

卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用*

刘健^{1,2)} 董超华²⁾

(¹⁾北京大学大气科学系,北京,100871;

²⁾国家卫星气象中心,北京,100081)

摘要 选取 NOAA 卫星 AVHRR 通道 3(3.55~3.93 μm)观测资料,分析云顶粒子的物理性质,并用地面雨量和雷达观测资料对卫星反演分析结果进行验证.分析结果显示通道 3 反射率小,云顶粒子尺度大时易产生降水.当云层为单一层次时,通道 3 的反射率小值区与雷达回波区间具有良好的对应关系,证实了在降水过程中卫星分析云顶粒子尺度结果与雷达观测一致.

关键词 云顶粒子,反射率,亮度温度

USING SATELLITE DATA TO ANALYZE PROPERTIES OF CLOUD PARTICLES SIZE ON THE TOP OF CLOUD*

LIU Jian^{1,2)} DONG Chao-Hua²⁾

(¹⁾Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871, China;

²⁾National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract Physical properties of cloud particles on the top of cloud were analyzed by NOAA/AVHRR channel 3(3.55~3.93 μm) data. Radar and precipitation data were used to validate the analysis results. It was showed that clouds with smaller reflectivity at channel 3 and with bigger size were easy to rain. It was found that there was good corresponding relationship between small reflectivity at channel 3 and radar echo when cloud is a single layer. It was testified that the result of size analyzed from satellite was the same as that from radar data during precipitation.

Key words cloud particles on the top; reflectivity; brightness temperature.

引言

云在全球大气环流和各种尺度的天气气候系统中起着重要的作用.大气的运动及其温湿度的分布支配着云的形成、尺度、含水量及其发展过程和持续时间,进而影响降水的分布.云中水滴的物理状态决定了云的谱型.从大气物理学中可知,自然降水是在热力动力学宏观条件和微物理过程综合作用下形成的.所谓微物理过程是指初始降水粒子出现和长大的过程.所以对云顶粒子微物理性质的研究有助于对降雨过程的研究.

Pilewskie^[1]等人的早期研究已指出:利用红外光谱上的一些反射太阳辐射波段可以获取到关于云顶粒子微物理性质及相关降水过程的信息.如在 1.6 μm 、2.3 μm 、3.7 μm 等波长上,云中大部分吸收

发生在大粒子区的同时,云中一般的小粒子,由于其大小与波长相接近,对辐射有较强的散射. Rosenfeld^[2,3]等人利用 NOAA/AVHRR 的 3.7 μm 资料分析云顶粒子的尺度和相态,并把分析结果用于降水预报、降雨面积和降雨强度估计等方面的研究,研究结果说明 3.7 μm 的辐射中确实包含有降水云云顶粒子物理状态的信息. Arking^[4]等人的研究同样证明了 3.7 μm 的探测值为云中粒子的尺度和相态特征提供了重要信息.

在天气预报的实际应用中,许多作者利用可见光和红外卫星云图所反映的云系的轮廓等宏观特征对降水云进行研究,而较少应用不同通道象元的测值研究降水过程的云系微观性质.

本文利用 1998 年 6 月 29 日~7 月 3 日江淮流域的一次特大暴雨过程中的 7 月 1 日 NOAA/

* 国家重点基础研究基金(批准号:G1998040909)资助项目
稿件收到日期 2001-11-15,修改稿收到日期 2002-02-15

* The project supported by the Foundation of State Key Basic Research of China(No. G1998040909)
Received 2001-11-15, revised 2002-02-15

AVHRR的 $3.7\mu\text{m}$ 观测资料,进行云顶粒子尺度特征的分析,并揭示 $3.7\mu\text{m}$ 资料在暴雨分析中的应用价值。

1 计算原理

当大气的光学厚度很厚时,反射函数的理论计算值应与厚层情况下的渐近理论表达式相一致^[5]。当大气的反射辐射为各向同性时,反射函数 $R(\tau_c; \mu, \mu_0, \Phi)$ 代表了介质的反射率,因而,反射函数可由反射辐射的测量值获得。

反射函数 $R(\tau_c; \mu, \mu_0, \Phi)$ 可表达为反射辐亮度 $I(0, -\mu, \Phi)$ 与入射的太阳通量 F_0 之比:

$$R^{\lambda}(\tau_c; \mu, \mu_0, \Phi) = \frac{\pi I^{\lambda}(0, -\mu, \Phi)}{\mu_0 F_0(\lambda)}, \quad (1)$$

式(1)中 τ_c 是大气(或云)的光学厚度, $\mu_0 = \cos\theta_0$, θ_0 是太阳方位角, $\mu = |\cos\theta|$, θ 是方位角, Φ 是射出辐射和入射太阳辐射之间相对方位角。

对于兰勃托面上的散射守恒大气,厚层大气的反射函数可写为

$$R(\tau_c; \mu, \mu_0, \Phi) = R_{\infty}(\mu, \mu_0, \Phi) - \frac{4(1 - A_{\text{ground}})K(\mu)K(\mu_0)}{[3(1 - A_{\text{ground}})(1 - g)(\tau_c + 2q_0) + 4A_{\text{ground}}]}, \quad (2)$$

式(2)中 $R_{\infty}(\mu, \mu_0, \Phi)$ 是半无限大气的反射函数, $K(\mu)$ 是逃逸指数, A_{ground} 是地表反射率, g 是不对称因子, q_0 是散射守恒的外推长度。

渐近理论表明厚层大气的反射性质主要与光学厚度 τ_c 和相似参数 s 有关,并与 A_{ground} 相关。其中 s 可写为

$$s = \left(\frac{1 - \omega_0}{1 - \omega_0 g} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式(3)中的 ω_0 为散射比,可写为

$$\omega_0 = \beta_s / \beta_e, \quad (4)$$

式(4)中 β_s, β_e 分别是容积散射系数和容积消光系数,它们的定义为

$$\beta_s = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_s \frac{dn(r)}{dr} dr, \\ \beta_e = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_e \frac{dn(r)}{dr} dr; \quad (5)$$

式(5)中 σ_s, σ_e 是单个粒子的散射系数和消光系数, $n(r)$ 是粒子分面, r 是粒子半径。由式(4)和式(5)可推知 ω_0 与粒子半径相关。可定义粒子的有效半径 r_e 为^[7]

$$r_e = \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr. \quad (6)$$

根据式(3)~式(6),可知散射比代表在单次散射过程中光束遭受散射的百分比。我们利用Mie理论计算的有效粒子半径在 $3.0 \sim 4.0\mu\text{m}$ 波段间 ω_0 随波长的变化(见图1)。从图1中可见,在 $3.5 \sim 4.0\mu\text{m}$ 波段间,随粒子有效半径的增大,粒子的 ω_0 减小。King^[8]等人利用渐近理论计算水云粒子的球面反照率随波长的变化(见图2)。图2清楚地显示出在 $3.5 \sim 4.0\mu\text{m}$ 波段间,粒子的有效半径越大,反照率越小。对比图1和图2可知,两张图均说明粒子的有效半径越大,粒子的散射辐射能力越小。

2 实例与分析

2.1 卫星资料

NOAA卫星的AVHRR资料有五个探测通道,通道1($0.58 \sim 0.68\mu\text{m}$)和通道2($0.9 \sim 1.2\mu\text{m}$)是太阳反射光探测通道,可提供下垫面(包括云和地面)反射太阳辐射的信息。通道4($10.3 \sim 11.3\mu\text{m}$)和通道5($11.5 \sim 12.5\mu\text{m}$)位于下垫面红外辐射区。通道3($3.55 \sim 3.93\mu\text{m}$)的测值中既有太阳反射光信号,又有下垫面辐射的贡献。太阳反射辐射和红外辐射通道一起提供了云顶温度、云的厚度及云顶附近水滴物理状态的信息,其中通道3的测值对云中水滴的几何尺度和相态状况提供了重要的信息。

白天 $3.7\mu\text{m}$ 波长包含有太阳光的反射和下垫面发射的热辐射。对于厚的云层,忽略云层下的向上辐射,而近似地认为卫星上的接受辐射中只包含有云顶的发射辐射和反射的太阳辐射。 $3.7\mu\text{m}$ 波长的反射率 A_3 计算公式为^[9]

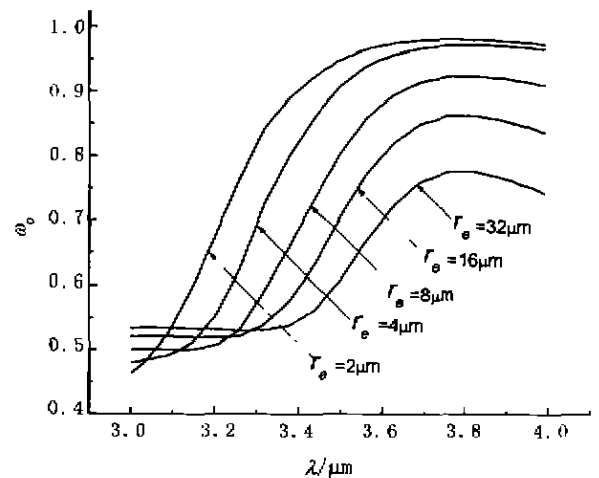


图1 不同有效粒子半径的单次散射反照率随波长的变化
Fig. 1 Single-scatter albedo as a function of wavelength for selected values of the effective radius of cloud droplets

$$A_3 = \pi R_3 / [\cos(Z_0) * (D_0/D)^2 * S_0],$$

$$R_3 = B(T_3) - B(T_{3e}),$$

$$T_{3e} = aT_4 - bT_5 - C. \tag{7}$$

式(7)中 S_0 是 $3.7\mu\text{m}$ 波长上的太阳辐射, Z_0 是太阳天顶角, $(D_0/D)^2$ 是平均日地距离, B 是 Planck 函数, T_3, T_4, T_5 是 NOAA/AVHRR 的通道 3、4 和通道 5 的亮度温度, a, b, c 是系数, 在 SST(海洋表面温度)的反演中得到, 取 $a = 2.706, b = 1.716, c = 1.272$.

Rosenfeld^[2,3] 等人在不同波长、不同粒子有效半径、不同相态和不同观测角的初始条件下, 利用辐射传输模式计算云在波长为 $3.7\mu\text{m}$ 的反射率. 计算结果表明: 对于水云, 当 $A_3 < 0.02$ 时, $r_e > 25\mu\text{m}$; 当 $0.02 < A_3 < 0.06$ 时, $15\mu\text{m} < r_e < 25\mu\text{m}$; 当 $0.06 < A_3 < 0.18$ 时, $7\mu\text{m} < r_e < 15\mu\text{m}$. 对于冰云, 当 $A_3 < 0.02$ 时, $r_e > 20\mu\text{m}$; 当 $0.02 < A_3 < 0.06$ 时, $10\mu\text{m} < r_e < 20\mu\text{m}$. 这就说明无论水云还是冰云, 都具有随 A_3 增大, 粒子有效半径减小的特征.

2.2 计算结果分析

以 1998 年 6 月 29 日~7 月 3 日在江淮地区发生的一次强暴雨过程为例, 我们选取 7 月 1 日的 NOAA/AVHRR 资料, 卫星资料覆盖范围是北纬 $29.89^\circ \sim 35.0^\circ\text{N}$, 东经 $114.0^\circ \sim 119.11^\circ\text{E}$. 利用式(7)计算逐个象元在波长 $3.7\mu\text{m}$ 的反射率, 其反射率用图像方式表示, 反射率越大, 图像的灰度值越大, 图像越白亮. 由于我们的分析工作只针对云区, 因此当象元中云的光学厚度比较小(我们定义为 NOAA/AVHRR 的通道 1 反射率 $< 40\%$)时, 不再计算象元在 $3.7\mu\text{m}$ 的反射率, 且用白色表示.

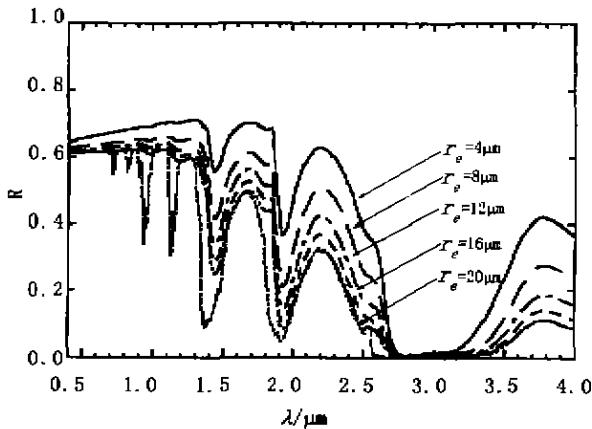


图 2 不同大小云粒子球形反照率随波长的变化
Fig.2 Cloud spherical albedo as a function of wavelength for selected values of the effective radius of cloud droplets

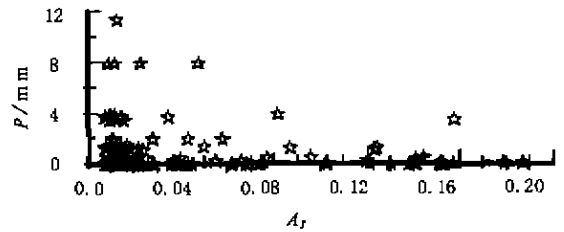


图 3 地面观测雨量站与所在位置像素的 $3.7\mu\text{m}$ 反射率散点图
Fig.3 Scatter diagram of precipitation and reflectivity at $3.7\mu\text{m}$ of pixels

我们还用了淮河观测试验(HUBEX)的雷达资料对本研究结果进行检验. 由于雷达回波强度的大小和球形降水粒子半径 6 次方成正比, 因此粒子尺度越大, 雷达回波越强. 但天气雷达主要用来测量降水和云内含有降水粒子的部分, 因此并不是所有的云均对雷达产生影响, 所选用的雷达资料是阜阳测站($32^\circ 55'\text{N}, 115^\circ 55'\text{E}$)的 713 雷达的 250km 的 PPI 资料. 在雷达回波探测图像中, 颜色越暗, 表示雷达回波强度越强, 白色表示无雷达观测资料. 雷达图像中黑色圆圈表示雷达观测范围.

图 3 是 69 个地面小时雨量观测站, 及各站相应经纬度位置上卫星 $3.7\mu\text{m}$ 反射率和地面小时雨量的散点图. 由图 3 可见: 降水时, 大约 95% 的地面雨量站对应象元的 $A_3 < 0.08$, 当反射率 > 0.12 时, 地面测站基本无降雨量. 根据上述理论计算可知, 降水过程中云顶基本由大粒子组成.

图 4 是 7 月 1 日卫星观测的可见光云图, 图 5 是同一时次的红外云图. 图 6 是计算通道 3 反射率图像, 图 7 是雷达观测图像. 为便于说明, 在雷达观测有效范围内(黑色圆圈内), 划分出 3 个区, 分别以 A、B、C 表示, a、b、c 表示三条射线与大圆的交点.

目视通道 1 反射率图像和通道 4 亮度温度图像, 发现 ab 弧所对应的扇形区的 A 中无对流云团存在, 云的结构松散, 云很薄. 对比通道 3 反射率图

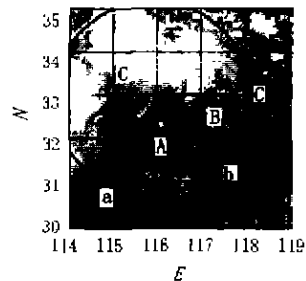


图 4 NOAA/AVHRR 通道 1 反射率
Fig.4 Reflectance image at channel 1 of NOAA/AVHRR

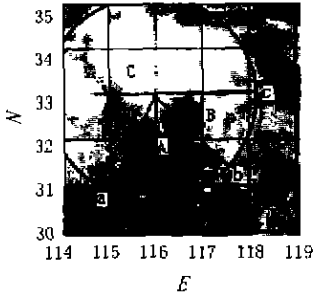


图5 NOAA/AVHRR 通道4亮度温度
Fig 5 Brightness temperature image
at channel 4 of NOAA/AVHRR

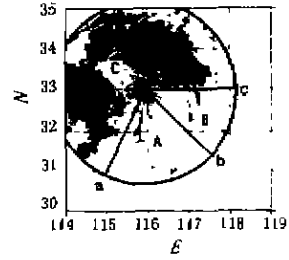


图7 雷达回波图
Fig 7 Radar echo image

像(见图6)和雷达回波图像(见图7)发现:因A区中云的光学厚度达不到通道3反射率反演计算标准,故在通道3反射率图像上以白色表示.在雷达回波图像上,A区无雷达回波信号.

在通道1和通道4图像上均可看到在ac大弧所对应的扇形C区中存在有若干个对流云团,且云层较厚,对应在通道3反射率图像上是一片反射率小值区.C区中大部分云在雷达观测图像上出现回波.如在114~115°E,33°N附近的对流云团,在雷达图像上是一个比较强的回波区(>25dB),同时它在通道3上的反射率又很小(<0.02).

分析图4中bc弧所对应的扇形B区可知,该区中的云是C区对流云的外围卷云,具有亮度温度较低,反射率较大的特性.对比通道3反射率和雷达观测,可以发现B区中大部分具有通道3反射率小值的云区在雷达图像上没有回波.

为了进一步说明通道3反射率与雷达回波之间的对应关系,我们首先在雷达扫描的范围内取一个剖面,在上面进行两种观测数据的对比分析.图8是在雷达扫描范围内沿东经115°剖面上各纬度像元的雷达回波和通道3反射率的对应关系图.从图8中可以看出在剖面上除34.0°N附近的像元外,大部分像元的反射率<0.02.在34.0°N附近的像元

(位于纬度33.92,33.96,34.01°N的像元)与其它像元相比,通道1反射率略小(<50%),亮度温度略高(>260K),可能是造成在通道3上的反射率较大的原因.从通道3的反射率可说明剖面上像元总体尺度较大.剖面上像元最强的雷达回波为53dB.最弱的雷达回波强度为16dB.这证实具有通道3反射率小值的有云像元,其粒子尺度较大.

利用探空资料分析通道3反射率小值的大云粒子,不出现雷达回波的原因.在通道3反射率较小,但无雷达回波的区域中选择阜阳(32.93°N,115.83°E)探空站,和徐州探空站(34.28°N,117.15°E).站点所在位置象元的3.7μm反射率<0.02.从探空资料(见图9)中,发现低层大气和高层大气较湿,但两层中间有一干层,说明站点上空存在多层云.所选的可见光和红外探测通道无法穿透云,3.7μm反射率只反映云顶粒子的状况.当存在多层云时,所用的卫星探测通道只能获取云顶的信息.而天气雷达的测云能力受到多种因素的影响,并不是所有的云均能探测到,这可能就是造成卫星和雷达观测数据间不匹配的主要原因.

从上面的分析可见,在7月1日在降雨过程中,降雨云顶粒子的尺度始终较大.

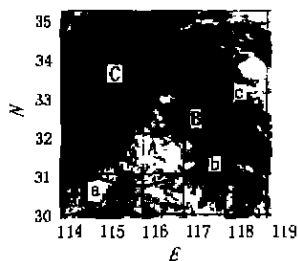


图6 3.7μm的反射率图
Fig.6 Reflectance image at 3.7μm

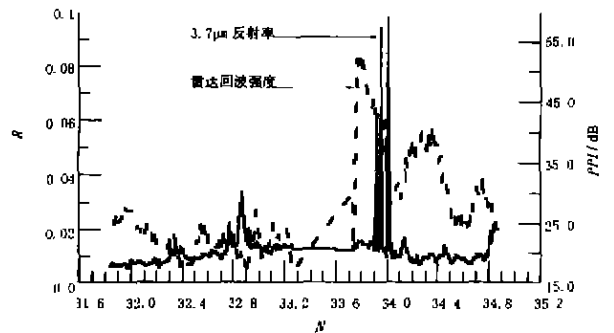


图8 沿东经115°的雷达扫描范围内各纬度上像元的雷达回波和3.7μm反射率

Fig.8 Reflectance at 3.7μm and radar echo of pixels for selected latitude along 115°E

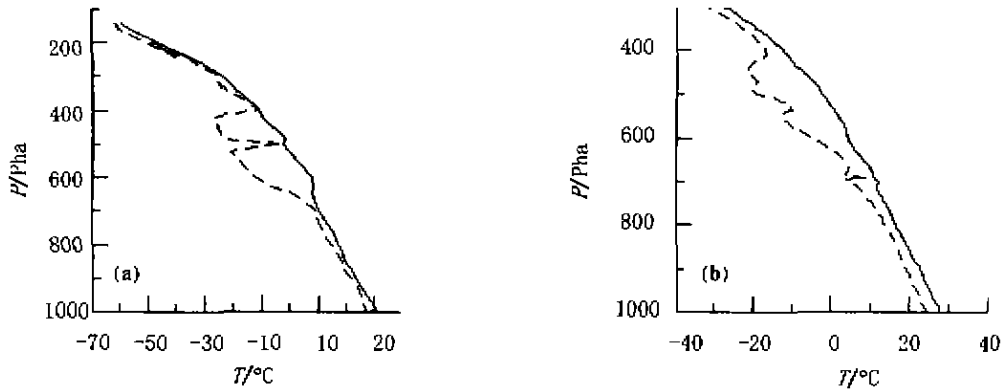


图9 探空温度(实线)和露点温度(断线)

Fig. 9 Temperature of radio soundtog(solid)and dew point(dash)

3 讨论

从辐射传输理论可知, $3.7\mu\text{m}$ 的反射率与云粒子的大小密切相关, 云粒子的尺度越大, 粒子在 $3.7\mu\text{m}$ 上的反射率越小. 由此, 我们可以通过 $3.7\mu\text{m}$ 的辐射反射信息和其它探测波长的辐射、反射信息的对比分析, 可知云顶粒子的物理性质.

利用 NOAA/AVHRR 资料对 1998 年 7 月 1 日的降雨过程中云顶粒子的微物理性质进行分析, 可知降水过程中, 云顶一直由尺度较大的粒子组成.

用雷达回波资料和地面降水量对卫星分析的暴雨过程的云顶粒子尺度分析进行了验证, 表明云顶大粒子区是易产生降水的区域. 当雷达观测时间与卫星观测时间相近, 且云为单一层次时, $3.7\mu\text{m}$ 的反射率小值区和雷达强回波区的空间位置匹配良好, 说明 $3.7\mu\text{m}$ 的反射率的小值区确实是云顶大粒子区.

由于可见光和红外探测通道不能穿透云, 其信息主要来自云表层, 因此揭示的仅是云顶的物理特征; 另外, 用地面测值包括使用雷达资料检验本研究结果的精度受到一定限制, 这是由于不同观测信息系统的位置、时间和观测方向间存在差异.

REFERENCES

[1] Pilewskie P, Twomey S. Discrimination of ice from water

in clouds by optical remote sensing. *Atmo. Res.*, 1987, **21**:113—122

[2] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data. *Atmo. Res.*, 1994, **34**:259—283

[3] Lensky M M, Rosenfeld D. Estimation of precipitation Area and rain intensity based on the microphysical properties retrieved from NOAA AVHRR data. *J Appl. Meteor.*, 1997, **36**:234—242

[4] Arking A, Childs J D. Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite images. *J. Clim. Appl Meteorol.*, 1985, **20**:1301—1311

[5] King M D. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J. Atmo. Sci.*, 1987, **44**:1734—1751

[6] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements, part I: theory. *J. Atmo. Sci.*, 1990, **47**:1878—1893

[7] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.*, 1974, **16**:527—610

[8] King M D, Menzel M P, Grant P S, et al. Airborne scanning spectrometer for remote sensing of cloud, aerosol, water vapor and surface properties. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1996, **13**:777—794

[9] Stowe L L, McClain E P, Carey R, et al. Global distribution of cloud cover derived from NOAA/AVHRR operational satellite data. *Adv. Space Res.*, 1991, **11**:351—354