

文章编号: 1007-4619(2005)06-0688-09

# 应用 MODIS 数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演

吴晓京<sup>1, 2</sup>, 陈云浩<sup>1</sup>, 李三妹<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 资源学院, 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 100875;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘 要:** 大雾区域地面能见度、垂直总水汽含量、雾滴有效半径等因子是对大雾进行有效监测的重要参数。以 MODIS 探测器的卫星遥感数据资料为主要数据源, 定量反演了这些大雾参数。能见度参数反演结果和气象地面观测能见度信息数据的对比表明其效果良好。所得垂直总水汽含量、雾滴有效半径也与以前国内外相关多年研究的结果趋势一致。此方法在这里成功的应用, 说明其在遥感大雾监测中的潜在应用价值。

**关键词:** MODIS; 大雾; 垂直厚度; 地面能见度; 垂直总水汽含量; 有效半径

**中图分类号:** P407/TP79 **文献标识码:** A

## 1 引 言

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 是 EOS (Earth Observation System) 计划的核心仪器。EOS 计划携带 MODIS 的卫星有两颗, 上午轨道卫星命名为 Terra 它在全球云量最少时过境, 目的是观测地球表面; 下午星命名为 Aqua 在全球云量最多时进行观测, 用于水循环研究。MODIS 探测器是被动式成像分光辐射计, 其 36 个通道有 490 个探测器, 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学仪器。其通道星下点空间分辨率分别为 250m, 500m, 1000m。由于 MODIS 具有空间分辨率高, 观测光谱波段多, 数据信噪比高等优点, 当用于某些气象及地表特性观测时, 其效果明显优于传统气象卫星。

大雾是在临近地面的空气中由于水汽凝结而产生大量的悬浮水滴或冰晶而使地面能见度降到 1km 以下的天气现象。近年来, 由于天气气候条件的变迁、大气污染等原因, 中国许多地区大雾天气频繁发生, 严重影响人们的日常生活和经济活动。认识大雾、摸清大雾的形成与消散的规律, 尽可能减轻大雾

对人们日常活动的影响, 一直是气象工作者努力的目标。遥感定量反演大雾的有关物理参数正是其重要手段之一。

早期的卫星遥感监测大雾主要是在卫星云图上通过定性分析大雾的纹理、边界形态来区分云和其他地面目标物<sup>[1]</sup>, 现在已经逐步过渡到定量反演大雾的微物理特征研究方面。近年来这个领域代表性的工作有: 利用红外 (10.7 $\mu$ m) 与中红外 (3.7 $\mu$ m) 通道夜间对大雾的敏感性差异, 同时结合数值天气预报地面温度场资料做无法进行纹理分析的夜间大雾判识<sup>[2-3]</sup>; 根据大雾边缘环流的内向蚀损使其消散出现的规律性, 用可见光波段数据, 结合日照变化因素, 进行大雾消散的临近预报<sup>[4]</sup>; AVHRR 资料反演欧洲大雾微物理特性研究<sup>[5]</sup>; 在多年 AVHRR 资料判识大雾基础上, 研究大雾在欧洲的地理及季节分布规律<sup>[6]</sup>等。

利用卫星监测大雾的难点在于大雾和层云的物理特性几乎完全相同, 临近地面为雾, 抬升到一定高度就是层云。卫星从太空向地面观测时, 如果同时存在层云和雾, 很难从观测数据中区分层云和大雾, 因为它们具有几乎相同的物理特性和形态表现。也正因如此, 以往对于层云物理参数研究的各种模型

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-10-08

基金项目: 高等学校博士点基金 (20030927014), 国家高技术研究发展计划 (2002AA130020)。

**作者简介:** 吴晓京 (1968—), 男, 高级工程师, 现在北京师范大学资源学院攻读硕士学位, 从事气象、环境卫星资料应用研究工作, 发表论文、技术报告等十余篇。E-mail: cylv@bnu.edu.cn

就同样可以应用于大雾的物理特性反演工作中来。例如 Stephens 用于研究层云的理论与方法<sup>[7-9]</sup>, 同样可以应用于大雾物理特性的反演工作中。Stephens 所做的工作主要有:由理论建立了云模型, 并计算出所需参数;利用相应的观测数据与模型计算出的数据作对比, 根据大气辐射特性, 对不一致的地方进行修正, 最终发展出一套简化、可靠的云参数计算的模型。

新疆北部及其与哈萨克斯坦相临界的阿尔泰山和塔尔巴哈台山之间的额尔齐斯河河谷地区, 由于

其特殊的地形(两山海拔高度都在 2000—3000m 之间, 河谷海拔在 1000m 以下, 最低处只有 300—400m。)以及分布的众多水体, 如乌伦古湖、吉力湖、福海水库、斋桑泊等, 历来是大雾多发地区之一。2002 年 10 月中旬以后, 该地区降水偏多, 近地面水汽趋于饱和, 加之长期维持高压脊、气温偏高等因素<sup>[10]</sup>, 在 2002 年 10 月 29 至 30 日出现了维持近 30 小时的大雾天气。2002 年 10 月 29 日 12 时 45 分(北京时), Terra 卫星在新疆北部地区过境, MODIS 探测器观测到了此次大雾(图 1)。

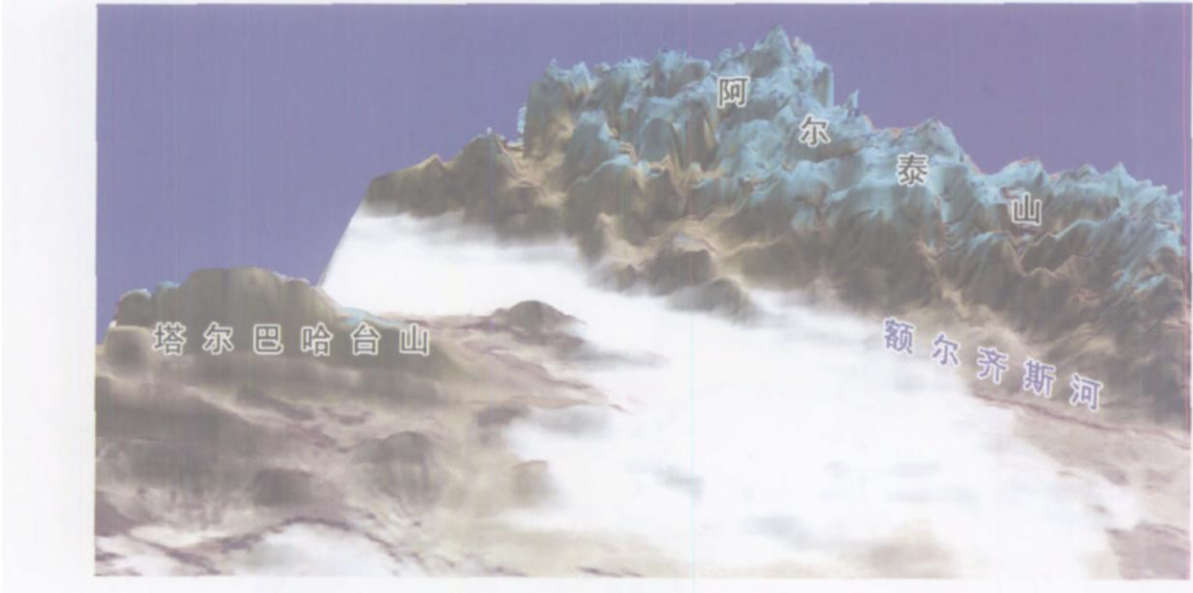


图 1 MODIS 数据与三维地理信息数据合成的图像 (2002-10-29)  
(图中灰白色的是大雾, 蓝色是积雪, 黑色是水体, 灰黑色是山体岩石, 黄色是沙漠戈壁)  
Fig 1 MODIS data and DEM data composition image(2002-10-29)  
(white is fog blue is snow cover black is waterbody gray is rock yellow is GOBI desert)

本文描述了利用 MODIS 探测数据, 定量反演这次大雾部分物理参数的方法与结果, 其中部分参数的推导参照了 Stephens 有关层云的理论。

## 2 大雾区域的垂直厚度提取

大雾处于大气边界层中, 同时又是云的一部分, 与层云不同的仅是其紧贴地表, 地形影响在这里表现得十分显著。本次大雾过程发生在河谷地区, MODIS 探测得到的数据中主要有 4 类目标物: 大雾、积雪、山体岩石、戈壁沙漠。利用各类目标物在 MODIS 不同通道上的反应, 分别用对雪盖敏感的 1628—1652nm 通道分离出积雪; 用 545—565nm 通道反射率的不同分离出地表上山体岩石、戈壁沙漠

和仅留有大雾信息的区域<sup>[11]</sup>, 得到大雾和非大雾区域分布, 再通过一个 3×3 的图像滤波器进行滤波后, 得到有齐整边缘线的大雾覆盖区域二值图。将此二值数据和对应的数字高程数据 (DEM) 叠加, 提取雾区边缘的海拔高度, 因雾顶相对平坦光滑, 可参照此值提取雾区周边的雾顶高度, 经过插值处理<sup>[11]</sup>得到此次大雾过程中国境内部分的雾顶高度, 雾顶高度和对应像元点的地表 DEM 海拔高度数据相减, 近似得到雾区的垂直厚度信息。

结果见图 2(雾区中的中国新疆北部部分), 计算所得探测时刻大雾区的厚度在 1—450m 之间。图中雾区最厚部分位于河谷地区, 河谷两侧和大雾区域南部, 厚度逐渐变薄。

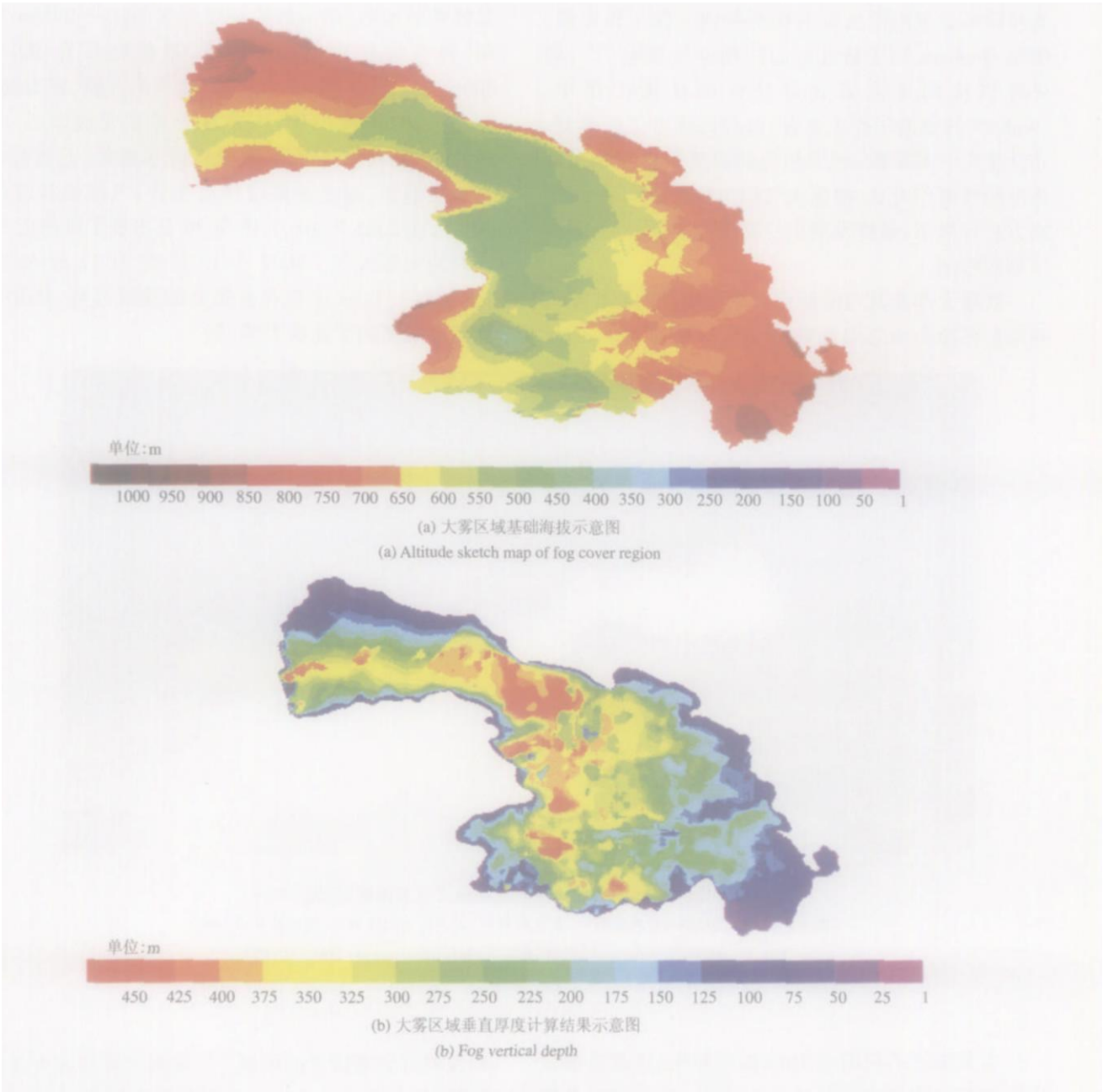


图 2 大雾空间分布图  
Fig 2 Fog space distributing map

3 大雾区域地面能见度反演

大雾的光学厚度信息对于能见度的获得非常重要,雾的光学厚度和可见光波段反射率直接相关。  
本文计算光学厚度应用了 MODIS 探测器 (0.62—0.67 $\mu\text{m}$ ) 通道的数据。此数据经过了定位、定标校正、大气吸收效应纠正等预处理工作。

应用 6S 模式对大雾覆盖部分卫星到雾顶由于  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_2$  等气体弱吸收作用造成的削弱影响进

行了订正。订正输入数据包括:卫星参数,太阳高度角,大气廓线模式(中纬度冬季),气溶胶模式(大陆气溶胶);探测器波段 (0.65 $\mu\text{m}$ ),目标物海拔高度 (1000m),气溶胶浓度(能见度 15km),数据像素数目以及 MODIS 探测器观测数据。输出为订正后的雾区雾顶反射率。  
反演能见度时假设大雾在水平和垂直方向上都是均匀的,这样应用平行大气假设来解辐射传输方程能够得到好的效果,同时假设入射光各向同性,强度与方位无关,辐射传输方程可简化为

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - \frac{\bar{\omega}_0}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') d\mu' \tag{1}$$

$\mu$  为太阳天顶角的余弦,  $\bar{\omega}_0$  为单散射反射率,  $I$  是光学厚度为  $\tau$  时的目标物漫射强度,  $\mu'$  为散射角余弦。

在  $0.3\text{--}0.75\mu\text{m}$  波段, 云雾滴对光的吸收极小, 可以忽略介质的吸收作用<sup>[12]</sup>。因此认为  $\bar{\omega}_0 \approx 1$ 。应用二流模式在  $0.3\text{--}0.75\mu\text{m}$  对 (1) 式求得的简化情况下的近似解为<sup>[12]</sup>:

$$Re_{fog}(\mu_0) = \frac{\beta(\mu_0)\tau/\mu_0}{1 + \beta(\mu_0)\tau/\mu_0} \tag{2}$$

由 (2) 式变形得到

$$\tau = \frac{Re_{fog}(\mu_0) \cdot \mu_0}{[1 - Re_{fog}(\mu_0)] \cdot \beta(\mu_0)} \tag{3}$$

式 (2)、式 (3) 中  $\tau$  为大雾光学厚度,  $\mu_0$  为特定时刻的太阳天顶角余弦,  $Re_{fog}(\mu_0)$  为太阳天顶角余弦为  $\mu_0$  时的大雾反射率值,  $\beta(\mu_0)$  为单向入射辐射在天顶角余弦为  $\mu_0$  时的后向散射系数。

在美国标准大气且地面反射率为零的假设条件下, Stephens 通过一个多散射理论模型计算<sup>[7]</sup>得到的漫反射和透射, 由二流模式近似关系得到了  $\beta(\mu_0)$  参数。将云分为不同种类, 对所有不同云从理论和实测对比研究, 证明了  $\beta(\mu_0)$  主要受光学厚度、太阳天顶角的影响, 其他参数的影响很少, 同时也得到了光学厚度、太阳天顶角与  $\beta(\mu_0)$  关系的拟合公式和查算表<sup>[8, 13]</sup>, 拟合公式和查算表误差在 5% 以内。

(3) 式中的大雾反射率值  $Re_{fog}$  可以用一个简化

的辐射传输模型来计算 (图 3)。由于卫星接收到的雾区总辐射, 在去除大气影响后, 等于大雾和地表的反射贡献之和, 即:

$$Re = Re_{fog} + Re_{ground} Tr_{fog}^2 \tag{4}$$

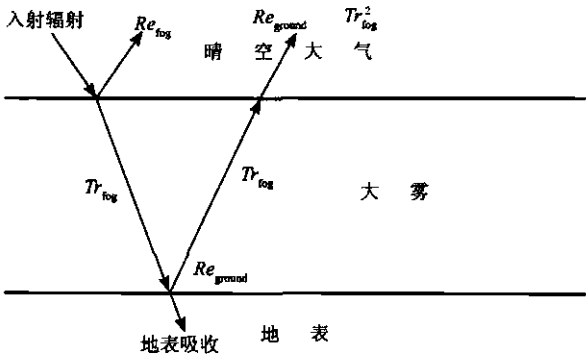


图 3 大雾反射率计算示意图

Fig 3 Fog and ground reflectivity sketch map

由于在忽略大雾吸收作用的情况下, 有下式:

$$Tr_{fog} + Re_{fog} = 1 \tag{5}$$

式中,  $Re_{fog}$  为大雾反射率,  $Tr_{fog}$  为大雾透射率,  $Re_{ground}$  是地表反射率。Re 为卫星接收到的雾区总反射经过订正后的值, 由于假设入射为 1, 此值即为雾区雾顶反射率。图 4 是本文研究对象大雾区域的雾顶反射率。

式中  $Re_{ground}$  应用了时段最相近的晴空地表的背景辐射数据, 如图 5。背景信息同样经过了大气纠正计算。由于时间接近, 地表状况变化不大, 最大程度的减少了由于地表覆盖变化对  $Re_{ground}$  影响所造成

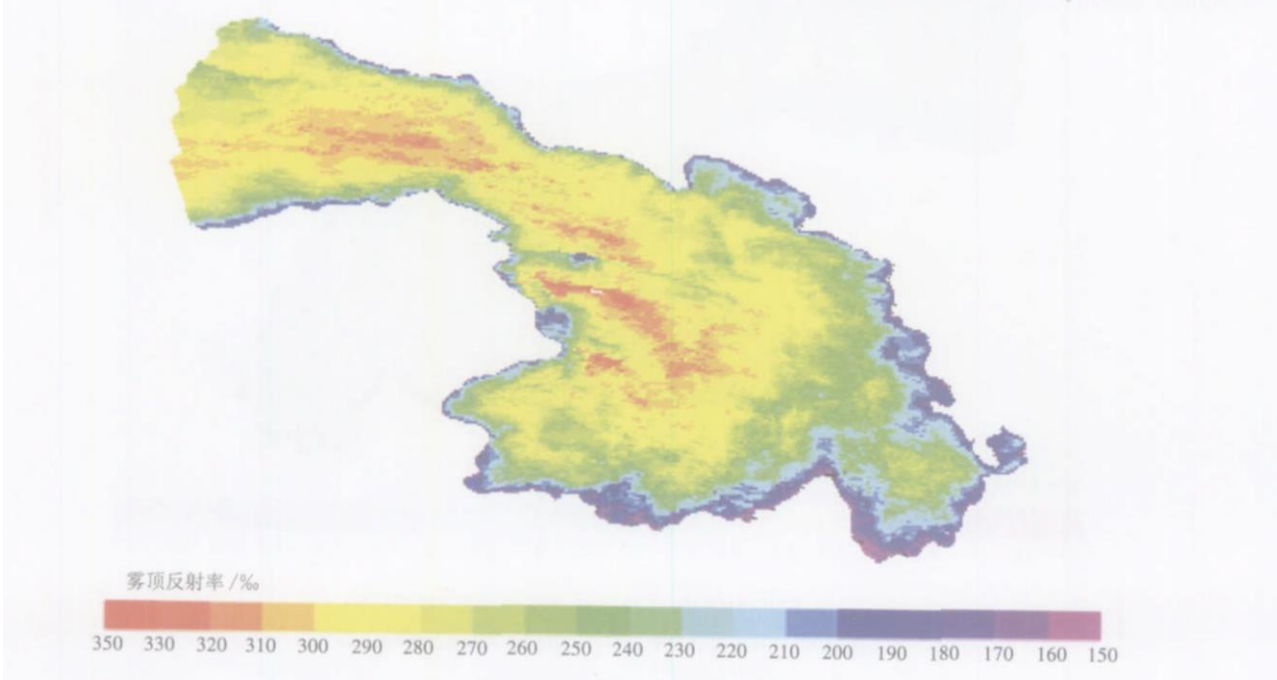


图 4 EOS MODIS 大雾区域雾顶反射率 (2002-10-29)



的误差。联立式 (4), 式 (5) 得到由  $R_e$  和  $R_{e_{ground}}$  表示的  $R_{e_{fog}}$  值。然后, 输入  $R_{e_{fog}}$  和用回归公式算出的  $\beta(\mu_0)$ , 运用式 (3), 可以得到大雾区域国内部分光学厚度  $\tau$  的值, 其分布见图 6。

$\tau$  的正确性直接影响地面能见度结果的准确与否, 为了验证  $\tau$  的正确性, 用上述算法得到的  $\tau$  值、作为主要输入值, 利用 SBDART 模式正演计算大气层顶卫星接收到的反射率, 并与 MODIS 观测值作比较。

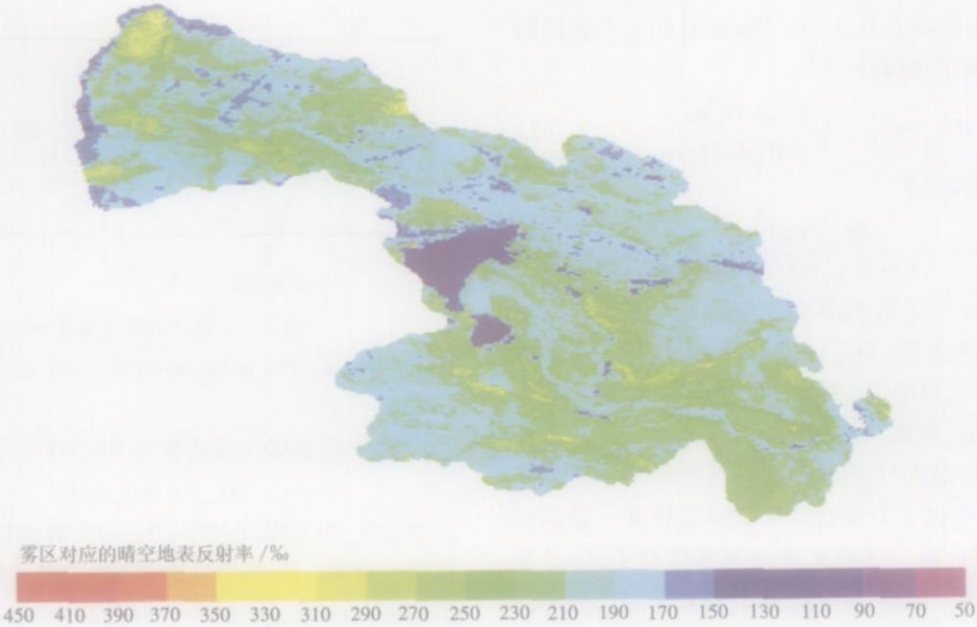


图5 EOS/MODIS 大雾覆盖区域地表反射率  
Fig.5 Ground reflectivity distribution of fog cover

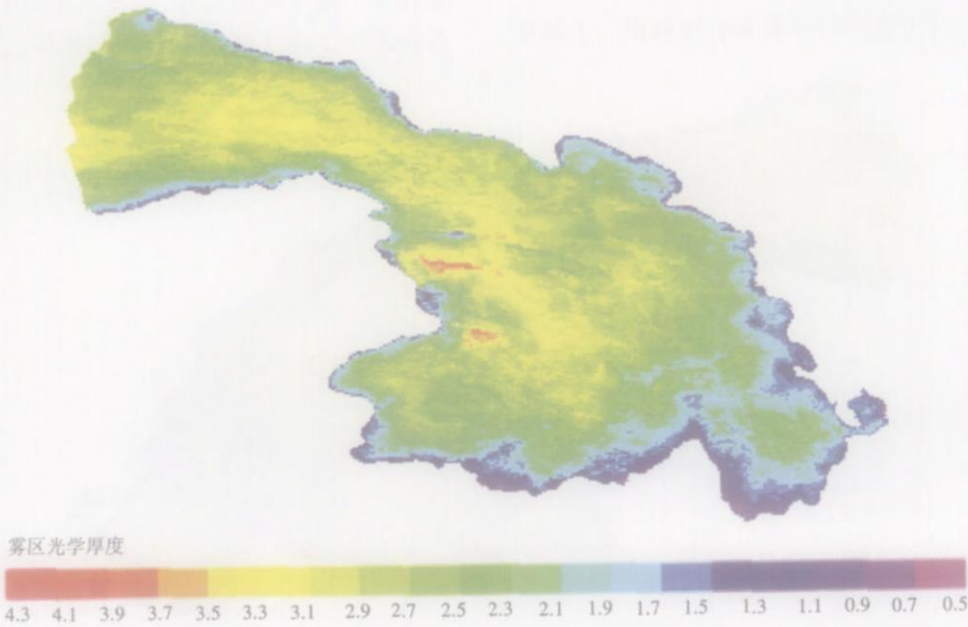


图6 EOS/MODIS 大雾区域光学厚度(2002-10-29)  
Fig.6 Fog region optical depth distribution(2002-10-29)

SBDART ( Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)是用于卫星观测辐射传输问题的模型,集成了大气科学界在大气物理理论上得到的最新成果。它是将 DISORT算法和计算每一层光学厚度,单散射反射率,相函数参数的 MODTRAN, LOW TRAN, 5S等软件结合起来使用的结果。

正演时采用的输入数据包括:观测波长范围

(0.62—0.67 $\mu\text{m}$ ),中纬度冬季大气廓线类型 ( idam =3),自定义的均一地表背景反射率 ( isalb=0),太阳天顶角 ( SZA),光谱模式数据集 ( modtran3),反演得到的光学厚度,  $R_{\text{e}_{\text{ground}}}$ 反射率值。输出给定波段的总向下和总向上辐射通量在给定波段的积分量,进而计算得到大气层顶接收到的雾区反射率。4个相应站点的正演结果与 MODIS观测结果见表 1。

表 1 卫星观测值与 SBDART 正演大气层顶接收到的雾区总反射率值对比表  
Table 1 Satellite albedo compared with planetary albedo from SBDART model

站点名称	光学厚度	地表反射率	太阳天顶角 /(°)	卫星接收到的 反射率	SBDART正演大气层 顶雾区反射率	反演结果 误差对比 /%
哈巴河	2.96	0.061	60.3	0.312	0.335	7.2
阿勒泰	2.54	0.076	60.4	0.288	0.318	10.4
福海	2.38	0.044	60.2	0.262	0.295	12.5
阿克达拉	3.23	0.068	60.1	0.323	0.343	6.4

一般在光学厚度小于 5 的情况下,二流模式与使用 Henyey-Greenstein 函数描述米氏散射的辐射传输模式的数值解比较,误差大约为 1%<sup>[12]</sup>,能够保证精度。但太阳天顶角接近 30°时误差加大,大于 60°误差有时 would 达到 20%<sup>[12-13]</sup>。本例比较的二者之间误差达到 10%左右,太阳天顶角偏大是其原因之一。表 1 的结果说明,以 SBDART 模式为参照,本例反演能见度用的  $\tau$  值误差在 10%左右 (反演能见度时假设大雾均匀,各向同性。 )。

按地面气象观测规范的规定,气象能见度是指视力正常的人在当时天气条件下,能够从天空背景中看到和辨认出目标物 (黑色,大小适度) 的最大水平距离。气象能见度仅取决于大气的消光系数,在大气为水平均一情况下,可以由柯喜密什 (Koschmieder) 公式<sup>[14]</sup>求得能见度。

$$VIS=1/\beta_{\text{ext}}\cdot\ln(1/\epsilon)$$
 (6)

式中  $\beta_{\text{ext}}$  为消光系数,可以表示为单位距离内相对光辐射能量的变化率,如下式:

$$\beta_{\text{ext}}=\Delta\tau/\Delta z$$
 (7)

输入雾区的垂直厚度与光学厚度,用上式即能计算出雾区的消光系数。当假设一个视力正常的观察员在绿光 (0.55 $\mu\text{m}$ ) 照射下,以天空为背景观察足够大的黑体目标时,  $\epsilon=0.02$ 。则 (5) 式可以简化为

$$VIS=\frac{3.91}{\beta_{\text{ext}}}$$
 (8)

虽然在实际工作中上述假定并不能全部满足, (C)1994-2021, China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文献 [14]表明在一般情况下,上式计算能见度的误差可控制在  $\pm 10\%$  以内。

图 7 是反演大雾的地面能见度图像,结果显示:谷地边缘的坡地和雾区东部大雾地面能见度较差,在 350m 以下。河谷中部相对能见度较好,在 450—700m。南部,戈壁边缘地区最好在 800m 以上。

反演结果与能够取得的地面观测对比 (表 2) 显示,其分布趋势和观测资料一致,地面观测的能见度小值也是反演中的小值 (如:阿勒泰和阿克达拉)。4 个站中只有阿勒泰在谷地边缘坡地上,其能见度最低。阿克达拉,福海站东、西临近,附近有乌伦古湖和吉力湖,福海站位于雾区边缘,其西侧紧邻能见度 900m 的高值区,到 14 时福海站测得能见度值明显提高。哈巴河在谷地中央最低部,能见度相对较高,反演误差相对较大。由于地处北疆偏远地区,测站稀少,资料对比存在不足。但这 4 个站的反演结果还是能够部分看出这种方法的有效性。

表 2 能见度反演结果与实际观测对比表 (单位: km)

	地面观测值		反演结果值
	11 时	14 时	12 时 45 分
哈巴河	0.6	0.8	0.504
阿勒泰	0.3	0.3	0.395
福海	0.6	3	0.598
阿克达拉			

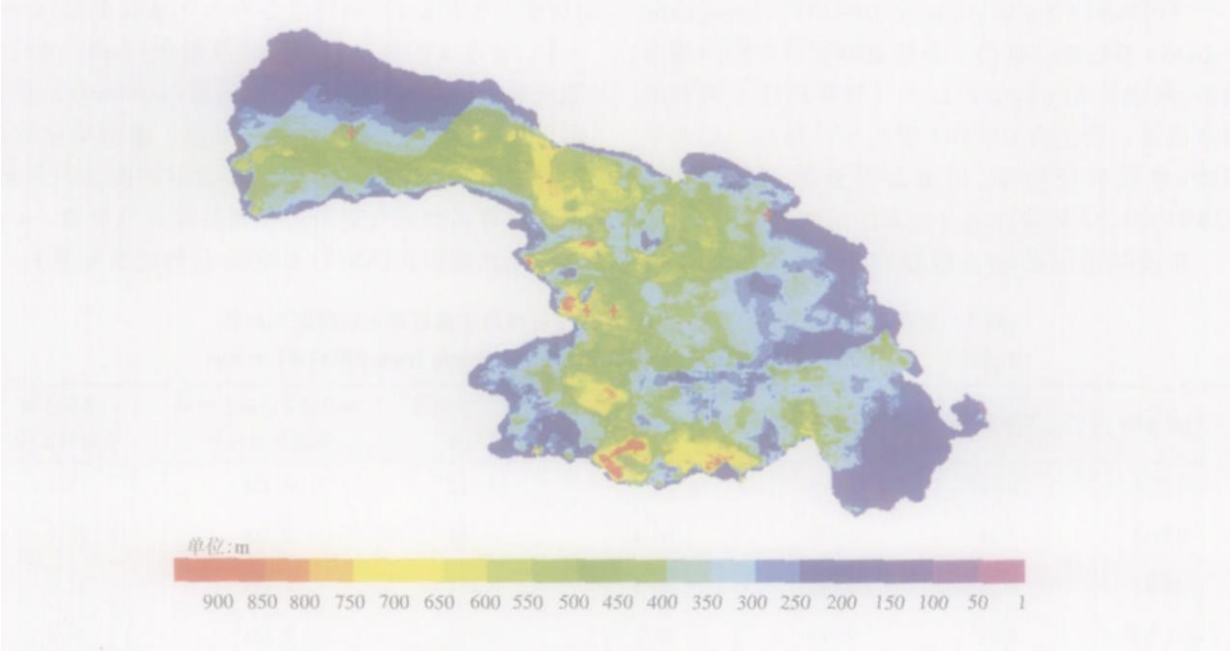


图 7 大雾区域地面能见度  
(图中 4 个红色十字自左向右依次代表:哈巴河、福海、阿克达拉和阿勒泰测站的位置)  
Fig 7 Retrieval result of fog region visibility distribution  
(Red Cross represents four stations from left to right Habahe Fuhai, Akedala Aletai)

4 雾区垂直总水汽含量 (LWP)和雾滴有效半径

垂直总水汽含量和雾滴有效半径是描述云雾光学特性的一个重要参数。理论推导与实际观测结果的对比显示:在可见光波段,垂直总水汽含量和云雾滴有效半径与光学厚度有很强的相关性<sup>[8,9]</sup>。另外,与船载 C 波段微波雷达以及其他空基微波探测器 (如 SSM /D)数据反演的垂直总水汽含量和云滴有效半径结果对比证明:可见光波段和微波探测反演的结果基本一致<sup>[15,16]</sup>,由于环境和气象卫星可见光波段探测的高时空分辨率,有利于陆面云参数的反演,因此有很好的应用价值。

云的短波辐射光学厚度、雾滴粒子有效半径都与垂直总水汽含量有直接关系,在层云情况下,上述三者之间的关系可以近似表示为<sup>[8]</sup>:

$$LWP \approx \frac{4\tau_N r_e \rho}{3Q_{ext}} \tag{9}$$

式中, LWP 为单位面积的垂直总水汽含量,  $Q_{ext}$  为消光效率,  $r_e$  为雾滴粒子的有效半径,  $\rho$  为液态水密度,  $\tau_N$  为大雾光学厚度。

从 Mie 散射理论得到的 LWP 与云雾光学厚度

的最小平方差拟合曲线和相关关系式<sup>[8]</sup>可以用来解 LWP。统计反演所得本次大雾 LWP 含量分布情况如图 8。

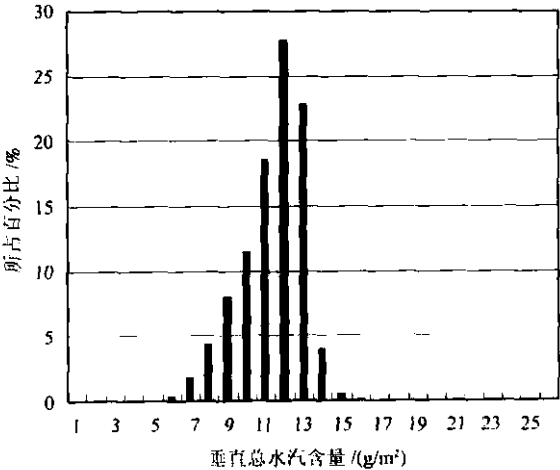


图 8 雾区垂直总水汽含量统计图  
Fig 8 LWP statistical map

结果显示, LWP 峰值在  $12\text{ g/m}^2$ , 范围从  $6\text{--}16\text{ g/m}^2$ 。欧洲多年 AVHRR 大雾资料反演 LWP 结果值显示<sup>[6]</sup>,其范围主体在  $3\text{--}55\text{ g/m}^2$ 。本次反演结果与其相比,属于比较低的水平。国内多年大气探测资料显示,中国大雾水汽含量分布有内陆小,

沿海大的趋势。本例的偏低属于正常情况。

雾滴粒子的有效半径 ( $r_e$ )是与大雾光学特性最相关的特征尺度。由下式表示<sup>[15]</sup>:

$$r_e = \frac{\int_0^\infty r^3 n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 n(r) dr} \tag{10}$$

式中,  $n(r)$ 是雾滴谱数密度分布函数,  $r$ 是雾滴粒子半径。

由于太阳光的散射依赖于粒子的横截面面积,而与粒子的数密度分布相关性小<sup>[18]</sup>。所以大雾分布的光学特性多与  $r_e$  相关,从可见光波段探测数据可以推导出  $r_e$ <sup>[15]</sup>。由公式 (8),当粒子半径远大于观测波长时,  $Q_{ext}(x) \approx 2$ 。  $\rho=1$ 。可以推导出

$$r_e = \frac{3}{2} \times \frac{LWP}{\tau} \tag{11}$$

反演所得到的结果显示 (图 9),本次大雾雾滴有效半径分布范围广,在 4—50 $\mu\text{m}$  范围内。滴谱谱型为单峰结构,峰值在 30 $\mu\text{m}$  附近。何友江等重庆冬季大雾观测结果也显示郊区雾滴直径是市区的 2 到 3 倍,最大直径有 22.4—103.6 $\mu\text{m}$ <sup>[19]</sup>。对中国大雾多年微物理结构研究<sup>[17]</sup>发现,雾滴尺度与污染程度密切相关。近年来由于污染程度日益严重,中国中东部地区,雾滴尺度只有 30 年前的几分之一,甚至十几分之一。本次大雾发生在基本没有污染的新疆北部地区。尺度与欧洲十几微米的内陆雾尺度<sup>[5]</sup>相比是较大的,但有其合理性。由于当时没有做实测工作,以后需进一步研究。

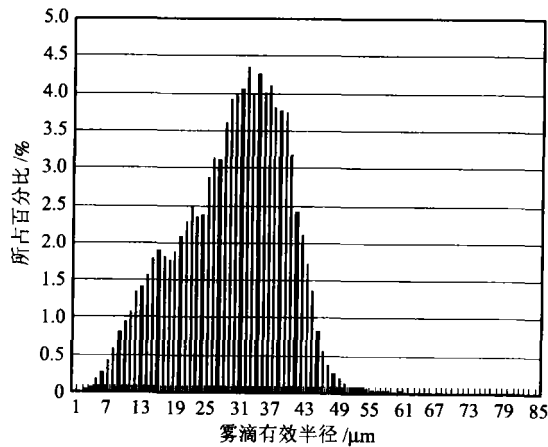


图 9 雾滴有效半径统计结果图  
Fig 9 Fog radii statistical map

本文在有关大雾微物理结构参数反演方面只是做了局地的研究工作,进一步总结需要在处理更多资料基础上逐步完成。

5 结 论

MODIS 卫星资料对于反演大雾的地面能见度及微物理特征是非常有用的,新疆北部大雾遥感信息的定量反演,只是这方面应用前景的一个证明。

本文将 DEM 与遥感数据相结合并在天气现象探测方面做了尝试。在得到有用数据的同时,也为层云和大雾的区分判识提供了思路。大雾过程多与地形有较好的匹配,这一点是层云一般所不具备的。

能见度的反演,在能够对比的几个样本点上,已经显示出了令人鼓舞的准确性。当然由于探测器的局限和大气的非理想状态等因素影响,反演的误差在所难免。对于经济正处于起飞阶段的中国,探测手段相对不足,大雾遥感的应用和研究相对较少,而雾灾又频繁发生,卫星遥感监测应用的相对低成本和高覆盖正可以弥补这些缺陷。

微观物理特性的反演是未来大雾遥感的发展方向。LWP 和  $r_e$  的反演,对于一些地区的雾中取水以及近年来兴起的大雾生态系统保护工作,在提供科学依据方面能起到一定作用。

致 谢 新疆维吾尔自治区气象局沙依然同志提供了气象加密地面观测数据,在此表示感谢。

参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Anderson R K, Ashman J P, Bittner F, et al. Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting[ R]. ESSA Tech. Report 51. Supplements 1971, 1973.

[ 2 ] Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. Detection of Fog at Night Using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Imagery[ J]. Met. Mag., 1987, 113: 266—271.

[ 3 ] Ellrod G P. Advances in the Detection and Analysis of Fog at Night Using GOES Multispectral Infrared Imagery[ J]. Wea. Forecasting, 1995, 10: 606—619.

[ 4 ] ANTHIS A I. Use of Satellite Images for Fog Detection (AVHRR) and Forecast of Fog Dissipation (METEOSAT) over Low land Thessalia, Hellas[ J]. Remote Sensing, 1999, 20(6): 1107—1124.

[ 5 ] Bendix J. Observing Fog from Space: a European Example[ A]. Proc. 1st International Conference on Fog and Fog Collection [ C]. 1998.

[ 6 ] Bendix J. A 10-years Fog Climatology of Germany and the Alpine Region Based on Satellite Data: preliminary Results[ A]. Proc. 2nd International Conference on Fog and Fog Collection [ C]. 2001.

[ 7 ] Stephens G L. Radiation Profiles in Extended Water Clouds[ J].



Theory[J]. J Atmos Science 1978, **35**: 2111—2123

[ 8 ] Stephens G L. Radiation Profiles in Extended Water Clouds II: Parameterization Schemes[J]. J Atmos Science 1978, **35**: 2123—2132

[ 9 ] Stephens G L. Radiation Profiles in Extended Water Clouds III: Observation[J]. J Atmos Science 1978, **35**: 2132—2141

[10] Zhu Q G, Lin J R, Shou S W. Theory and Method of Synoptic Meteorology[M]. Beijing: Meteorology Press, 1981. [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1981.]

[11] Wu X J, Zheng X J, Li S M. Utilizing MODIS and Geography Information System (GIS) Data to Monitoring Fog in North West China[J]. Submitted to Remote Sensing for Land & Resources China [吴晓京, 郑新江, 李三妹. MODIS与地理信息系统(GIS)数据结合探测新疆北部大雾(投稿)[J]. 国土资源遥感. ]

[12] Coakley J A, Chylek P. The Two Stream Approximation in Radiative Transfer: Including the Angle of the Incident Radiation [J]. J Atmos Sci, 1975, **32**: 409—418

[13] Stephens G L. A Shortwave Parameterization Revised to Improve Cloud Absorption [J]. J Atmos Science 1984, **41**: 687—690

[14] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. [盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.]

[15] Greenwald J G, Christopher S A. The GOES IM Imagers: New Tools for Studying Microphysical Properties of Boundary Layer Stratiform Clouds[J]. Bull Am Meteorol Soc, 2000, **81**: 2607—2619

[16] Greenwald T H, Vonder Haar Jackson D L. A Physical Retrieval of Cloud Liquid Water over the Global Oceans Using Special Sensor Microwave/Imager(SSM/I) Observations[J]. J Geophys Res Lett, 1993, **26**: 1723—1726

[17] Li Z H. Studies of Fog in China over the Past 40 Years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, **59**(5): 216—224. [李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J], 气象学报, 2001, **59**(5): 216—224.]

[18] Hu Y X, Stamnes K. An Accurate Parameterization of the Radiative Properties of Water Clouds for Use in Climate Models [J]. J Climate 1993, **6**: 728—742

[19] He Y J, Zhu B, Ma L. The Physical Process of Chongqing Fog's Genesis and Dissipation in Winter[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, **26**: 822—828. [何友江, 朱彬, 马力. 重庆市冬季雾生消的物理特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, **26**: 822—828.]

Utilizing MODIS Data to Retrieve the Visibility and Microphysical Properties of Fog Happens in the Northwest China

WU Xiao-jing<sup>1,2</sup>, CHENG Yun-hao<sup>1</sup>, LI San-mei<sup>2</sup>,

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract** The visibility, effective radii and liquid water path (LWP) of fog are the fundamental parameters for fog monitoring. This paper uses the data from MODIS and digital elevation model (DEM) of geographic information system (GIS) to obtain the fog geometrical thickness. Meanwhile, proper algorithms are used to calculate the horizontal visibility. Through testing the example of the fog in Northwest of China, there are a validated result through comparing the visibility of conventional observation, and the encouraging accuracy have been proved. The other parameters, such as effective radii and liquid water path (LWP), have been obtained. The former sounding and remote sensing result have shown that it has a true trend. All these show the retrieving method is valid for remote sensing fog in Northwest of China.

**Key words** MODIS; fog; geometrical thickness; visibility; effective radii; LWP