

沙尘发生期遥感反演地表温度与 实测沙尘数据之间的比较分析*

韩秀珍 董超华 马 岚
罗敬宁 李亚军 张晓虎

(中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要 以2002年3月份沙尘天气为例, 用卫星遥感反演地表温度(LST)时间变化趋势与同一地区野外观测站点接收的沙尘干物质含量/人体可吸入物质含量(TSP/PM₁₀)数据的时间变化趋势进行对比分析, 两者有较好的对应关系。卫星观测的时间分辨率高、范围广, 所提供的地表相关信息可为沙尘源头的治理及减轻或减少沙尘天气发生提供基础数据, 也为沙尘暴预测提供了重要的科学依据。

关键词: 沙尘暴; 遥感反演; 地表温度

文章编号 1006-9585 (2004) 01-0034-09 **中图分类号** P407 **文献标识码** A

1 引言

东亚沙尘暴已成为一种国际环境事件。例如, 2002年春季沙尘暴较多。一次规模较大的沙尘暴过程, 沙尘可以从蒙古国和我国西部沙源地输送到韩国、日本乃至夏威夷、美国西海岸等地。对农业生产、城市交通和城市生活造成严重的危害。东亚沙尘暴已经在国际上引起了广泛关注。

近年来, 许多专家从大气物理、气象、环境和遥感等不同领域广泛开展了对沙尘天气机理、数值模拟及预测等方面的研究工作^[1~5]。无疑沙尘产生的主要机理在于风力侵蚀, 沙尘暴天气的发生、发展就是一次强烈的风蚀过程。风蚀模型包括大气、地表状况、风蚀、传输和沉积及地理信息系统GIS等几个部分^[6~10]。地表状况中物理模型应包括: 地表温度、土壤水分、地表能量变化等。

地表温度在地气之间的物质、能量和动量交换过程中是一个非常重要的物理参数。沙尘暴发生、传输过程中沙源区的地表温度也会发生相应的变化, 这些变化对沙尘暴的产生能够起到抑制或促进的作用。同时, 地表温度又可以作为参量之一用于数值预报模式进行沙尘暴预测。因此, 研究地表温度的变化将为沙尘源头治理及减轻或减少沙尘天气发生提供基础数据, 也为沙尘暴预测提供了重要的科学依据。

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 数据准备与处理

2.1 数据预处理

中国北部 2002 年 3 月 15~26 日的 AVHRR/NOAA-16 数据的处理包括：地理定位、辐射定标、几何精校正、太阳高度角校正、大气校正和晴空云检测等；投影为等积经纬度投影。

(1) 卫星下午过境 3~4 条轨道经辐射定标、地理定位后生成 1A5 或 1B 数据。

(2) 对每条轨道按照分区域等经纬度数据投影，并做太阳高度角订正和大气削弱订正。用 6S 软件对大气散射、水汽和气溶胶等进行大气影响的订正。

(3) 对每一个局地文件做几何精校正。根据图像偏移和扭曲程度，选择图像平移或多项式几何校正。

(4) 晴空云检测。按照地理底图的投影设置，投影生成选定范围的卫星影像图。对卫星影像图进行云检测，并挑选出晴空数据叠加到地理底图上，生成叠加图。

2.2 工作流程图

遥感反演地表温度信息，地面实测数据标准化处理，之后进行二者之间的相关性分析。工作流程如图 1 所示。

2.3 沙尘干物质含量/人体可吸入物质含量 (TSP/PM10) 地表实测数据分析

为验证遥感反演地表温度的准确性，本文选用了 2002 年中日亚洲沙尘暴项目 (ADEC) 中相关的观测数据。2001 年开始，ADEC 项目在中国的新疆、甘肃、陕西、内蒙古、北京、青岛及韩国和日本布设了 46 个野外观测站点，观测仪器有雷达气溶胶探测仪、沙尘颗粒收集仪、风速测量仪。本项目结合利用卫星监测资料，对起沙、输送和沉降开展了实时监测和测量。通过监测获得地面风速、TSP/PM10 (沙尘干物质含量/人体可吸入物质含量) 及地表温度等实测数据。图 2 是中日 ADEC 项目部分测量站点分布和部分测量数据 (以直方图表示)。通常沙尘暴事件前后及发生过程中 TSP/PM10 值在空间上的分布是不均匀的，但是在 3 月 17 日和 20 日 5 个站点的 TSP/PM10 值很高，3 月 17 日和 20 日在北京和兰州等地恰好是发生沙尘暴的时间。

3 地表温度的反演方法

在实际地表温度研究中，用气象站点的观测资料研究地表温度的分布，常常由于气象站点空间分布的不均匀，而引起误差。从目前气象站点的分布情况来看，为东密西疏，有些地区如青藏高原，监测站点稀少，难以反映青藏高原地区的温度分布状况。应用卫星遥感资料可以大面积地定量反演陆面温度弥补这一不足。分裂窗反演方法已取得了很大进展^[11,12]，主要是依据普朗克黑体辐射定律，利用 AVHRR/NOAA 数据，做出一些合理假设，简化反演中大气和地表的比辐射率影响，得到反演的陆地表面温度。与实地测量相比，误差约在 2℃^[13]。由于大气影响和陆面比辐射率在不同地区差异较大，不同季节也有差异，地表的比辐射率与像元的等效比辐射率又有差异，导致反演的陆面温度有时误差较大。

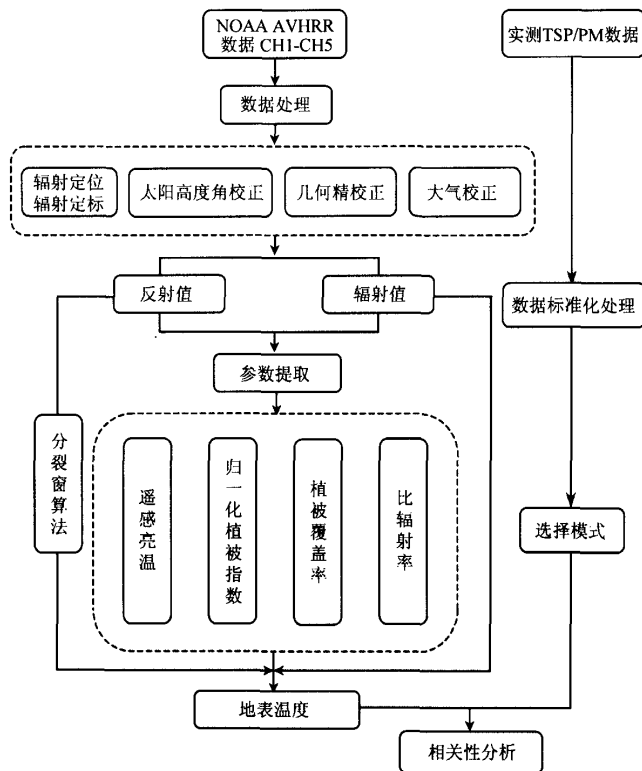


图1 地表温度提取工作流程图

我们依据依赖于光谱辐射率的分裂窗算法，用植被覆盖法确定比辐射率^[14]，而用文献^[12]的算法反演地表温度。

3.1 植被覆盖率 P_v 的确定

在土地覆盖分类的基础上，选择植被覆盖率估算亚像元模型^[15~17]。将荒漠区、水体、冻土带、永久性积雪的植被覆盖度赋值为零；对林地、城镇用地采用等密度模型；对于农业用地、草地采用非密度模型进行估算。对其中叶面积指数 (I_{LA}) 计算，则采用 Goward 和 Huemmrich^[18] 的模型。

3.1.1 等密度模型 (Dense vegetation model)

假设像元中植被类型较为单一，且植被足够高，即： $I_{LA} \rightarrow \infty$ ，对应的 $I_{NDV,g} \rightarrow I_{NDV,\infty}$ ，于是有

$$P_v = \frac{I_{NDV} - I_{NDV,0}}{I_{NDV,\infty} - I_{NDV,0}} \quad (1)$$

其中， P_v 为植被覆盖率， I_{NDV} 为植被指数， $I_{NDV,0}$ 、 $I_{NDV,\infty}$ 分别表示图像上（除去水体后的陆地表面） I_{NDV} 的最小值和最大值。

3.1.2 非密度模型 (Nondense vegetation model)

与等密度模型相似，该模型也假设像元中植被类型较为单一，但此时的植被垂直

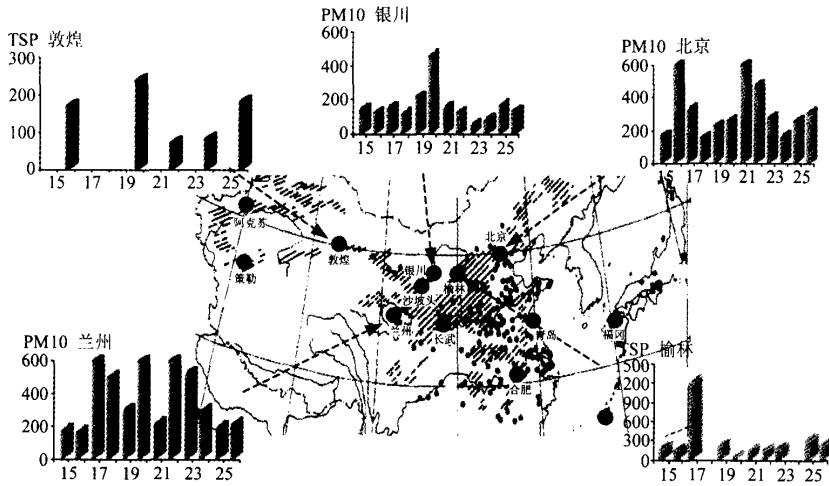


图2 中日 ADEC 部分沙尘观测站点分布及部分测量数据

5 个柱状直方图分别表示敦煌、银川、北京、兰州和榆林站点实时监测的 TSP/PM 数据，

横坐标表示日期，即 3 月 15~26 日，纵坐标表示 TSP/PM10 含量，单位 $\mu\text{g m}^{-3}$

密度较小，即： $I_{LA} \ll \infty$ 。因而，(1) 式中植被覆盖部分的 $I_{NDV,\infty}$ 应加以订正，记为 $I_{NDV,g}$ ，于是有

$$P_v = \frac{I_{NDV} - I_{NDV,0}}{I_{NDV,g} - I_{NDV,0}} \quad (2)$$

$$I_{NDV,g} = I_{NDV,\infty} - (I_{NDV,\infty} - I_{NDV,0})\exp(-kI_{LA}), \quad (3)$$

其中， k 为消光系数， $0.8 < k < 1.3$ ，本文 k 值取 1。

从公式 (3) 可以看出，非密度模型中植被覆盖率的计算比等密度模型复杂，需要确定多种参数，如消光系数 k 和叶面指数 I_{LA} 等，而 I_{LA} 则可采用 Goward 和 Huemrich^[18] 的模型来确定。

3.2 比辐射率的确定

比辐射率 ϵ 的计算方法分以下 3 种情况^[19]：

(1) $I_{NDV} < 0.2$, $P_v = 0$ ：此时地表为裸土或稀疏植被，植被覆盖率几乎为零，有

$$\epsilon = 0.980 - 0.042\rho_1, \quad \Delta\epsilon = -0.003 - 0.029\rho_2, \quad (4)$$

其中， ρ_1 和 ρ_2 分别表示 AVHRR/NOAA 波段 1 和波段 2 的反射率， $\Delta\epsilon$ 为 AVHRR/NOAA 波段 4 和波段 5 比辐射率之差。

(2) $0.2 \leq I_{NDV} \leq 0.5$, $0 < P_v < 1$ ：此时，像元尺度的随机粗糙面，植被与裸土混合，植被覆盖率不为零，有

$$\begin{cases} \epsilon_4 = 0.968 + 0.021P_v, \\ \epsilon_5 = 0.974 + 0.015P_v, \\ \epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2 = 0.971 + 0.018P_v, \\ \Delta\epsilon = (\epsilon_4 - \epsilon_5) = -0.006(1 - P_v), \end{cases} \quad (5)$$

其中， ϵ_4 和 ϵ_5 分别表示 AVHRR/NOAA 波段 4 和波段 5 的比辐射率。

(3) $I_{NDV} > 0.5$, $P_v = 1$: 此时地表完全被植被覆盖, 植被覆盖率近似为 1 时, 有

$$\begin{cases} \epsilon_4 = \epsilon_5 = 0.985, \\ \epsilon = \epsilon_4 = \epsilon_5 = 0.985, \\ \Delta\epsilon = 0. \end{cases} \quad (6)$$

3.3 计算地表温度

用 Becker 和 Li^[12] 的公式计算地表温度 (LST):

$$T_{LS} = 1.274 + \left[\frac{T_4 + T_5}{2} (1 + 0.1561\epsilon_{b1} - 0.482\epsilon_{b2}) + \frac{T_4 + T_5}{2} (6.26 + 3.98\epsilon_{b1} + 38.33\epsilon_{b2}) \right] \quad (7)$$

其中, $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$, $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$; $\epsilon_{b1} = (1 - \epsilon)/\epsilon$, $\epsilon_{b2} = \Delta\epsilon/\epsilon^2$; T_4 和 T_5 分别表示 AVHRR/NOAA 波段 4 和波段 5 的亮温 (单位: K)。

按照上述方法对 2002 年春季 AVHRR/NOAA16 遥感数据进行处理, 最后得到地表温度值。

4 地面监测数据与遥感数据综合分析

4.1 研究区样点选择

一般我国北方沙尘源地可分为: 新疆塔里木盆地及周边地区; 河西走廊及阿拉善高原; 蒙陕宁长城沿线; 乌盟后山及浑善达克沙地; 科尔沁沙地; 蒙古国南部戈壁沙漠 (如图 3)。

根据沙尘暴的特点及沙尘影响范围, 在研究区域内我们选择了与地面实测数据相应的 3 个样区, 即兰州、科尔沁沙地和呼和浩特地区。每个样区分别采 5 个样点。采样时既要保证每一个样地的 5 个样点都在同一地表分类上, 又要尽量避开被沙尘或云污染的像元, 因此, 将研究区土地利用/覆盖数据与反演所得的 LST 数值图像叠加, 以便满足采样条件。



图 3 我国主要沙地 (漠) 分布

将2002年3月15~26日每一天的LST数值都按照此标准进行选点,并按照时间序列将同一位置的点做成趋势曲线,再将同一样区的点放在同一个坐标系内(图4左)。图4右边为研究区3个样区的TSP/PM10地表实测数据趋势曲线。

4.2 遥感数据反演结果与地面实测数据综合分析

为便于说明,我们将2002年3月卫星和地面气象站监测到的沙尘天气过程列于表1。

表1 2002年3月我国出现的主要沙尘天气过程(卫星和地面气象站观测)

序号	起止时间	过程类型	主要影响系统	扬沙和沙尘暴影响的范围
1	15~17日	沙尘暴	蒙古气旋冷锋	西北东部和华北地区
2	18~22日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	西北、华北、东北、黄淮及汉水流域
3	24~25日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	南疆盆地、内蒙的部分地区及东北地区

由表1可知3月15~25日11天中发生了3次沙尘暴和强沙尘暴,第2次和第3次之间仅隔一天时间,影响范围相当广阔。

对比分析图4左、右及表1中2002年沙尘天气过程可得如下结论:

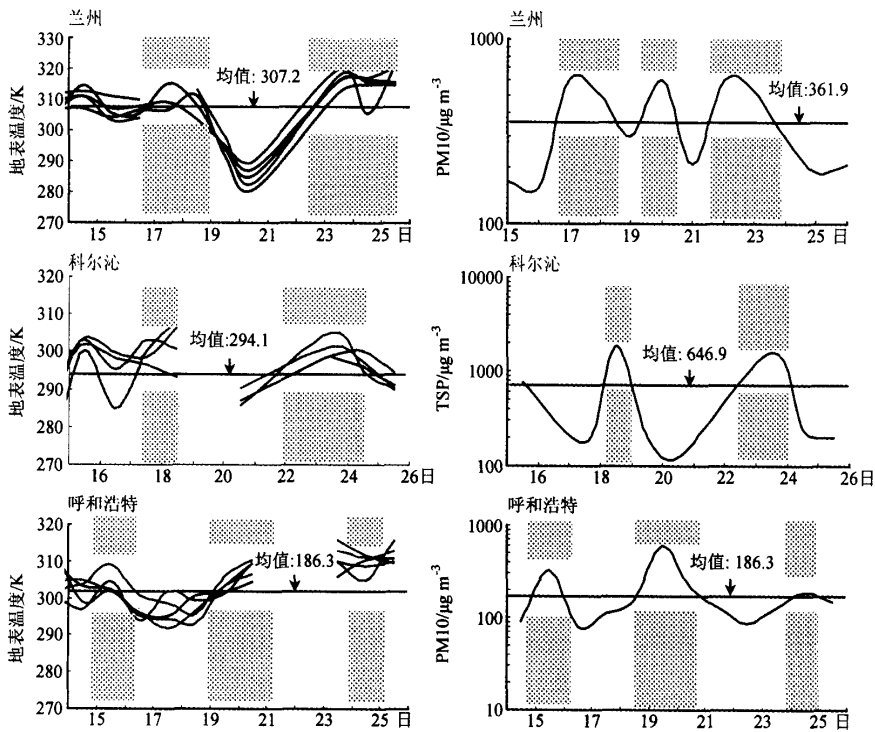


图4 2002年3月15~26日遥感反演地表温度与实测TSP/PM对比变化曲线

左图:LST时序趋势,其中5条曲线代表同一样区5个不同位置的地表温度时序变化,中图(库尔沁)一条曲线取点为噪声点,未画出;右图:三个样区的TSP/PM地表实测数据趋势,图中阴影为地面观测到的TSP/PM高值区和卫星反演的LST高值区

发生沙尘事件时 TSP/PM10 的值都很高，且高于均值，反之低于均值。这一变化过程与表 1 中列出的沙尘天气过程基本一致。当有沙尘事件发生时 LST 值都高于均值，处于波峰状态，反之低于均值。

图 4 左中科尔沁地区的 LST 的时序变化趋势曲线不连续，中间断开的位置是由于被采样图像（3 月 20 日）像元污染得很严重，无法保证在相同地类及邻近地区采集到不被遮盖的像元，因此这一天没有采样点。对比图 4 左和右可以看出，用 NOAA16 反演的 LST 与地表实测 TSP/PM10 数据有较好的对应关系。

综上所述，遥感与地面实时观测可以同时沙尘暴事件进行监测。但地面观测 TSP/PM10 数据存在空间上的不均匀性，不同站点的 TSP/PM10 值是不同的，然而其变化趋势是一致的。即发生沙尘暴时，不同站点的地表实测 TSP/PM10 值都较高；沙尘源区及下游区域的气溶胶分布也会受到沙尘暴事件的影响，有沙尘的天气气溶胶总沙尘颗粒物质量浓度较高，反之较低；LST 的值在有沙尘暴的时间也较高，高于均值，与相同地区野外观测站点观测的 TSP/PM10 数据的变化趋势一致。这说明卫星遥感监测的 LST 与地面测量的 TSP/PM10 对沙尘暴的监测结果是一致的。

4.3 LST 遥感反演结果与地面 TSP/PM10 采样曲线相关性分析

进一步对 LST 遥感反演结果与地面 TSP/PM10 采样曲线进行相关性分析。将不同地类的 LST 数据与 TSP/PM10 数据汇总，选取典型地物的 LST 时序变化与 TSP/PM10 数据对比分析其相关性。分别选取兰州、科尔沁，呼和浩特的 LST 时序变化数据列表（表 2）。

表 2 TSP/PM 和 LST 相关性分析

日期	兰州		科尔沁		呼和浩特	
	LST/K	PM10/ $\mu\text{g m}^{-3}$	LST/K	TSP/ $\mu\text{g m}^{-3}$	LST/K	PM10/ $\mu\text{g m}^{-3}$
3 月 15 日	310.39	168			301.49	88
3 月 16 日	306.20	156	297.80	760.46	301.10	324
3 月 17 日	306.76	600			296.41	78
3 月 18 日	310.31	499	301.20	177.57	301.53	114
3 月 19 日	309.06	298	302.10	1869.69	303.27	152
3 月 20 日	294.43	600	280.30	198.95	293.03	600
3 月 21 日	285.36	208	285.95	127.73	293.91	206
3 月 24 日	316.49	292	294.41	1608.12	310.81	128
3 月 25 日	313.89	190	291.38	237.50	305.74	184
3 月 26 日	317.63	208	299.63	195.81	311.75	148
相关系数	0.70681		0.883155		0.80017	

表 2 中的兰州 LST 是兰州 5 个样点 LST 的平均值，科尔沁、呼和浩特类似。分析 TSP/PM10 与不同类地表 LST 的相关性，其相关关系公式为

$$r_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i g_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2}}, \tag{8}$$

公式中, r_{fg} 为相关系数, f_i 表示 f 数组中的第 i 个值, g_i 表示 g 数组中的第 i 个值。将表 2 中的 TSP/PM10 列看成是 f 数组, 将兰州、科尔沁和呼和浩特 LST 列分别看成是 g 数组, 分别求相关系数。求得 TSP/PM10 与兰州 LST 的相关系数 $r_1=0.70681$, 与科尔沁 LST 的相关系数 $r_2=0.883155$, 与呼和浩特 LST 的相关系数 $r_3=0.80017$ 。

由此可知, 在研究区域内, 遥感反演的 LST 数据与 TSP/PM10 数据大致有相同的变化趋势, 具有较好的相关性。

5 结论

综上所述, 基于地表覆盖的 LST 及其典型地区兰州、科尔沁、呼和浩特采样数据的曲线与 TSP/PM10 曲线综合对比分析, 具有较好的相关性。

地面观测 TSP/PM10 数据存在空间上的不均匀性, 不同的站点 TSP/PM10 值是不同的, 但其变化趋势是一致的: 发生沙尘暴时, 不同站点的地表实测 TSP/PM10 值都较高; 反之则较低。遥感监测 LST 可以作为沙尘暴的预警预报及防治的空间信息源之一。

致 谢 本研究得到了中国科学院遥感应用研究所马建文研究员、国家卫星气象中心方宗义研究员和杨忠东研究员的热情指导和帮助, 中国科学院地球环境研究所张小曳研究员提供了部分地面实测数据, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Mikami Masao, Observation for the parameterization of dust outbreak used in the wind erosion sub-model, Proceedings of Program for the First ADEC Workshop, Japan and China Joint Project on Aeolian Dust Experiment on Climate Impact, Tokyo, Japan, 2002, 17~18.
- 2 Shao Yaping, Yang Yan, and Wang Jianjie et al., Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation, *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D22), 4691~4708.
- 3 方宗义、王伟, 2002 年我国沙尘暴的若干特征分析, *应用气象学报*, 2003, **14** (5), 513~521.
- 4 郑新江、罗敬宁、陆文杰等, 气象卫星遥感监测沙尘暴的研究, *自然灾害学报*, 2002, **11** (4), 210~216.
- 5 陆均天、邹旭恺、王锦贵等, 近 3 年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析, *气候与环境研究*, 2003, **8** (1), 107~114.
- 6 Westphal, D. L., O. B Toon., and T. N. Carson, A case study of mobilization and transport of Saharan dust, *J. Atmos. Sci.* 1988, **45**, 2145~2175.
- 7 Joussaume, S., Three-dimensional simulation of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**, 1909~1941.
- 8 Shao, Y., and L. M. Leslie, Wind erosion prediction over the Australian continent, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 30091~30105.
- 9 Lu, H. and Y. Shao, Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications, *Environ. Modeling & Software*, 2001, **16**, 233~249.
- 10 Breast, C. L., and S. N. Goward, Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data, *Int. J. Remote Sensing*, 1987, **8** (3), 351~367.
- 11 Price, J. C., Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7 AVHRR, *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**, 7231~7237.

- 12 Becker, F., and Z. L. Li, Towards a local split window method over land surface, *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**, 369~393.
- 13 Gupta, R. K., S. Prasad, M. V. R. Sesha sai, and T. S. Viswanadham, The estimation of surface temperature over an agricultural area in the state of Haryana and Panjab, India, and its relation with the normalized difference vegetation index (NDVI), using NOAA-AVHRR Data, *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**, 3729~3741.
- 14 Valor, E., and V. Caselles, Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas, *Remote Sens. Environment*, 1996, **57**, 167~184.
- 15 Quarmby, N. A., J. R. G. Townshend, J. J. Settle et al., Linear mixture modeling applied to AVHRR data for crop area estimation, *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13** (3), 415~425.
- 16 Gutman, G. and A. Ignatov, The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models, *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19** (8), 1533~1543.
- 17 陈晋、陈云浩、何春阳等, 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用, *遥感学报*, 2001, **5** (6), 416~423.
- 18 Goward, S. N., and K. F. Huemmrich, Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index; an assessment using the SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, 1992, **39**, 119~140.
- 19 Sobrino, J. A., Rassouni, and Z. L. Li, A comparative study of land surface emissivity retrieved from NOAA data, *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75** (1), 256~266.

Analysis and Comparison of AVHRR Land Surface Temperature in the Dust Storm Weather with TSP/PM10 Data

Han Xiuzhen, Dong Chaohua, Ma Lan, Luo Jingning,
Li Yajun, and Zhang Xiaohu

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract In spring of 2002, several dust storms occurred in the northern China, which brought difficulty to people's life and production, and attracted the attention of many Asian countries. This work compared the trend of AVHRR LST temporal change with that of TSP data in March 2002. Corresponding relation was found between the two. The conclusion is that spacecraft observation provides an important data source for dust storm study.

Key word: dust storm; remote sensing retrieval; land surface temperature