同一区域上同步计算了 I_{GV} ，结果显示沙尘信息与下垫面混淆情况如表 1。

利用 I_{GV} 在区间 $[0, 87]$ 上的单一性，可以解决上述因素 (2) 中阈值在去除下垫面时无法去除海面信息的问题；利用 I_{GV} 在区间 $[107, 200]$ 上的单一性，可以提取植被覆盖相对较高区域上空的沙尘信息。

(5) 沙尘提取精度的改进

在沙尘暴的监测中，存在“同谱异物”的现象。例如：沙漠、戈壁或裸露的地表与低密度沙尘区的反射率是比较接近的；由于沙尘区与低云的亮温非常接近，因此，有时易发生混淆，等等。这些现象给沙尘暴的监测增加了难度，如果解决不好，必然要影响沙尘暴监测的精度。解决类似问题，除了利用植被指数或其它指数的方法寻找单一特征加以区分外，还可以从多光谱的角度，研究区分沙尘信息与其他地物信息在各光谱波段中相互排斥的特征，进而通过综合判断，以提高识别精度。例如，尽管沙尘在第 1, 2 通道与裸露地表难以区分，但在 3, 4 通道的亮温上却有着很大的差别；尽管沙尘与低云在红外波段容易混淆，但在可见光反射率方面存在差异。利用沙尘暴信息的这些特征，合理安排提取流程，可大大提高沙尘暴信息的提取精度。

基于上述 5 种情况，建立了沙尘提取的经验模型（如图 2），同时利用沙尘信息在远红外波段辐射特性的差异，对提取出的沙尘区域进行密度分割。

2 应用实例

利用上述方法和流程，我们对 2000 年 4 月 6 日 16 时过境的 NOAA-14 遥感数据进行了相应处理。这次沙尘暴天气源于内蒙古中西部地区，一直影响到北京、天津、河北等地，这是 2000 年春季北京遭受的第 6 次沙尘暴袭击，这次沙尘暴还跨越渤海，影响到韩国和日本的部分地区。

2.1 沙尘遥感图像的增强显示

上述数据经处理后，得到 NOAA/AVHRR 各通道的探测值，图 3 反映了其第 1~4 通道的统计直方图。

利用第 4, 2, 1 通道分别赋予红、绿、蓝色合成遥感彩色数字图像后，经过查找表变换，即可得到增强后的沙尘暴空间分布格局，增强后的遥感图像中沙尘区边界清晰，与云和下垫面形成了鲜明的对比。

2.2 沙尘信息的提取及其密度分割

在 ERDAS 软件的支持下，利用沙尘暴信息提取模型，将沙尘信息从 NOAA/AVHRR 遥感数据中提取了出来。通过对比分析，发现计算结果与增强的沙尘暴图像吻合程度非常高，只有少量的低云仍未去除，

表 1 I_{GV} 指数地表类型混淆情况

Table 1 Confusion of I_{GV} index of land surface objects

I_{GV}	包含类型	单一性
0~87	海面、水体	单一
88~92	海面上沙尘区及海岸、河流处盐碱化土地	混淆
93~96	海面沙尘区、云、裸地或低植被覆盖区域	严重混淆
97~106	沙尘区、陆地、云	严重混淆
107~200	植被覆盖相对较高区域	单一

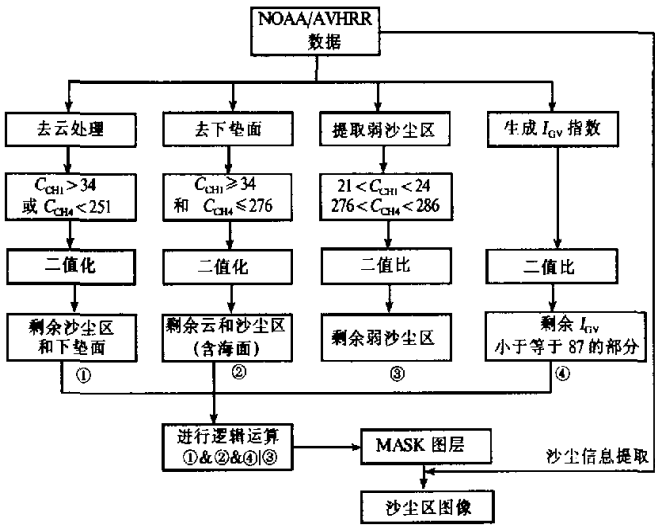


图 2 沙尘暴信息提取模型

Fig.2 Model of extracting dust-storm information

这可以通过沙尘区与低云纹理特征上的差异,判断出低云的位置,由此,在最终的成果图中消去这部分图斑。

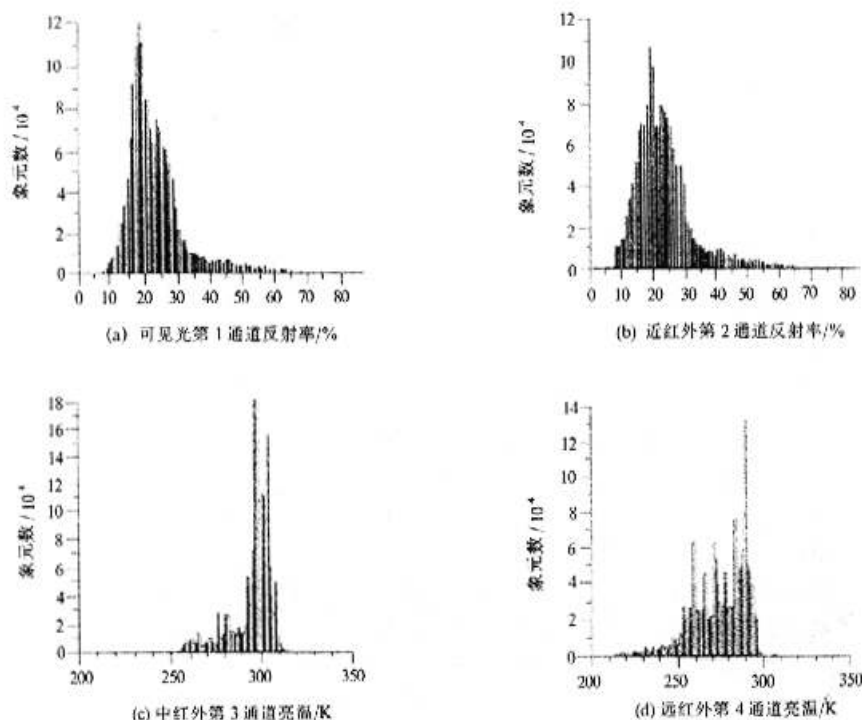


图 3 NOAA/AVHRR 图像第 1, 2, 3, 4 通道直方图

Fig.3 Histogram for channel 1, 2, 3, 4 of NOAA/AVHRR

注: L, S 和 C 处分别是下垫面, 沙尘区和云的遥感数值集中区域

提取出的沙尘信息在空间分布上有两个特点。一方面它表明了沙尘暴的空间分布范围, 另一方面还蕴涵着沙尘暴强弱分布的空间格局。当沙尘暴发生时, 随着沙尘密度的增大, 辐射亮温将减小, 进而导致遥感数据的辐射特性发生变化。据此, 本文提出了沙尘信息密度分割的一种方法, 即根据沙尘信息在远红外波段的辐射亮温值大小, 将沙尘信息划分为不同的密度等级。

为了提高沙尘信息密度分割的精度, 在分割过程中, 可以首先将沙尘信息分成多个等级; 然后再参考地面观测数据进行类型合并。本文将提取出的沙尘信息最终划分为 3 个等级 (如图 4)。图像中沙尘高密度区位于沙尘暴的中心, 低密度区位于沙尘暴的外环; 高密度区是沙尘暴系统强度和沙尘物质积聚的中心, 中密度区次之, 低密度区相对最弱。将这一结果与二连浩特至兴和县的 7 个地面气象站观测的瞬时风速和能见度两项指标进行对比, 发现二者吻合程度比较高。从而

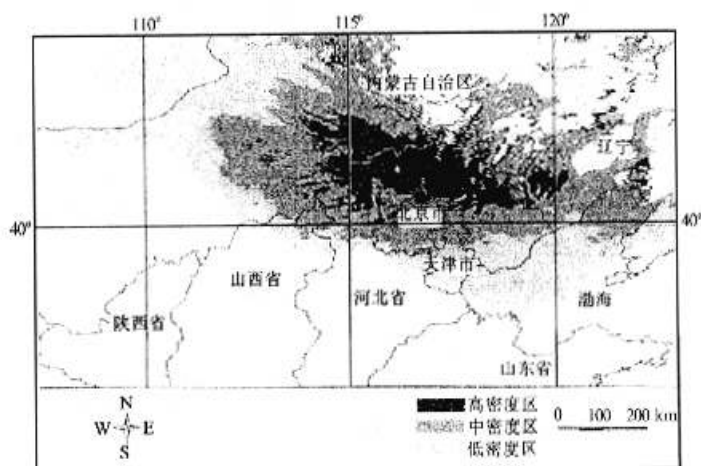


图 4 沙尘密度分布

Fig.4 Distribution of dust-storm density

说明根据远红外波段的辐射亮温, 对沙尘信息进行密度分割这一方法是可行的。

3 结论与讨论

(1) 利用 NOAA/AVHRR 数据大范围监测沙尘暴强度是可行的。应用这一方法大大增强了对沙尘暴强度监测的效果。同时可以监测到某一时刻沙尘的空间分布格局, 并进一步分析沙尘的沙源、空间密度、输送方向及预计降尘区域, 基于 GIS 技术可以确定灾害影响的区域。利用对多时次遥感数据的沙尘区域提取, 可以实现沙尘暴天气的动态监测, 进而结合地面连续的实测数据和气候背景, 还可以进行业务化预报。

(2) 在沙尘暴监测中, 利用 NOAA/AVHRR 的可见光、近红外和远红外通道效果比较好。但在下垫面植被盖度较低的情况下, 利用植被指数辅助沙尘信息的提取效果不理想。利用远红外波段的亮温对沙尘区沙尘强度进行密度分割, 可以达到满意的效果。云层覆盖仍然是影响沙尘暴遥感监测的主要制约因素。

(3) 对沙尘暴进行监测, 除了监测其空间分布和强度外, 另一重要的问题是监测地面物质的裸露程度。由于风沙活动与地表物质组成结构、植被盖度以及地表土壤含水量等有着密切的关系, 因此, 借助遥感技术, 进一步开展对裸沙裸土区域的测量, 可以推动对沙尘暴监测的技术改进, 进而发展具有高精度的沙尘暴预警系统。

参考文献:

- [1] 史培军, 张宏, 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.
- [2] 史培军, 严平, 等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 71-77.
- [3] 叶笃正, 丑纪范, 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.
- [4] 高尚玉, 史培军, 等. 我国北方风沙灾害加剧的成因及发展趋势[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 31-37.
- [5] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 105-106.
- [6] 方宗义, 朱福康, 等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 1-6.
- [7] Shao Yaping. Physics and modeling of wind erosion[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 135-136.
- [8] 魏丽, 沈志宝. 大气沙尘辐射特性的卫星观测[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 347-355.
- [9] Zhou M Y, Chen Y, et al. Effects of two dust storms on solar radiation in the Beijing Tianjin area[J]. Geophys Res Lett, 1994, 21: 2697-2700.
- [10] Kubilay N, et al. An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the east Mediterranean[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 1293-1303.
- [11] 钱云, 符淦斌, 等. 沙尘气溶胶与气候变化[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 391-394.