

# GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究\*

毛节泰 刘 莉 张军华

(北京大学地球物理系, LSSR, 北京, 100871)

## 摘 要

通过模拟 GMS5 卫星可见光通道的表观反射率  $R$  对不同大气气溶胶模型、不同下垫面反射率以及不同气溶胶光学厚度的敏感性, 对利用 GMS5 卫星资料反演湖面上空气溶胶的可行性进行了分析, 并结合地面多波段太阳光度计观测数据, 反演了巢湖上空大气气溶胶光学厚度。结果表明, 反演所得  $0.5336 \mu\text{m}$  气溶胶光学厚度强烈依赖于湖面反射率的选取, 通过选取合适的湖面反射率, 卫星反演的气溶胶光学厚度和地面光度计遥感的月均值相对误差不超过 30%。

关键词: 卫星表观反射率, 下垫面反射率, 气溶胶光学厚度。

## 1 引 言

大气气溶胶光学厚度是表征大气光学的一个重要物理量, 它对评价大气环境污染, 研究气溶胶的辐射气候效应, 以及空间遥感的大气订正等都具有十分重要的意义。

气溶胶粒子的探测手段主要有两种, 一是直接测量, 二为遥感测量, 其中遥感又分为主动遥感和被动遥感。卫星被动遥感气溶胶开始于 20 世纪 70 年代中期, 目前主要局限于洋面上空气溶胶粒子的探测, 原因主要是在可见光和近红外波段洋面近似为均匀稳定的黑体, 卫星接收到的辐射基本上是大分子和大气分子的气溶胶的后向散射。

随着未来多角度、多波段、多偏振分量遥感气溶胶的卫星探测器投入使用<sup>[1-3]</sup>, 如 SeaWiFS-SeaStar/NASA, MODIS-EOS/NASA, MISR-EOS/NASA, MERIS-ENVISAT/ESA, GLI-ADEOS /NASDA 等, 卫星遥感气溶胶可以从洋面扩展到陆面, 这对研究全球上空气溶胶的特性将是一次质的飞跃。

而目前全球气溶胶资料, 特别是陆面上空的资料依然十分匮乏<sup>[4]</sup>。为了得到中国地区大气气溶胶光学厚度的分布, 计划在全国选定 25 个湖, 利用湖水水面反射率比较均匀稳定的特性反演大气气溶胶光学厚度, 而后内插到全国。同时在北京密云水库、安徽巢湖、广东新丰江水库、西藏那木错湖和青海湖旁边布置了 5 台多波段太阳光度计, 利用地面观测值订正卫星反演结果。

\* 初稿时间: 1999 年 7 月 22 日; 修改稿时间: 2000 年 3 月 6 日。

资助课题: 国家自然科学基金资助项目 49635200。

本文利用 GMS5 卫星观测资料结合巢湖地面多波段太阳光度计观测数据进行了卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究, 检验把这种方法推广到其他 24 个湖的可行性。

## 2 大气气溶胶卫星遥感

卫星观测到的表观反射率  $R_{\text{MEAS}}$  可以由下式表示:

$$R_{\text{MEAS}} = f(\tau_0, R_{\text{SURF}}) = \pi L_{\text{TOA}}(\tau_0; \mu, \Phi, \mu_0, \Phi) / \mu_0 F_0 \quad (1)$$

其中,  $F_0$  为大气上界太阳辐射通量密度,  $\tau_0$  为整层大气光学厚度,  $(\mu_0, \Phi)$  为入射太阳光的方向,  $(\mu, \Phi)$  是卫星观测方向,  $\mu_0, \Phi, \mu, \Phi$  分别为天顶角的余弦和方位角,  $L_{\text{TOA}}(\tau, \mu, \Phi, \mu_0, \Phi)$  为卫星接收到的辐射, 它满足以下辐射传输方程:

$$\mu \frac{dL(\tau, \mu, \Phi)}{d\tau} = L(\tau, \mu, \Phi) - \frac{\bar{\omega}}{4\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} P(\tau, \mu, \Phi, \mu', \Phi') L(\tau, \mu', \Phi') d\mu' d\Phi' - \frac{\bar{\omega}}{4\pi} F_0 P(\tau, \mu, \Phi, \mu_0, \Phi) e^{-\tau/\mu_0} \quad (2)$$

$\tau$  是大气(分子+气溶胶)光学厚度,  $P(\tau, \mu, \Phi, \mu', \Phi')$  为相函数。  $\bar{\omega}$  为大气单次散射反照率。

如果假设下垫面是反射率为  $R_{\text{SURF}}$  的朗伯体,  $R_{\text{MEAS}}$  可表示为:

$$R_{\text{MEAS}}(\mu, \Phi, \mu_0, \Phi) = R_{\text{ATM}}(\mu, \Phi, \mu_0, \Phi) + \frac{T_{\text{ATM}}(\mu_0) T_{\text{ATM}}(\mu) R_{\text{SURF}}}{1 - R_{\text{SURF}} R_{\text{ATM}}} \quad (3)$$

$R_{\text{ATM}}(\mu_0)$  为整层大气反射率,  $T_{\text{ATM}}(\mu_0)$  和  $T_{\text{ATM}}(\mu)$  分别表示从太阳到地面、从地面到卫星大气层总的透过率(直射+漫射), 系数  $1/(1 - R_{\text{SURF}} R_{\text{ATM}})$  代表地面和大气层多次散射的作用。

显然, 卫星观测到的表观反射率  $R$  既是气溶胶光学厚度的函数, 又是下垫面反射率的函数, 假定一定大气气溶胶模型, 如果知道了下垫面的反射率  $R_{\text{SURF}}$ , 代入辐射传输方程, 可以反演得到气溶胶光学厚度; 反之, 如果已知气溶胶光学厚度和相应的大气参数, 下垫面的反射率也很容易求解出来。

## 3 反演算法

反演算法的基本原理是假设气溶胶粒子满足模型, 例如 Jung 分布<sup>[5]</sup>:  $\frac{dN}{dr} = Cr^{-(v+1)}$  ( $r_1 < r < r_2$ ),  $\frac{dN}{dr} = 0$  ( $r < r_1, r > r_2$ ),  $r_1 = 0.01 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 10 \mu\text{m}$ ,  $v$  为可调参数,  $C$  是与粒子总数相联系的常数, 也可以用 IAMAP 建议的 SRA 模型<sup>[6]</sup>; 散射相函数为不对称因子取  $g$  的 Henyey-Greenstein 相函数; 单散射反照率  $\omega$  和  $g$  可根据事先假定好的气溶胶模型(平均大陆气溶胶)由 Mie 散射理论计算得出; 气溶胶粒子折射率指数也可由该气溶胶模型得到; 再把大气假设成为各向同性均匀的整体; 有效水汽含量可由经验公式<sup>[7]</sup>计算得出; 选取 Disort 16 流 Delta-M 近似求解辐射传输方程<sup>[8]</sup>。

## 4 大气气溶胶卫星遥感的模拟研究

GMS5 卫星表观反射率的定义为:

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\tau, \mu_0, \Phi_0, \mu, \Phi, \lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$L$  表示大气顶向 GMS5 卫星方向出射的辐亮度,它是气溶胶光学厚度、入射光和出射光方位及波长的函数,  $\Phi(\lambda)$  为响应函数,  $F_0(\lambda)$  为太阳辐射通量密度。

以下是对 1998 年 5 月 26 日 13 时 33 分(北京时),巢湖上空 GMS5 卫星表观反射率  $R$  对下垫面反射率和气溶胶光学厚度变化敏感性的模拟结果。

(1) 固定大气气溶胶光学厚度,模拟 GMS5 卫星表观反射率  $R$  对下垫面反射率变化的敏感性。

由图 1 可见:无论何种气溶胶模型,模拟所得 GMS5 卫星表观反射率和下垫面反射率成线性递增关系,并对它的变化十分敏感。相比之下,海洋气溶胶模型模拟所得 GMS5 卫星表观反射率对下垫面反射率的变化最敏感,平均大陆气溶胶模型次之,城市气溶胶模型最小,这是因为海洋气溶胶粒子基本上不吸收,而城市气溶胶粒子吸收很大的缘故。

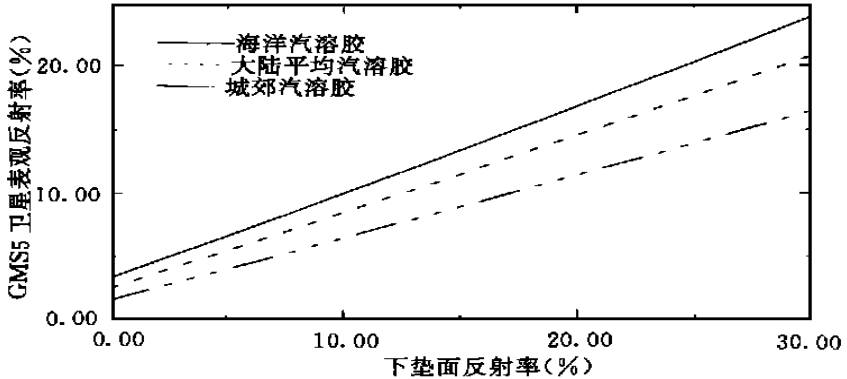


图 1 不同气溶胶模型,模拟所得 GMS5 卫星表观反射率  
对下垫面反射率变化的敏感性

(2) 不同气溶胶模型、不同下垫面反射率,模拟 GMS5 卫星表观反射率  $R$  对气溶胶光学厚度变化的敏感性。

由图 2 到 4 可以看出:不同气溶胶模型、不同下垫面反射率,模拟所得 GMS5 卫星观测到的表观反射率  $R$  随大气气溶胶光学厚度变化的特征不一样。如果大气气溶胶模型为海洋气溶胶(粒子基本不吸收),无论下垫面反射率如何改变(1%~20%),模式模拟出来 GMS5 卫星表观反射率  $R$  随气溶胶光学厚度的增加而增加,且下垫面反射率越小,变化越明显;如果是一般大陆气溶胶模型,当下垫面反射率比较小时,模拟所得卫星表观反射率随气溶胶光学厚度的增加而增加,伴随着下垫面反射率的增加,逐渐过渡到随气溶胶光学厚度增加而减小,中间存在一个临界的下垫面反射率值( $R_0$ )<sub>SURF</sub>,在这个反射率下,模拟所得 GMS5 卫星的表观反射率几乎不随气溶胶光学厚度变化而变化;城市气溶胶模型(吸收粒子很多,如煤烟),模拟所得  $R$  随  $\tau$  的增加而减小。具体原因是:海洋气溶胶粒子折射率虚部非常小,十分接近保守散射,入射光几乎不被吸收,显然气溶胶光学厚度越大,后向散射光越强,且下垫面反射率越小,出射辐射对气溶胶光学厚度变化越敏感;城市气溶

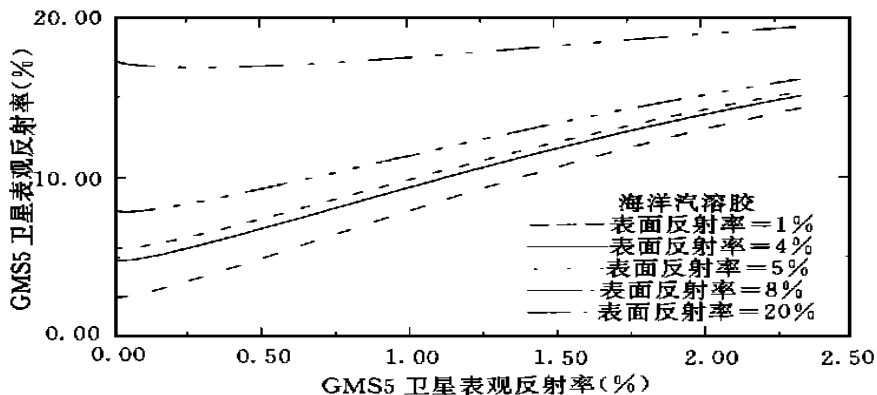


图 2 海洋气溶胶模型, 模拟所得 GMS5 卫星表现反射率  
对气溶胶光学厚度变化的敏感性

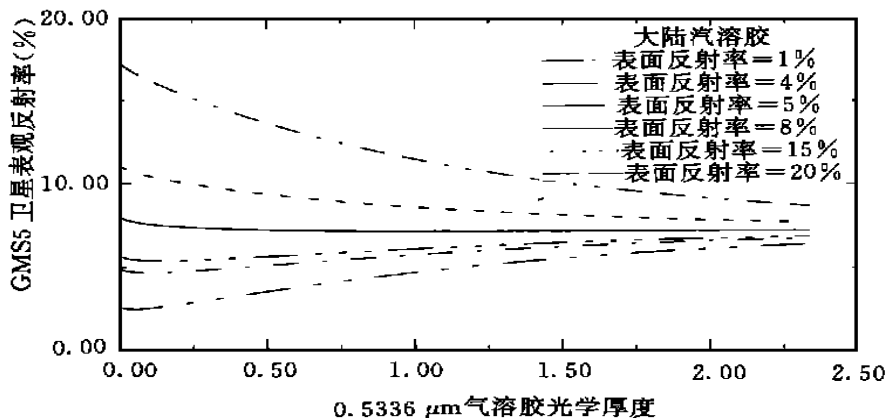


图 3 平均大陆气溶胶模型, 模拟所得 GMS5 卫星表现反射率  
对气溶胶光学厚度变化的敏感性

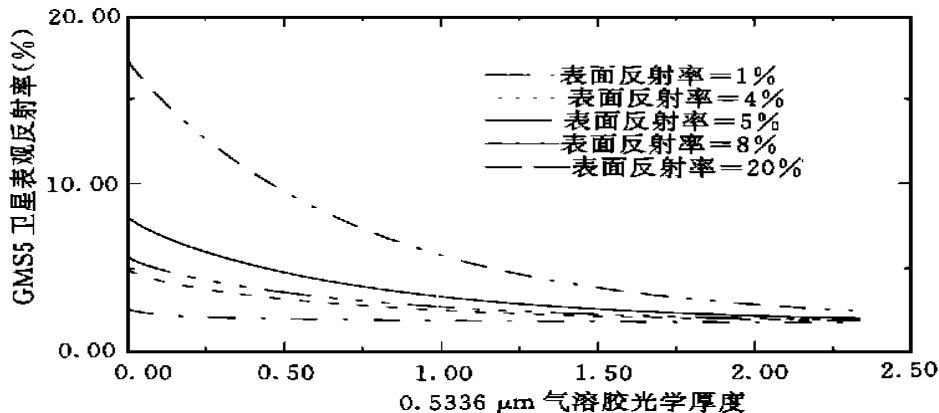


图 4 城市气溶胶模型, 模拟所得 GMS5 卫星表现反射率  
对气溶胶光学厚度变化的敏感性

胶粒子的折射率虚部很大, 吸收很强, 光学厚度越大意味着吸收的也越多, 出射辐射强度越小, 和海洋气溶胶不同的是, 下垫面反射率越大, 出射辐射强度随气溶胶光学厚度的变

化越显著;一般大气气溶胶模型,散射和吸收的相互补偿作用使其光学特性介于两者之间。

值得一提的是卫星接收到的表观反射率  $R$  除了和气溶胶模型有关,还和入射光及出射光的方位有关,以上模拟的是 1998 年 5 月 26 日 13 时 33 分(北京时间)GMS5 卫星表观反射率对下垫面反射率及气溶胶光学厚度变化的敏感性,这是因为要和地面观测数据匹配(在 13 时 30 分左右进行太阳光度计的地面观测)。

## 5 GMS5 卫星遥感巢湖上空大气气溶胶光学厚度的试验研究

### 5.1 湖面反射率的获取

在巢湖旁边安置了一台安徽光学精密机械研究所研制的自动跟踪 8 波段太阳光度计,其中心波长分别为  $0.4014 \mu\text{m}$ ,  $0.4410 \mu\text{m}$ ,  $0.5336 \mu\text{m}$ ,  $0.6111 \mu\text{m}$ ,  $0.6714 \mu\text{m}$ ,  $0.7813 \mu\text{m}$ ,  $0.8826 \mu\text{m}$ ,  $1.064 \mu\text{m}$  (所有这些波段均避开了水汽的吸收),在 13 时 30 分左右测量大气气溶胶光学厚度随波长的变化,观测选择在晴朗无云的天气状况下进行。1998 年全年共有 64 d 的地面观测数据。

巢湖地处安徽省,是中国第 5 大淡水湖,由于受城市影响较小,假设巢湖地区大气气溶胶模型为平均大陆气溶胶。前面提到 GMS5 卫星表观反射率  $R = f(\tau, R_{\text{SURF}})$ ,有了气溶胶光学厚度  $\tau(\lambda)$ ,利用卫星资料,可以反演得到下垫面反射率  $R_{\text{SURF}}$ ,图 5 是利用地面多波段太阳光度计  $0.5336 \mu\text{m}$  观测资料结合卫星观测数据反演所得 1998 年巢湖湖面反射率随时间的变化。图中曲线是拟合所得的 4 次多项式曲线,由图 5 可以看出,对于全年绝大部分时间,湖面反射率均在 5% 以下,最大值出现在 5,6 月份,11,12 月份湖面反射率值最小,这可能是因为 5,6 月份水中浮游动植物生长繁殖最为茂盛的缘故(3,7 和 8 月份没有地面观测资料,故而这 3 个月湖面反射率变化的趋势在图中没有显示出来)。

### 5.2 GMS5 卫星反演气溶胶光学厚度的试验研究

GMS5 静止卫星定点于  $140^\circ\text{E}$ ,每小时发出一张云图,其星下点分辨率为  $1.25 \text{ km}$ 。为了和地面观测数据相匹配,选用北京时 13 时 33 分时 GMS5 卫星资料,根据观测所得的表观反照率反演大气气溶胶光学厚度。1998 年共有 219 d 巢湖湖面上空卫星表观反射率的观测数据,剔除卷云的影响,真正能反演得出大气气溶胶光学厚度的天数为 100 d 左右。

利用 5.1 节中所得的湖面反射率,插值得到全年其它各天湖面反射率值,代入辐射传输模式,从而反演得到气溶胶光学厚度,并求出其月平均值,为了便于比较,选取  $0.5336 \mu\text{m}$  处气溶胶光学厚度。

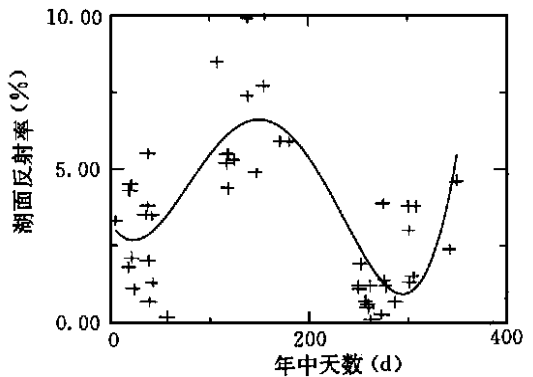


图 5 利用地面多波段太阳光度计  $0.5336 \mu\text{m}$  观测资料结合卫星观测数据反演所得 1998 年巢湖湖面反射率随时间的变化

由图 6 可以看出反演所得气溶胶光学厚度的月平均值和实际观测值还是比较接近的,最大相对误差达 27.6%。反演所得气溶胶光学厚度月平均值比地面观测值的月平均值高或低。这是因为,第一,无论是地面观测还是卫星观测都很难完全排除卷云的影响;其次,反演出来的数据量比观测得到的数据量多了一半以上,观测及反演所得气溶胶光学厚度月平均值并不可能完全相等,最重要的可能是因为下垫面反射率取的不够合适(比实际湖面反射率偏高或偏低)。从图中我们还可以看出合肥地区  $0.5336 \mu\text{m}$  气溶胶光学厚度的变化范围一般介于 0.4 与 0.8 之间,最大值出现在 7 月份。(数据处理,剔除了不合理数据( $\tau_{0.5336} < 0.05$  或  $\tau_{0.5336} > 1.0$ ),之所以选这两个上下限是因为:根据合肥的海拔高度,即使大气再干净,气溶胶  $\tau_{0.5336}$  也不可能小于 0.05,太阳光度计实测  $0.5336 \mu\text{m}$  气溶胶光学厚度值几乎都小于 0.9,并且全部大于 0.05,观测值大于 0.9 的仅有一组数据,如果  $0.5336 \mu\text{m}$  气溶胶的光学厚度大于 1.0,很难说这不是卷云的影响。)

周军等<sup>[9]</sup>指出:合肥地区气溶胶光学厚度春季最高,夏季最小,秋冬季节居中。原因是合肥地区位于中国的东南部,位于亚热带和温带的过渡地带,秋冬季节盛行的偏北风所带来的冷干但是比较干净的气团稀释了本地的气溶胶;到了春季,干冷气团和西南方向的暖湿气流交汇,有时实力相当,形成一股停滞气流,这停滞的气流使得气溶胶粒子在混合层积聚起来;夏季,带有干净空气的太平洋高压控制天气形势,与此同时雷阵雨的湿清除作用也使夏季气溶胶粒子光学厚度降低。反演结果气溶胶光学厚度春高夏低的趋势并没有那么明显。原因是 3,7 和 8 月份,这 3 个月均无地面观测值,湖面反射率仅能通过插值得到,这势必会给反演这 3 个月气溶胶光学厚度带来可观的误差,以至得不到很合理的反演结果;此外,7,8 月份是合肥的湿季,中午前后云发展比较旺盛,卫星观测不能完全避免卷云的影响,测出行星反射率偏高,在下垫面反射率不变的条件下,反演所得气溶胶光学厚度偏高;第三,由图 6 可见 1998 年气溶胶光学厚度地面观测资料本身就没有很明显的季节变化趋势。

取湖面反射率月平均值,反演所得各天大气气溶胶光学厚度值和实测结果的对比如图 7。图 7 拟合所得直线为:  $y = 0.465475x + 0.240274$ , 线性相关系数大于  $\alpha = 1\%$  的置信度水平。实测值和反演值对比的点聚图表明两者呈线性关系,但有一定的离散性。

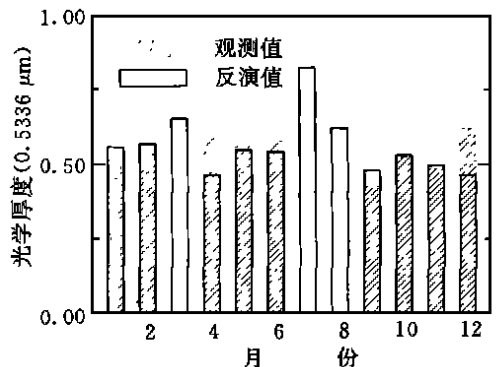
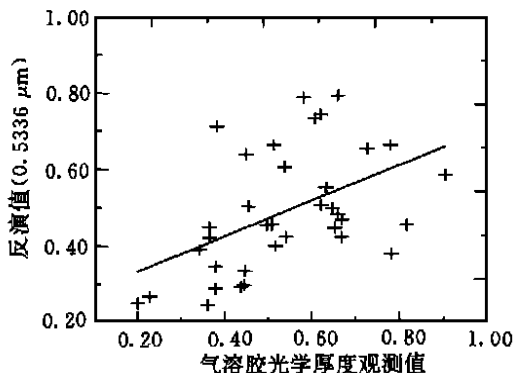


图 6 卫星反演与地面观测值的月平均比较

图 7 卫星反演值与地面观测值比较

## 6 讨 论

由于湖面状况的复杂性(湖面反射率值与水体污染状况及水生动植物生长繁殖情况密切相关),反演湖面上空大气气溶胶光学厚度存在相当的困难。虽然用 GMS5 卫星反演气溶胶光学厚度具有一定的优越性,但由于它可见光通道太宽( $0.55 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ),为了精确起见,不得不考虑下垫面反射率随波长的变化,这对反演气溶胶光学厚度是不利的;且波带太宽,水汽吸收不能不考虑,而水汽本身就是一个很大的不确定因素。

### 6.1 误差分析

(1) 如果下垫面反射率大于 5%,会出现 GMS5 卫星观测到的表观反射率  $R$  对大气气溶胶光学厚度变化不敏感的现象, $R$  的一个微小变化(设 0.3%),可能引起很大的变化。

(2) 没有很好的气溶胶源模式,只能对实际大气气溶胶模型作一个较为合理的假设,气溶胶粒子折射率的虚部仍然是一个很大的不确定因子。

(3) 无论是地面直接测量还是卫星观测(特别是卫星观测)无法完全排除卷云的影响。

(4) 地面观测和卫星观测时间基本一致,但并不完全同步。

(5) 观测地点位于合肥市郊,离巢湖还有一段距离。

(6) 假设大气层为各向同性的均匀整体,有相同的单散射反照率  $\bar{\omega}_0$  和不对称因子  $g$ 。

(7) 把湖面反射率假设成为一个不随波长变化而变化的固定值,也不受风速及太阳入射角变化的影响。事实上<sup>[10]</sup>,湖面反射率随波长变化有一定的变化。

(8) 水汽光学厚度也是一个不确定因子,只能求助于经验公式。

(9) 湖面反射率的不稳定性(随时间变化很明显),给反演气溶胶光学厚度带来的误差很大。

### 6.2 可能的改进方案

选取最优观测时间,此时即使湖面反射率高达 5% 以上, GMS5 卫星表观反射率对气溶胶光学厚度的变化依旧敏感。为了和地面观测数据匹配,本文只能选用北京时 13 时 33 分卫星资料反演大气气溶胶光学厚度。用 GMS5 卫星反演气溶胶光学厚度尽管可行,但它致命的缺点是可见光通道波带太宽,从这方面考虑,NOAA, Sea Wifs 等卫星无疑是更好的选择。

## 7 结 论

本文对 GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度作了一些试验性研究,结果表明:

(1) 卫星接收到的表观反射率  $R$  对下垫面反射率的变化十分敏感。

(2) 不同大气气溶胶模型,不同下垫面反射率,模拟所得 GMS5 卫星接收到的表观反射率  $R$  对气溶胶光学厚度变化的敏感性不一样。如果选取海洋气溶胶模型,模式模拟出来的  $R$  随着气溶胶光学厚度的增加而增加,并且下垫面反射率越小, $R$  对  $\tau$  的变化越敏感;如果是城市气溶胶, $R$  随气溶胶光学厚度的增加而减小,且下垫面反射率越大,变化越敏感;一般大陆气溶胶模型介于两者之间,当下垫面反射率较小时,卫星接收到的  $R$  随气溶胶光学厚度的增加而增加,伴随下垫面反射率的增加逐渐过渡到随着光学厚度的增加而减小,存在一个下垫面反射率区域,在这个区域,卫星接收到的表观反射率  $R$  对气溶胶光学厚度的变化极不敏感,这种情况不利于卫星遥感气溶胶光学厚度。

(3) 反演所得  $0.5336 \mu\text{m}$  气溶胶光学厚度强烈依赖于湖面反射率的选取, 其月平均值的相对误差一般不超过 30%。

由于卫星反演大气气溶胶光学厚度不确定因素很多, 只能依靠假设, 误差较大在所难免。总而言之, 用 GMS5 卫星反演湖面上空气溶胶光学厚度虽然存在一定的困难, 但是切实可行的。

## 参考文献

- 1 Kaufman Y J, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16815 ~ 16830
- 2 Nakajima T, Higurashi A. AVHRR remote sensing of aerosol optical properties in the Persian Gulf region, the summer of 1991. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16935 ~ 16946
- 3 Larry L. Stowe, et al. Development, validation, and potential enhancements to the second-general operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16923 ~ 16934
- 4 Guillaume A, d'Almeida, et al. Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics. A Deepak Publishing, Hampton, 1991. 61 ~ 77
- 5 王永生等. 大气物理学. 北京: 气象出版社, 1987, 364 ~ 365
- 6 尹宏. 大气辐射学基础. 北京: 气象出版社, 1993, 72 ~ 81
- 7 杨景梅, 邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式. *大气科学*, 1996, 20(5): 620 ~ 626
- 8 吴北婴等. 大气辐射传输实用算法. 北京: 气象出版社, 1998, 52 ~ 65
- 9 Zhou Jun, et al. Variability of aerosol optical properties over Hefei during september 1993 to september 1994. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 10(1): 81 ~ 95
- 10 童庆禧等. 中国典型地物波谱及其特性分析. 北京: 科学出版社, 418 ~ 421

# GMS5 REMOTE SENSING OF AEROSOL OPTICAL THICKNESS OVER CHAOHU LAKE

Mao Jietai Liu Li Zhang Junhua

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

## Abstract

By simulating the sensitivity of GMS5 apparent reflectance to the reflectance of surface layer and aerosol optical thickness, we research the feasibility of using GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over the Chaohu Lake. Generally speaking, the retrieved aerosol optical thickness strongly depends on the reflectance of surface layer and the relative error of monthly mean aerosol optical thickness at  $0.5336 \mu\text{m}$  is less than 30%.

**Key words:** Apparent reflectance, Surface reflectance, Aerosol optical thickness.