

大气污染定量遥感方法及其在长江三角洲的应用*

邓孺孺^{1,2)} 田国良¹⁾ 王雪梅²⁾ 陈晓翔²⁾

(¹⁾中国科学院遥感应用研究所, 遥感信息科学重点实验室, 北京, 100101; ²⁾中山大学地环学院, 广东, 广州, 510275)

摘要 分析了人为气溶胶的光学特性和卫星遥感象元信息构成的物理机制, 并对象元信息概化为土壤、植被、水分等基本信息组分和污染气溶胶信息按一定方式的非线性集合. 采用多波段卫星遥感数据, 建立象元信息组合联立方程组进行象元信息分解, 从 TM 卫星数据直接定量提取以象元为单元的区域大气人为气溶胶混浊度. 实验结果表明, 所提取的污染信息精度满足要求. 应用该方法对长江三角洲地区 1984 年和 1997 年的污染情况进行探测, 结果表明该地区污染范围和强度均在快速增长.

关键词 人为气溶胶, 大气污染, 遥感, 象元信息分解.

METHOD OF QUANTITATIVE REMOTE SENSING FOR AIR POLLUTION MONITORING AND ITS APPLICATION IN CHANGJIANG RIVER DELTA AREA *

DENG Ru-Ru^{1,2)} TIAN Guo-Liang¹⁾ WANG Xue-Mei²⁾ CHEN Xiao-Xiang²⁾

(¹⁾LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China;

²⁾School of Earth Environment, Xhongshan University, Guangdong, Guangzhou 510275, China)

Abstract Optical characteristics of synthetic aerosol and the information composition of pixel in remotely sensed data are analyzed. The information of every pixel can be generalized as the sum of soil, vegetation, and water or moisture with non-linear relationship. Then a group of equations based of multi-channel remote sensing data can be built to decompose the pixel information and quantitatively retrieve the synthetic aerosol turbidity using Landsat TM data. The results of experiment show that the accuracy of air pollution information retrieved satisfies the requirement. Applying this model, air pollution circumstances over the Changjiang River Delta area in 1984 and in 1997 were detected, respectively. The results indicated that the area and the intensity of air pollution over this region are increasing quickly.

Key words synthetic aerosol, air pollution, remote sensing, decomposition of pixel information.

引言

卫星遥感可在瞬间获取大区域地表和大气信息, 用于大气污染调查可以避免大气污染时空易变性所产生的误差, 并便于动态监测. 由于在遥感信息中, 大气污染信息是叠加于多变的地面信息之上的弱信息, 常规的信息提取方法均不适用, 多年来该方向的研究进展缓慢. 目前采用的方法主要有两类, 一类是根据污染地区地物反射率发生变化, 边界模糊的情况来对大气污染情况进行估计^[1,2]. 另一类是间接的方法, 如 Fujii Hisao, Iwashita Kiyoyuki 等^[3]根据树叶中 SO₂ 等污染物含量与遥感数据中植被指

数的关系估计大气污染的情况. 这些方法只能给出定性或间接的结果, 并在很大程度上具有不确定性.

大气污染主要是通过污染气体中的人为气溶胶发生的散射和吸收而在遥感数据中得到反映. 人为成因的气溶胶与大气污染在强度和分布范围上是紧密相关的. 从卫星数据中提取人为成因气溶胶信息需解决两方面的问题: 一是已知人为气溶胶(包括粉尘)的光学特性并能根据其路径散射光谱进行反演. 近 20 年来, 这方面的研究取得了很大进展^[4-12]. 另一个需要解决的问题是在遥感数据中将气溶胶散射信息从多变的地面信息中分离出来. 该问题一直未得到解决.

* 国家重大自然科学基金(批准号 49899270)和中科院知识创新工程领域前沿资助项目
稿件收到日期 2002 - 09 - 29, 修改稿收到日期 2002 - 12 - 02

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 49899270) and CAS Innovation program
Received 2002 - 09 - 29, revised 2002 - 12 - 02

本文在上述研究的基础之上,首先建立较简单实用的各类型人为成因气溶胶后向散射模型,然后根据光谱特性将地物概化为数种基本组分,建立各组分之间及与大气光谱之间的合成模型并用多波段数据进行求解.将人为成因气溶胶信息从地物信息中分解出来,得到较高分辨率的人为气溶胶混浊度及其空间分布结果.

1 人为气溶胶的光学特征及其数值模拟

本文的目的是遥感大气污染状况,文中的人为气溶胶(synthetic aerosol)专指对对流层中由于人为因素产生的煤烟、沙尘和 SO_2 、 NO_x 分子等转化而成的水溶性粒子.自然成因的气溶胶和上升到平流层的人为成因气溶胶在水平方向上变化缓慢,在数十公里尺度上可认为是不变的,可当作背景气溶胶,其影响可在大气纠正中消除.研究表明,人为成因气溶胶由煤烟、水溶性粒子和沙尘3种成因及特征不同的粒子组成.每一种污染类型的气溶胶一般均包含这3种基本类型,但不同污染类型三者的含量不同,造成了不同污染区气溶胶总特征的差异.由于粒度和折射率等特征不同,3种基本气溶胶类型对阳光的吸收和散射各有差异.在遥感使用的大气窗口波段,对散射起决定性影响的是粒度分布.在可见光-近红外波段,水溶性粒子和煤烟尺度参数均 < 0.1 ,其散射以瑞利散射为主,短波部分的散射率远大于长波部分.沙尘性粒子则由于粒度较粗,以米氏散射为主,虽短波部分的散射率仍大于长波部分,但较之水溶性粒子和煤烟,其散射率随波长变化曲线的曲率大为减小.根据我们对北京市典型污染类型的散射特征对空测量实验验证,人为气溶胶的光学厚度可用下式表示^[13]:

$$\tau_a = (\beta_1 + \beta_2)\lambda^{-3.8} + \beta_3\lambda^{-1.5}. \quad (1)$$

式(3)中, β_1 、 β_2 、 β_3 分别为煤烟、水溶性粒子和沙尘3种基本气溶胶的混浊度.

气溶胶光学厚度取决于大气中气溶胶的数量、路径散射率和吸收率,与路径散射强度存在一定的函数关系.根据 Yoram J. Kaufman 等的工作^[12]气溶胶路径散射与光学厚度的经验公式可表示为

$$\omega_d = 0.169\tau_a - 0.041\tau_a^2. \quad (2)$$

ω_d 为气溶胶下行散射率.上行路径散射率 ω_u 与下行散射率的关系为^[12]

$$\omega_u = 0.526\omega_d - 0.0058. \quad (3)$$

由式(2)和(3)可以得到气溶胶上行路径散射与光学厚度的经验公式.

2 地物的光谱组成与分解

在遥感数据中,各个象元对应地面上一定面积的地物.这些地物通常是由若干基本成分组成,如土壤、植被、水分等.象元光谱实际上是各基本地物成分光谱按一定方式的组合.基于遥感光谱组成分析, John B. Adam 等, Ito 和 Fujimurl 提出了象元分解分类法.该类方法虽在土地利用分类等方面获得了较大成功,但模型将各端元元素光谱与象元光谱之间的关系以简单的线性关系处理,对土壤水分影响、植被多次散射等重要因素未能加以有效考虑,限制了模型的精度.为成功提取出大气污染信息,需要建立更精确的遥感象元信息分解模型.

根据光谱的稳定性、独立性和代表性,我们将地物划分为:土壤(包括岩石)、植被、水体、土壤水分和水泥建筑物等基本组份^[13,14].其理论模型和实验验证见文献[13]和[14].

根据实验^[14],一定湿度土壤的反射率可表示为

$$R_s = R_{s0}e^{-\alpha_{ws}V_{ws}}. \quad (4)$$

R_s —含水土壤反射率, R_{s0} —干土壤反射率, V_{ws} —土壤体积含水量, α_{ws} —水份吸收系数,为稳定参数可通过实验测出.

植被的光谱合成方式较为复杂,其原因是植物冠层是由许多分散且半透明的叶子组成,象元的反射光包括了叶子的散射、多次散射和下覆土壤的反射光.目前已有为数众多的植被冠层模型用以计算植被覆盖区反射光谱,每种模型各有优劣,但都较为复杂.我们采用 Hapke 的物理模型,并在其基础上进行了改进. Hapke 提出的物理模型较为简单,且每个参数均具有明确的物理意义,但该模型只考虑一次散射,所以精度不高.我们在其基础上考虑了多次散射的影响,使精度大为提高.模拟计算表明,当叶面积指数(LAI) > 3 时,前3次散射光的强度占总反射光的98%以上,一般情况下(LAI < 1),前3次散射光的强度大约占总反射光的99%.所以只需考虑前3次散射即可保证精度.植被冠层的反射率 R_p 为^[14]

$$R_p \approx E_1 + E_2 + E_3. \quad (5)$$

式(7)中 E_1 为叶丛的直接散射率, E_2 和 E_3 分别为冠层的第二、三次散射率.

设叶子为朗伯体,且叶子的方向为均匀分布,则有

$$E_1(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2) = \frac{R_l P(g)}{\kappa_1 \mu_2 + \kappa_2 \mu_1} [1 - e^{-(\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2}{\mu_2}) L}]. \quad (6)$$

式(8)中: $R_i = \frac{\rho_i}{2}$, ρ_i 为叶子上面的反射率; 令 $k_1(z) = \langle \cos\Theta_1 \rangle_z$, $k_2(z) = \langle \cos\Theta_2 \rangle_z$, Θ_1 、 Θ_2 分别为叶面倾角与入射方向和观测方向的夹角. κ_1 、 κ_2 分别为 $\kappa_1(z)$ 和 $\kappa_2(z)$ 的平均值, $P(g)$ 为散射相函数. κ_1 、 κ_2 和 $P(g)$ 取决于叶子角度分布, 可根据叶倾角分布函数导出

$$E_2 = \frac{R_i^2}{2} [1 - e^{-2L} - 2Le^{-2L}], \quad (7)$$

$$E_3 = \frac{R_i^3}{8} [5 - e^{-2L}(4 + 12L + 8L^2) - e^{-4L}]. \quad (8)$$

透过冠层的土壤反射光对反射率的贡献为

$$R'_s = \left(T_p(\theta_1) + \frac{T_p(\theta_0)R_s R_p(\theta_0)}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \right) T_p(\theta_0) R_s. \quad (9)$$

$T_p(\theta_1)$ 、 $T_p(\theta_0)$ 分别为冠层在入射方向和垂直方向上的透过率:

$$T_p(\theta_1) = e^{-\frac{\kappa_1}{\mu_1}} + R_i L e^{-L} + R_i^2 \left(\frac{1}{4} e^{-3L} - \frac{1}{4} e^{-L} + L e^{-L} + \frac{1}{2} L^2 e^{-L} \right). \quad (10)$$

地表反射率为冠层反射和土壤反射的贡献之和:

$$R_g = R_p + R'_s.$$

当入射和观测方向已知, 干土反射率、水吸收率和单叶反射率等较稳定参数测定后, 象元反射率为植被叶面积指数 L 、土壤含水量 V_{ws} 和波长的函数, 故可写成:

$$R_g(\lambda, V_{ws}, L) = R_p(\lambda, L) + R'_s(\lambda, V_{ws}, L). \quad (11)$$

3 人为气溶胶和粉尘混浊度的遥感定量提取方法

3.1 卫星数据的象元光谱组成

在可见光和近红外波段, 卫星数据的象元光谱包括天空散射光和地表反射光两部分. 传感器接收到的反射光谱可写成:

$$I = [I_0(T_a T_m T_b)^u + I_m + I_{bd} + I_{ad}] R_g T_a T_m T_b + I_a + I_m + I_b.$$

I_0 为入射光强, R_g 为地面反射率, T_a 、 T_m 和 T_b 分别为人为气溶胶、大气分子和背景气溶胶的透过率; I_a 、 I_m 、 I_b 分别为人为气溶胶, 大气分子和背景气溶胶的上行散射光强. I_{ad} 、 I_{bd} 分别为人为气溶胶和背景气溶胶的下行散射光强. $u = 1/\cos\theta$, θ 为太阳天顶角. 上式两边除以 I_0 并整理得:

$$R_g = \frac{R - \omega_a - \omega_m - \omega_b}{[I_0(T_a T_m T_b)^u + \omega_m + \omega_{bd} + \omega_{ad}] T_a T_m T_b}. \quad (12)$$

其中, R 为象元综合反射率, ω_a 、 ω_m 、 ω_b 分别为人为气溶胶, 大气分子和背景气溶胶的上行散射率, ω_{ad} 、 ω_{bd}

分别为人为气溶胶和背景气溶胶的下行散射率. T_m 、 ω_m 为常数. 背景气溶胶在数十公里的尺度内也可认为是水平均匀的, 其类型与所在的地理位置和季节有关, T_b 、 ω_b 、 ω_{bd} 计算已有大量的研究并已有较成熟的计算模型, 其中最著名的是 MORTAN. 将相邻无污染区的能见度输入 MORTAN 计算程式就可以计算出 T_b 、 ω_b 和 ω_{bd} . T_a 、 ω_a 和 ω_{ad} 取决于人为气溶胶的组成浓度. 其中 $T_a = \exp(-\tau_a)$, τ_a 与各类型污染气溶胶混浊度的关系和 ω_{ad} 、 ω_a 、 τ_a 的关系已分别由式(1)、(2)和(3)给出. 将式(1)、(2)、(4)和(5)等代入式(15)可得地面反射率与象元综合反射率 R 、气溶胶混浊度 $\beta_1 + \beta_2$ (下称 β_{1+2}) 和 β_3 的函数:

$$R_g(R, \beta_{1+2}, \beta_3) = \frac{R - \omega_a - \omega_m - \omega_b}{[I_0(T_a T_m T_b)^u + \omega_m + \omega_{bd} + \omega_{ad}] T_a T_m T_b}. \quad (13)$$

3.2 污染区人为气溶胶混浊度的计算

将式(11)代入式(12), 得:

$$R_g(\lambda, V_{ws}, L) = R_g(R, \beta_{1+2}, \beta_3). \quad (14)$$

除波长外, 该方程有 4 个未知数, 将 4 个波段的遥感数据 $R_1 \sim R_4$ 代入可得到由 4 个方程组成有唯一解的方程组:

$$\begin{cases} R_g(\lambda_1, \beta_{1+2}, \beta_3) = R_g(R_1, V_{ws}, L) \\ R_g(\lambda_2, \beta_{1+2}, \beta_3) = R_g(R_2, V_{ws}, L) \\ \dots\dots \\ R_g(\lambda_4, \beta_{1+2}, \beta_3) = R_g(R_4, V_{ws}, L). \end{cases} \quad (15)$$

解此方程组可以求得象元的 β_{1+2} 、 β_3 . 对每个象元进行相同的计算即可得到全区 β_{1+2} 、 β_3 的分布图像. 方程组的求解可采用数值逼近算法.

3.3 方法检验

3.3.1 北京市污染气溶胶 TM 卫星数据提取结果检验

检验采用 2001 年 7 月 6 日 Landsat7 的 TM1-4 波段数据. 卫星过境时在 6 个典型污染区进行同步或准同步的气溶胶地对空测量. 将用上述方法计算的人为气溶胶混浊度与地面观测数据进行对比检验. 图 1(见彩色插页 3)为市区东北部东直门至望京一带的结果图像. 图 1A(见彩色插页 3)为水溶性+煤烟型气溶胶混浊度 β_{1+2} 分布图, 图 1B(见彩色插页 3)为沙尘型气溶胶混浊度 β_3 分布图. 两类气溶胶混浊度的分布均与地物类型密切相关, 工厂、密集居民区以及公路交通线上是混浊度的高值区, 且均是由市区向市郊逐渐减小. 相比之下, 水溶性+煤烟型气溶胶混浊度, 分布较为均匀, 变化较为缓慢, 沙尘型气溶胶混浊度分布与公路等地物更为密切,

表 1 北京市气溶胶混浊度计算值与观测值误差对比

Table 1 comparison between calculation and measurement of aerosol turbidity in Beijing city

类 型	三元桥		亚运村		遥感所		前门		亦庄		首钢	
	β_3	β_{1+2+3}	β_3	β_{1+2+3}	β_3	β_{1+2+3}	β_3	β_{1+2+3}	β_3	β_{1+2+3}	β_3	β_{1+2+3}
计算值	0.702	0.715	0.171	0.182	0.171	0.182	0.594	0.605	0.082	0.089	1.324	0.340
测量值	0.778	0.782	0.176	0.178	0.129	0.153	0.53	0.56	0.129	0.153	1.222	1.22
绝对误差	-0.08	-0.07	-0.01	0.01	0.04	0.03	0.06	0.05	-0.05	-0.06	0.10	0.11
相对误差	-0.10	-0.09	-0.02	0.03	0.32	0.20	0.12	0.08	-0.37	-0.42	0.08	0.09

与实际规律相符。

表 1 是 6 个典型污染区人为气溶胶混浊度计算值与地面测量值的误差对比。除亦庄和遥感所 2 个点外,计算沙尘型气溶胶混浊度和总的气溶胶混浊度的相对误差均在 0.12 以内,其中有 3 个点的相对误差在 0.1 以内。所有观测点的绝对误差均 < 0.11。亦庄和遥感所 2 个点的相对误差稍大,分别为 0.42 和 0.32。考虑到地面观测数据与卫星过境并非完全同步,总体说来计算值已达较高精度,说明方法是有效的。

3.3.2 MODIS 卫星数据提取结果检验

检验地区为北京-天津-石家庄地区,遥感数据采用 2002 年 2 月 3 日的 MODIS 数据的 2~5 波段。卫星过境时,在地面用太阳光度计进行地基气溶胶的同步观测,并将遥感数据计算结果与地基观测结果进行对比。

图 2(见彩色插页 3)为用 MODIS 数据计算的气溶胶混浊度及其等值线图。图中混浊度用灰度值表示,灰度值越大表示混浊度越大。图中明显看出石家庄、北京和天津等几个大城市是混浊度的局部高值区。石家庄市周围由于工厂较多,污染最为严重,其次是北京市。在北京至石家庄的山前地带,工厂、居民地较为密集,并受太行山脉的阻挡,污染气溶胶聚集成带,与实际情况相符。表 2 是用 MODIS 数据计算的气溶胶混浊度值与太阳光度计观测值的误差对比。

表 2 北京-天津-石家庄地区气溶胶混浊度计算值与观测值误差对比

Table 2 comparisons between calculation and measurement of aerosol turbidity in Beijing-Tianjin-Shijiazhuang area

编号	观测值	计算值	绝对误差	相对误差	编号	观测值	计算值	绝对误差	相对误差
1	0.347	0.35	-0.003	-0.009	11	0.294	0.3	-0.06	-0.02
2	0.25	0.28	-0.03	-0.12	12	0.291	0.32	-0.029	-0.1
3	0.303	0.30	0.003	0.01	13	0.305	0.31	-0.005	-0.016
4	0.254	0.28	-0.026	-0.102	14	0.323	0.35	-0.027	-0.084
5	0.311	0.34	-0.029	-0.093	15	0.273	0.33	-0.057	-0.209
6	0.26	0.31	-0.05	-0.192	16	0.392	0.35	0.042	0.107
7	0.276	0.31	-0.034	-0.123	17	0.322	0.33	-0.008	0.025
8	0.334	0.35	-0.016	-0.048	18	0.327	0.35	-0.023	-0.07
9	0.29	0.32	-0.03	-0.103	19	0.316	0.34	-0.024	-0.076
10	0.318	0.33	-0.012	-0.038	20	0.297	0.33	-0.033	-0.111

(观测数据由中国气象科学研究院提供,观测仪器为太阳光度计)

比,最大绝对误差为 0.057,平均绝对误差为 0.02,最大相对误差为 20.9%,平均相对误差为 7%。

5 长江三角洲污染气溶胶分布及变化遥感监测

我们用上述方法采用 Landsat5,7 号卫星的 TM 数据计算了长江三角洲上海和苏(州)-(无)锡-常(州)地区 2 个时相的人为气溶胶混浊度,并进行对比分析。限于天气等成像条件的限制,我们只得到 5,8 和 10 月份的数据,但从城市污染的年周期变化看,秋季最轻,其次为夏季。苏-锡-常地区采用 1984 年 8 月 8 日和 1997 年 5 月 3 日的数据,均为夏季数据,可以进行对比;上海地区采用的是 1987 年 5 月 8 日和 1997 年 10 月 3 日的数据,在以下对比中 97 年的实际相对污染程度要比计算的略高。图 3(见彩色插页 4)为上海市区 2 个时相的人为气溶胶计算结果图像。图像中红色表示人为气溶胶混浊度,其亮度值与气溶胶混浊度成正比。从图上可以明显看到,上海市 97 年的人为气溶胶分布范围显著扩大。图 4(见彩色插页 4)为苏州市 2 个时相的人为气溶胶分布图像。97 年人为气溶胶的分布范围比 84 年增加了数倍,可以明显地看到,气溶胶高浓度区主要分布在大型工厂和主要公路交通线上。

将该区主要城市 2 个时相的污染区按人为气溶胶混浊度划分为 3 个等级,各等级分布面积及其变化统计见表 3。从该表 3 可以看到,各城市的人为气溶胶分布总面积(污染面积)均大幅度增长,上海市在 87 至 97 年间增加了 51%,苏州和无锡增加近一倍,常州达 171%。而且,在各浓度分布面积中,高浓度气溶胶分布面积增长最快,增幅均在 100% 以上,常州市增幅更近 3 倍。可见该地区大气污染在快速加剧。

6 讨论与结论

由于 TM 数据波段数的限制,目前只能将影响地物光谱的主要因素列为基本地物而忽略了一些次要的因素,如土壤中的含铁量、含碳量等,并对植物

表3 长江三角洲主要城市1984、1997年污染气溶胶面积统计(单位:km²)

Table 3 Area of polluted aerosol in major cities of changjiang river delta region in 1984 and 1997 (unit: km²)

时间	污染程度	β	上海	苏州	无锡	常州
84.08 (上海 87.08)	轻	0.08~0.3	304.82	42.07	44.84	42.95
	中	0.3~0.6	150.78	14.73	15.56	18.63
	强	>0.6	74.82	10.95	10.43	12.12
	总计	>0.08	530.43	67.76	70.81	73.72
97.05 (上海 97.10)	轻	0.08~0.3	409.55	71.66	73.80	93.72
	中	0.3~0.6	220.84	33.70	36.09	57.22
	强	>0.6	170.58	25.05	30.77	49.13
	总计	>0.08	800.97	130.41	140.67	200.08
增加面积	轻	0.08~0.3	104.72	29.58	28.97	50.77
	中	0.3~0.6	70.05	18.96	20.54	38.58
	强	>0.6	95.75	14.10	20.34	37.01
	总计	>0.08	270.53	62.64	69.85	126.36
增加比例(%)	轻	0.08~0.3	34.35	70.32	64.61	118.18
	中	0.3~0.6	46.46	128.72	132.15	206.99
	强	>0.6	127.97	128.71	194.99	305.21
	总计	>0.08	51.00	92.45	98.65	171.39

冠层模型进行较大的简化,因而在一定程度上影响了模型的精度.但随着高光谱卫星数据的出现,该问题将很快得到解决.从以上研究中可以得到以下结论:(1)任一地点的人为成因气溶胶的散射光是煤烟和水溶性粒子与沙尘性粒子散射光按一定比例的组合,可以用多波段大气散射数据对两类粒子的含量进行反演.(2)地物光谱可以概化为土壤、植被、水体和土壤、植被内的水分等基本地物光谱的组合.根据大气和各基本地物组分光谱的组合关系,可以用多波段遥感数据计算整层大气中人为气溶胶的含量和大气混浊度参数.(3)长江三角洲各大中城市的大气污染正在快速加剧.

REFERENCES

- [1] Templemeyer K, Ey O. Use of remote sensing to study the dispersion of stack plumes. *Remote Sensing of Earth Resources*, 1974, **3**: 255—272
- [2] Benjamin F, Richason Jr. *Introduction to Remote Sensing of the Environment*. Kendall: Hunt Publishing Company, 1978: 386—390
- [3] Fujii Toshio, Kudo Masateru, Iwashita Yoshiyuki. Assessment of air pollution by using satellite data. *Proceedings of the Japanese Conference of Remote Sensing*, 1992, **13**: 199—200
- [4] Kaufman Y T, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite remote sensing of large scale air pollution-method. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 9895—9909
- [5] ZHAO Bo-Lin, WANG Qiang, MAO Jie-Tai, et al. Optical remote sensing of atmospheric aerosol and vapor. *Science in China (B)* (赵柏林,王强,毛节泰,等.光学遥感大气气溶胶和水汽的研究.中国科学(B)), 1983, **10**: 951—962
- [6] MAO Jie-Tai, WANG Qiang, ZHAO Bo-Lin. Observation of atmospheric transparency spectrum and turbidity. *Acta Meteorological Sinca.* (毛节泰,王强,赵柏林,等.大气透明度光谱和浑浊度的观测.气象学报), 1983, **41**(3): 322—331
- [7] Lü Da-Ren, ZHOU Xiu-Ji, QIU Jin-Huan. Principle and numerical test of remote sensing for aerosol distribution at extinction-small angle scattering. *Science in China* (吕达仁,周秀骥,邱金桓.消光—小角度散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验.中国科学), 1981, **12**: 1516—1523
- [8] WANG Hong-Qi, ZHOU Xiu-Ji, LU Da-Ren. Experimental research of remote sensing for aerosol distribution at extinction-small angel scattering. *Atmospheric Science* (汪宏七、周秀骥、吕达仁.消光—小角度散射法遥感气溶胶分布的实验研究.大气科学), 1983, **7**(1): 33—41
- [9] Tanre D, Herman M, Kaufman Y J. Information on aerosol singe distribution contained in solar reflected spectral radiances. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D14): 19043—19060
- [10] Teruyuki Nakajima, Glouco Tonna, Ruizhong Rao, et al. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Applied Optics*, 1996, **35**(15): 2672—2686
- [11] Kaufman Y J, Gitelson A, Karnieli A, et al. Singe distribution and scattering phase function of aerosol particle retrieved from sky brightness measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(D5): 10341—10356
- [12] Yoram, Kaufman J. Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(D2): 2677—2692
- [13] Deng Ru-Ru, Tian Guo-Liang, LIU Qin-Huo, et al. Experiment and numerical simulation for the scattering characteristics of pollute aerosol in beijing city. *Journal of Remote Sensing*. (邓孺孺,田国良,柳钦火,等.北京市污染气溶胶路径散射及其数值模拟.遥感学报(已接收)), 2003, **7**(4): (accepted)
- [14] Deng Ru-Ru, TIAN Guo-Liang, Liu Qin-Huo, et al. Bidirectional reflectance model of vegetation-soil based on multi-scattering. *Journal of Remote Sensing* (邓孺孺,田国良,柳钦火,等.基于多次散射的植被—土壤二向反射模型.遥感学报(已接收)), 2003, **7**(6): (accepted)
- [15] Fraser R S, Kaufman Y J, Mahoney R L. Satellite measurements of aerosol mass and transport. *Atmos, Environ.*, 1984, **18**: 2577—2584

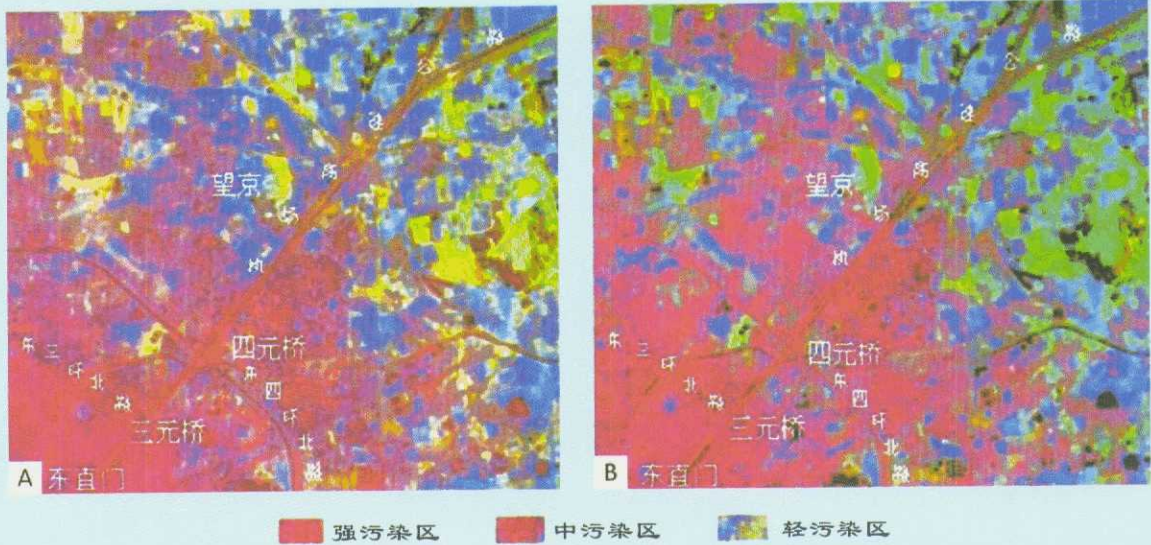
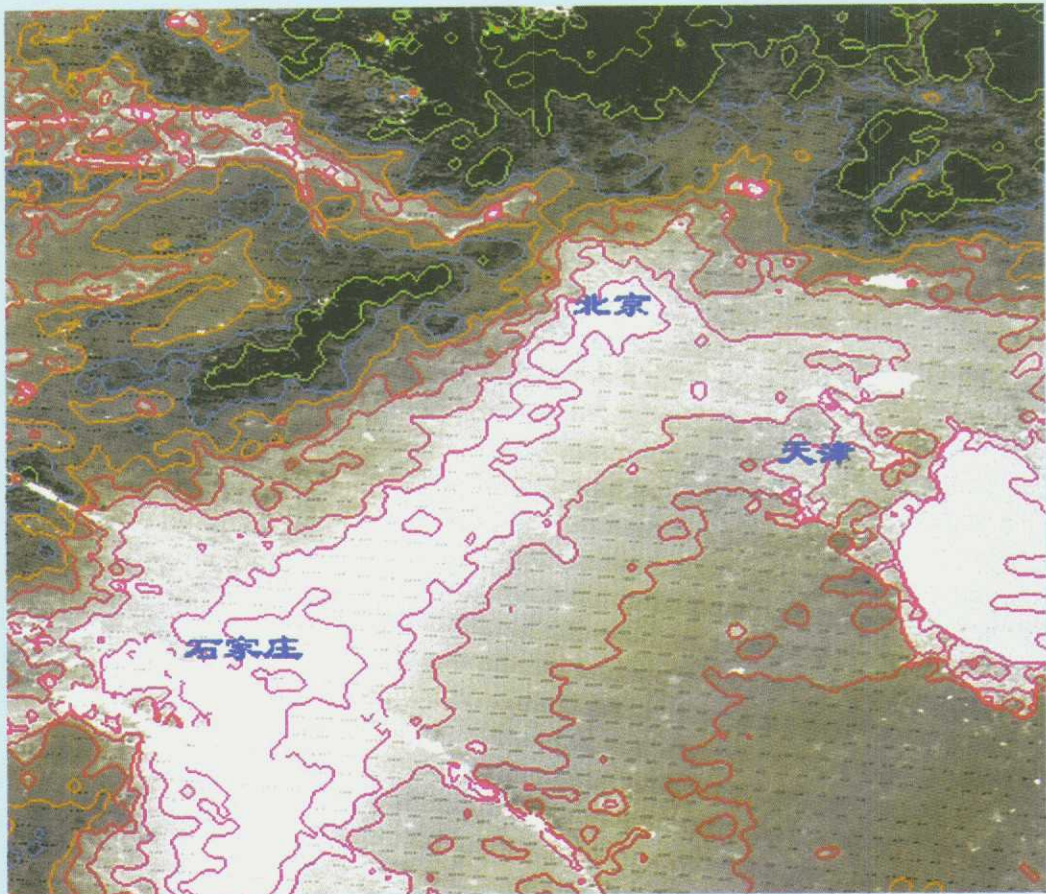


图1 北京市东北部 2001 年 7 月 6 日污染溶胶混浊度分布图

Fig.1 Turbidity distribution of polluted aerosol over eastern Beijing in July 6, 2001



北京市及周边地区 2002 年 2 月 3 日气溶胶混浊度分布图

气溶胶混浊度等值线:



图2 北京-天津-石家庄地区 2002 年 2 月 3 日气溶胶混浊度分布图

Fig.2 Turbidity distribution of aerosol over Beijing-Tianjin-Shijiazhuang area in February 3, 2002

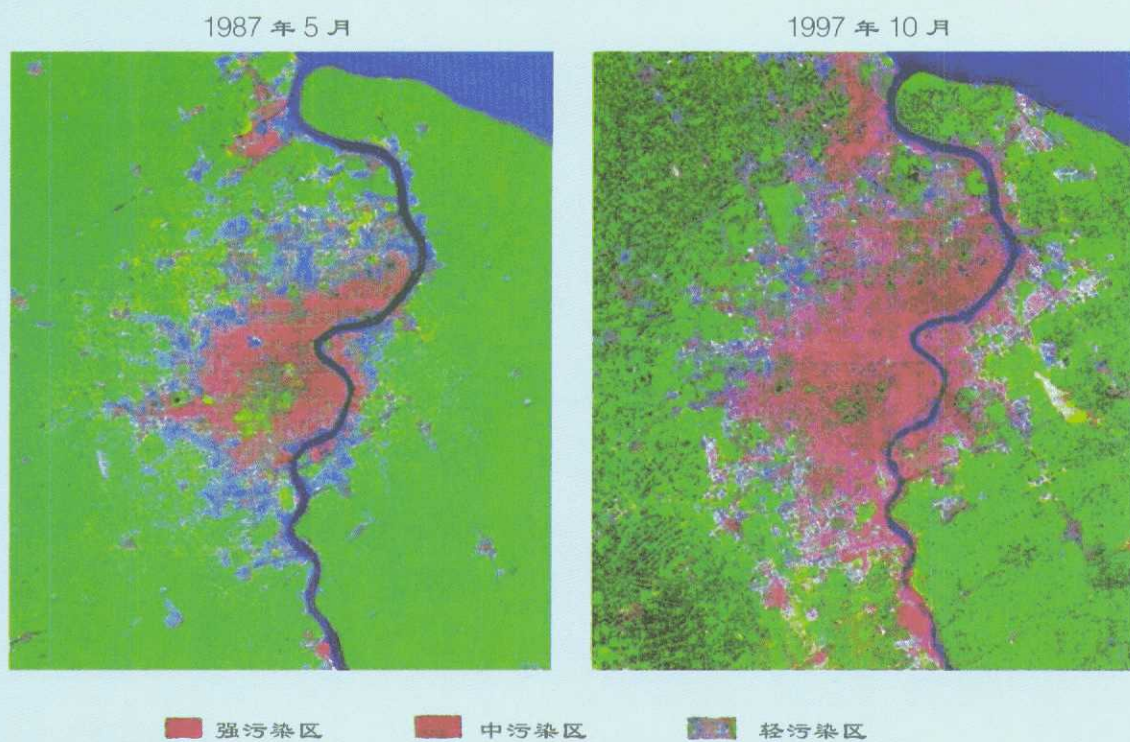


图3 上海市1987年5月与1997年10月污染气溶胶分布图

Fig.3 Turbidity distribution of polluted aerosol over Shanghai city in May 1987 and October 1997

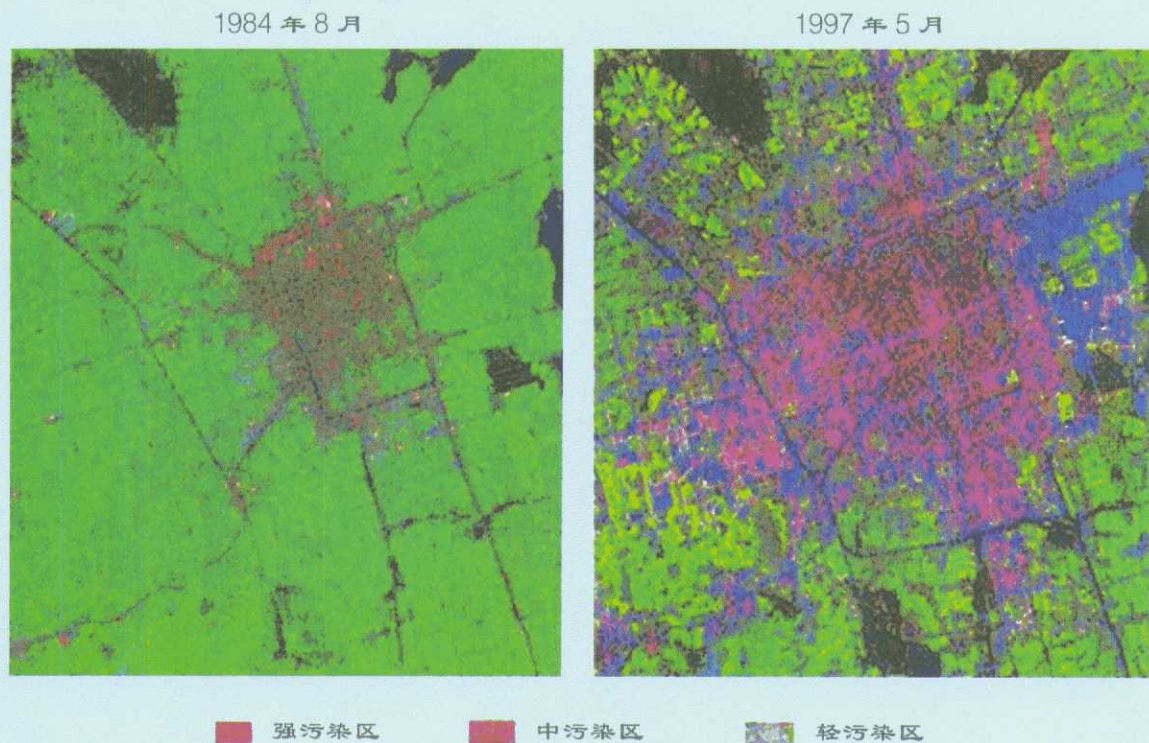


图4 苏州市1984年8月与1997年5月污染气溶胶分布图

Fig.4 Turbidity distribution of polluted aerosol over Suzhou city in August 1984 and May 1997