

AVHRR 卫星资料在层状云降水区
判识中的应用^①

刘 文 王以琳

赵玉金

(山东省人民政府人工降雨办公室, 济南 250031)

(山东省气象中心)

提 要

利用美国新一代极轨气象卫星 AVHRR 资料, 分析了新增加的 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$ 近红外 3A 通道资料在地面降水区判识中的作用及降水云和非降水云的图像特征。发现通道 1 可见光通道反射率与通道 3A 近红外通道反射率的差值能够较好地反映地面降水的信息, 并给出了与地面降水几率的关系。探讨了应用可见光、近红外通道资料综合识别地面降水区的方法, 实例验证具有较高的判别精度。

关键词: AVHRR 资料 层状云 降水区判识

引 言

降水是人们普遍关心的最基本的气象参数之一, 尽管目前的气象卫星探测器还不能直接、有效地对地面降水进行监测, 但由于降水的重要性和用户对降水信息要求的迫切性, 利用卫星遥感资料识别降水区及定量估计降水量一直是国内外卫星气象工作者积极研究的课题。其研究主要是利用红外亮温资料对对流云产生的强降水进行估计, 稳定性层状云降水强度小, 对其研究得也比较少。另外, 随着人们对水资源短缺问题的认识, 合理开发空中云水资源成为解决水资源不足的重要科技手段, 目前我国已有 20 个省、自治区、直辖市和计划单列市开展飞机人工增雨(雪)作业^[1], 其作业目标云以稳定性降水的层状云系为主。利用时空分辨率较高的气象卫星遥感资料实时监测降水区, 及时准确地掌握层状云系降水特征, 具有十分重要的应用价值。美国业务极轨气象卫星已进入第五代, 自 NOAA-16 卫星起, 改进的甚高分辨率辐射计 AVHRR/3 正式提供观测资料。与原来的 AVHRR/2 仪器相比, 主要是增加了波长为 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$ 的近红外通道,

即 AVHRR/3 的 3A 通道^[2]。本文利用 AVHRR/3 近红外 3A 通道资料, 结合可见光反射率资料, 对稳定性层状云系地面降水区的识别监测进行了尝试, 取得了较好的效果。

1 理论依据

新一代美国 NOAA 极轨气象卫星搭载的改进的 AVHRR/3 有 6 个通道, 通道 1 是波长为 $0.58\sim 0.68\mu\text{m}$ 的可见光通道, 通道 2 是波长为 $0.725\sim 1.10\mu\text{m}$ 的近红外通道, 通道 4、通道 5 是红外通道。通道 3 包括波长为 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$ 的近红外 3A 通道和波长为 $3.55\sim 3.93\mu\text{m}$ 的中红外 3B 通道, 两个通道交替使用, 即白天是 3A 通道资料, 夜间是 3B 通道资料。其中 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$ 是首次增加到 AVHRR 辐射计的新型近红外通道, 对积雪的反映比较敏感, 能够区分低云和雪, 主要用于气象卫星对积雪的遥感监测。刘健等人^[3]利用 SBDART 辐射传递模式计算了云在 FY-1C 通道 6(波长 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$, 相当于 AVHRR/3 近红外 3A 通道)的反射率随云粒子有效半径(r_e)及云光学厚度(τ)的变化(图 1)。从图 1 可以看出该通道反射率随

① 科技部社会公益研究专项资金 2001DIB20104 和国家重点科技攻关项目 2001BA610A-06-11 资助。

云粒子有效半径的变化很明显,云粒子有效半径越大,通道 3A 反射率越小。当云的光学厚度、粒子有效半径都较小时,通道 3A 反射率随光学厚度的增大而显著增大;当云的光学厚度大于 20 后,通道 3A 反射率不再随光学厚度的增大而明显变化,主要随粒子有效半径的增大而显著减小。降水云的光学厚度一般较大,较小光学厚度的云不可能产生降水。因此,对于可能产生降水的云,通道 3A 反射率主要反映了云中粒子的尺度特征,粒子有效半径越大,反射率越小。而通道 1 可见光反射率主要反映了云的光学厚度信息,主要随云光学厚度或云层厚度的增大而增大^[4],与云粒子有效半径的关系不明显。特别当云的光学厚度 τ 较大时,通道 1 反射率几乎与云粒子的尺度无关,基本随光学厚度 τ 呈线性变化。

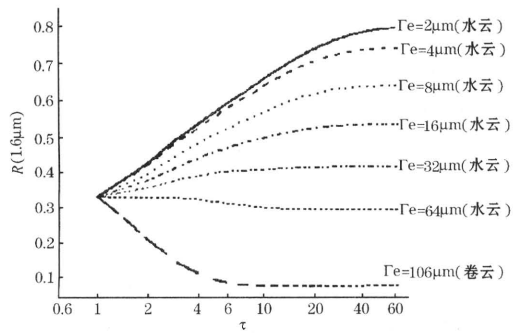


图1 模拟计算的 1.6 μm 通道反射率 R 与云的光学厚度 τ 和云粒子有效半径 Γ_e 的关系

以上分析表明,对于具有一定厚度的可降水云,AVHRR/3 的通道 1、通道 3A 资料分

别反映了云的不同信息。通道 1 可见光通道资料反映了云的厚度信息,通道 3A 近红外通道资料反映了云粒子的尺度信息。可以认为,云体达到一定厚度和云中粒子尺度较大是产生地面降水的基本条件。因此,综合应用 AVHRR/3 的通道 1、通道 3A 通道资料识别降水,既考虑了云的厚度信息,又考虑了云中粒子尺度的信息,可以有效地提高地面降水信息监测的精度。

2 资料

本文分析资料是山东省气象中心极轨气象卫星资料接收系统接收处理的 2002 年春、秋季下午过境的 11 次降水的 NOAA-16 卫星资料,经局地数据集等经纬度投影变换处理,并对反射率资料进行了太阳高度订正。区域范围取 30~40°N、110~123°E,分辨率为 0.01°×0.01°。这些含有通道 3A 资料的卫星过境时间在北京时 13 时 30 分左右,卫星对地扫描资料可以与 14 时地面实况观测资料相匹配。山东省及附近区域春秋两季大多为稳定性层状云降水,其稠密的地面降水实况可由 14 时加密观测天气报获得。考虑到卫星观测的瞬时性,取气象台站 14 时地面加密观测报的现在天气现象报告(包括 13:45~14:00 观测时有降水和 13:00~13:45 观测前 1 小时有降水两种情况)作为与卫星观测时次相匹配的地面降水区资料。共得到地面实况观测资料 4822 个,其中密蔽云区(通道 1 反射率大于 40%)站点 3175 个,降水站点资料 1598 个。资料时次及地面降水情况详见表 1。

表1 NOAA-16 卫星资料时次及地面降水情况

序号	日期	卫星过境时间	实况观测时间	实况观测 站点数	密蔽云区 站点数	降水站 点数
1	4 月 05 日	13 时 39 分	14 时	443	440	362
2	5 月 05 日	13 时 13 分	14 时	444	365	184
3	5 月 06 日	13 时 02 分	14 时	443	362	279
4	9 月 12 日	12 时 52 分	14 时	408	289	84
5	9 月 13 日	14 时 20 分	14 时	436	383	184
6	9 月 14 日	14 时 11 分	14 时	442	201	122
7	9 月 15 日	13 时 59 分	14 时	441	137	66
8	9 月 20 日	13 时 04 分	14 时	440	222	77
9	10 月 17 日	13 时 08 分	14 时	443	151	54
10	10 月 25 日	13 时 19 分	14 时	441	289	100
11	10 月 30 日	14 时 02 分	14 时	441	336	86
合计				4822	3175	1598

3 个例分析

为探讨卫星资料与地面降水区的关系,我们首先分析两个个例。2002年4月5日,受黄淮气旋影响,山东大部及周边省份出现小雨。13时39分 NOAA-16 卫星观测图像和14时地面观测时降水区实况见图2。图2a、b分别为通道1可见光和通道3A近红外云图,色调越白,表示反射率越大;色调越暗,说明反射率越小。在图2a可见光图像上,30~40°N、110~123°E 整个区域为白色调区,表明除个别零星暗区外均被较厚的云层所覆盖;而图2b近红外 CH3A 图像上,山东与河北交界处(A区)、安徽和江苏大部(B区)、河南西南部和湖北西北部(C区)为白色调区,即高反射率区。根据以上的分析,通道3A高反射率区的云粒子有效半径较小,产生地面降水的可能性不大。图2c是14时地面加密观测时正在降水的雨区实况图,可以看出,

通道1高反射率区和通道3A低反射率区的重叠区域与地面雨区(阴影区)有较好的对应,而A、B、C三区云虽然也较厚,但云中粒子的尺度较小,对应地面为无降水区。可以假定,通道1可见光反射率越大(云层越厚),通道3A近红外反射率越小(云中粒子尺度越大),产生地面降水的几率就越大。因此,我们逐个像元计算了通道1反射率与通道3A反射率的差值,图像见图2d,白色调区表示两者差值较大。与图2c相比较,可以清晰地看出,地面降水区与通道1-通道3A的高值区有很好的对应关系,无云区、较薄的云层和未降水的云(如A、B、C三区)在通道1-通道3A图像上为暗色调区。江苏中部的D降水区也与图2d中的白亮D区相对应。说明通道1与通道3A的反射率差可以反映地面降水的信息。

2002年5月5日,受高空槽和低层切变

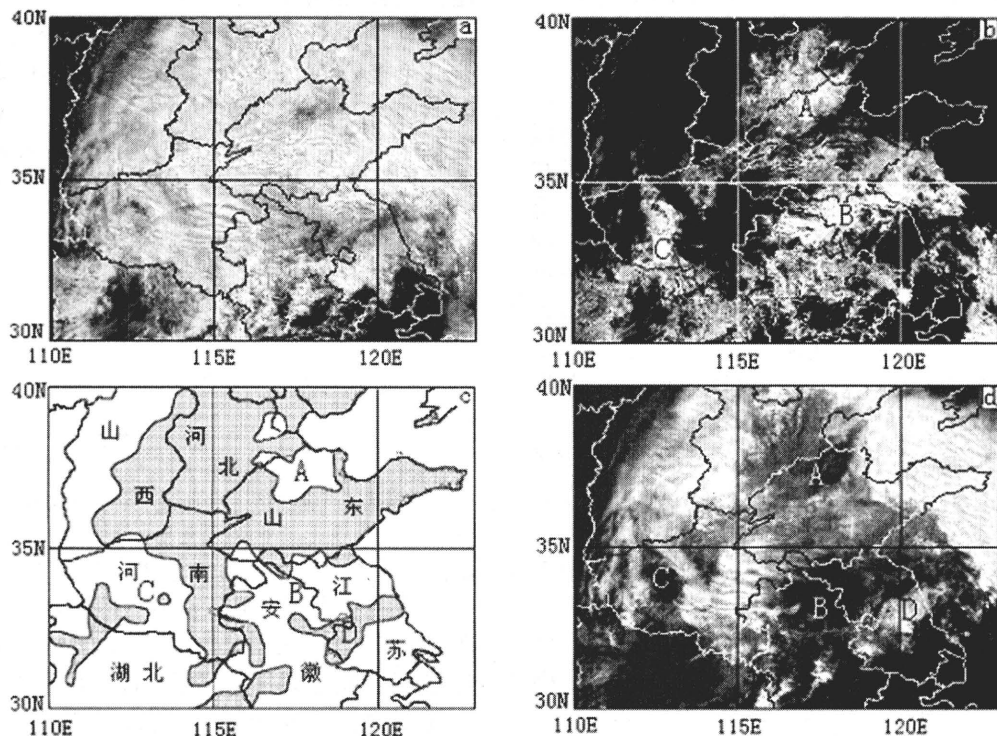


图2 2002年4月5日13时39分 NOAA-16 卫星图像

a: 通道1可见光通道图像; b: 通道A3近红外通道图像;
c: 14时地面降水实况, 阴影区为降水区; d: 通道1与通道3A反射率

线影响出现降雨天气。13时13分 NOAA-16 卫星观测图像和 13~14 时地面降水区实况见图 3。图 3a 可见光云图上除渤海附近外均为厚云层,但图 3b 的通道 1 与通道 3A 差值图像上,河北、山西、河南交界处及河北南部(A 区)、山东(B 区)、江苏及安徽东南部

(C 区)为暗色调区,通道 1 与通道 3A 差值较小。根据 4 月 5 日个例分析的结果,A、B、C 三区为不降水云区,由图 3c 的地面降水实况图得到验证。进一步说明了 1、3 通道反射率差能够区分降水与非降水云区。

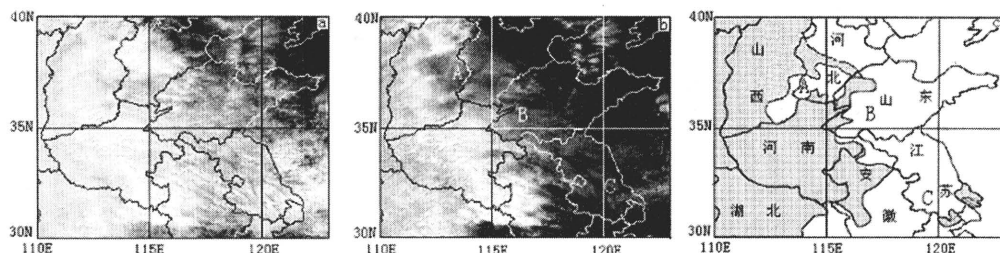


图 3 2002 年 5 月 5 日 13 时 13 分 NOAA-16 卫星图像

a:通道 1 可见光通道图像;b:通道 1 与通道 A3 反射率差值图像;c:14 时地面降水实况,阴影区为降水区

以上个例分析表明,通道 1 可见光反射率与通道 3A 近红外反射率的差值可以反映地面降水范围的信息。两者差值越大,表明云层越厚和云粒子尺度越大,地面降水的可能性就越大。

4 卫星资料识别降水区

为了探讨高分辨率极轨卫星资料监测地面降水区的方法,对 NOAA-16 卫星资料与地面降水几率的关系进行了统计分析。分析样本为表 1 中的前 10 次资料,10 月 30 日的数据作为验证资料不参加统计。考虑到地形对降水的影响,统计目标区选定为 $32^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 的区域,大致为整个华北平原。利用地面加密观测资料得到地面实况样本资料 4381 个,降水站点资料 1512 个。计算气象观测站地理位置对应像元附近 10×10 像元(约 $8\times 10\text{km}^2$)的反射率平均值作为匹配卫星资料样本。由于无云区和薄云区不能产生降水,即降水云的可见光反射率不可能太小,可以采用阈值法滤掉一些不降水云。经统计分析,可见光反射率为 $35\%\sim 40\%$ 的云区,降水几率为 2% ,几乎不产生降水。因此,将 40% 作为密蔽云区的阈值,通道 $1>40\%$ 时才有可能是降水云,共得到样本资料 2839 个。

4.1 降水几率随 1、3 通道反射率差的变化

以 5% 间隔统计了不同可见光反射率通

道 1 与近红外通道 3A 反射率差 R_{1-3} 下的降水几率,地面降水几率随 R_{1-3} 的增大呈线性增大趋势(图 4)。反射率差 R_{1-3} 越大,地面降水几率也越大。当 R_{1-3} 大于 25% 时,降水几率在 50% 以上; R_{1-3} 大于 45% 时,降水几率超过 80% 。说明 1、3 通道反射率差的变化能反映地面降水几率的变化,是表征地面雨区的较好因子。

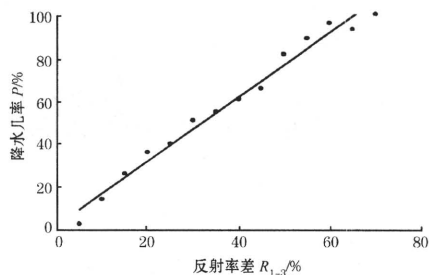


图 4 不同通道 1 与通道 3A 反射率差 R_{1-3} 下的降水几率

4.2 卫星资料与地面降水几率的关系

为进一步探求卫星资料与地面降水区的关系,以 5% 间隔对不同通道 1 反射率 R_1 、通道 1 与通道 3A 反射率差 R_{1-3} 下的联合降水几率进行了统计分析,结果见表 2。地面降水几率随可见光反射率和 1、3 通道反射率差的变化很明显, R_1 或 R_{1-3} 增大,地面降水几率 P 呈显著增大趋势。表中横向数据表

明,当可见光通道反射率增大时,降水几率 P 增大;纵向数据表明,可见光通道反射率一定时,不同 R_{1-3} 下对应的降水几率 P 差别也很大,呈正相关。如通道 1 反射率在 70%~74% 时,随两通道反射率差 R_{1-3} 的增大,降水几率由 14% 增大到 92%。也就是说,通道

1 反射率越高,云层越厚; R_{1-3} 越大,云粒子有效半径也越大,产生降水的可能就大。即使通道 1 反射率较高,如果通道 1 与通道 3A 反射率相差不大,降水几率也很小。这进一步证实了 1、3 通道反射率差在降水区识别中的重要性。

表 2 不同可见光反射率 R_1 与 R_{1-3} 下的降水几率/%

R_{1-3}	R_1									
	40~44	45~49	50~54	55~59	60~64	65~69	70~74	75~79	80~84	85~89
0~4	5	2	3	3	3	0	—	—	—	—
5~9	9	16	8	21	7	25	14	—	—	—
10~14	6	6	14	28	33	15	36	64	—	—
15~19	4	14	10	19	41	40	39	64	83	—
20~24	5	15	22	19	31	64	53	75	67	—
25~29	17	8	17	35	43	45	65	87	92	50
30~34	—	—	13	32	39	41	81	96	97	100
35~39	—	—	19	34	39	58	75	91	100	83
40~44	—	—	—	14	55	62	81	89	100	100
45~49	—	—	—	—	71	78	77	100	100	100
50~54	—	—	—	—	—	89	89	89	100	100
55~59	—	—	—	—	—	—	92	96	100	100
60~64	—	—	—	—	—	—	—	97	83	100
65~69	—	—	—	—	—	—	—	100	100	100

4.3 多通道资料综合识别降水区

利用表 2 数据,建立了地面降水几率 P 与通道 1 可见光通道反射率 R_1 、通道 1 与通道 3A 反射率差 R_{1-3} 的二元线性回归方程:

$$P = 1.70285R_1 + 0.843895R_{1-3} - 0.87926 \quad (R_1 > 0.4) \quad (1)$$

样本数 $N = 93$, 相关系数 $R = 0.938$, 均方差 $S = 0.1267$, $F = 331.53$, 通过 0.001 信度的相关性检验。利用此方程可以逐像元计算对应地理位置的降水几率 P , 再根据 P 值的大小确定地面降水区域。对所有地面实况观测资料样本进行降水几率计算, 取不同的 P_0 作为判别降水区的阈值, 降水几率 P 大于 P_0 的像元判定为有降水, 并用加密观测实况进行判别准确率检验。降雨判别正确站数、空判站数、漏判站数和无雨判别正确站数分别为 N_A 、 N_B 、 N_C 、 N_D , 有无降雨的判别准确率 $R_c = (N_A + N_B) / (N_A + N_B + N_C + N_D)$ 及判别降雨的准确率 $T_s = N_A / (N_A + N_B + N_C)$ 、漏判率 $P_0 = N_C / (N_A + N_C)$ 、空判率 $N_H = N_B / (N_A + N_B)$ 见表 3。对整个目标区

或密蔽云区, 阈值 P_0 取 0.54 时有无降雨的判别准确率 R_c 最高, 分别为 86.5% 和 79.8%; 阈值 P_0 取 0.49 时判别降雨的 T_s 准确率最高, 分别为 66.3% 和 66.6%。因此, 一般可将式(1)计算的降水几率 P 值大于 0.49 判定为降水区, 此判据的降雨判别 T_s 准确率最高, 且有较高的有无降雨判别准确率。也可以根据用户对漏判和空判的不同要求, 适当选取阈值 P_0 。

表 3 样本资料降水区识别准确率/%

整个目标区 (通道 1 > 0)					密蔽云区 (通道 1 > 40%)		
P_0	R_c	T_s	P_0	N_H	R_c	T_s	P_0
0.35	83.3	64.4	8.9	31.2	74.9	64.7	8.4
0.40	84.4	65.4	11.1	28.7	76.6	65.7	10.6
0.49	86.2	66.3	18.0	22.3	79.3	66.6	17.5
0.54	86.5	65.6	22.4	19.1	79.8	65.9	21.9
0.60	85.6	61.3	31.5	14.7	78.5	61.6	31.0
0.65	84.3	56.2	39.2	11.9	76.4	56.5	38.8

4.4 实例验证

2002 年 10 月 30 日 14 时 02 分, NOAA-16 卫星可见光图像如图 5a, 山东、河北、河南、安徽、江苏均有云层覆盖。由降水几率估

计方程(1)计算的地面降水几率图见图 5b, 色调越白, 表示地面降水的可能性越大。安徽、江苏及渤海西北海岸线附近为降水几率较大区域; 可见光云图上河南、山东与河北交界处的大片云区, 在图 5b 上均为暗色调区, 说明地面降水的可能性较小。以 $P > 0.49$ 为判别标准, 可以确定地面降水区在安徽、江苏两省和渤海西北海岸线附近, 山东、河南、河北三省交界处、河南东南部有零星小雨。14 时地面加密观测站 441 个, 密蔽云区(通

道 1 > 40%) 覆盖 336 站, 86 站有降水, 实际雨区与判别降水区基本吻合。441 站有无降雨的判别准确率为 85.5%, 判别降雨的 T_s 评分为 49.2%。厚云覆盖的 336 站中, 判别未降水正确的 209 站, 降雨正确的 64 站, 空判 40 站, 漏判 24 站, 有无降雨的判别准确率为 81%, 判别降雨的 T_s 准确率为 49.2%。若取 54% 为阈值, 441 站有无降雨的判别准确率达 87.5%, 厚云区达 83.5%。说明此方法可以用于地面降水区的判别。

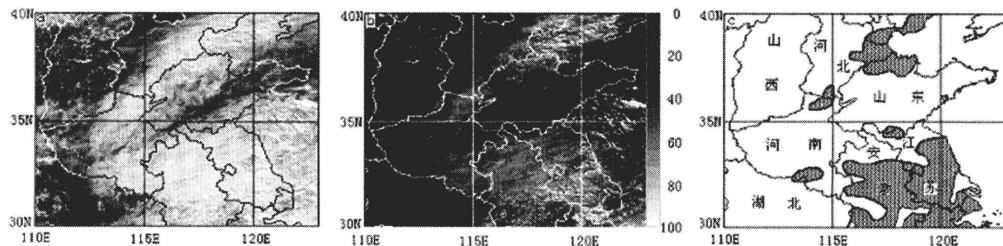


图 5 2002 年 10 月 30 日 14 时 02 分 NOAA-16 可见光图像和降水几率图

a: 通道 1 可见光通道图像; b: 经处理后的地面降水几率图像; c: 14 时地面降水实况, 阴影区为降水区

5 小 结

(1) 新一代极轨气象卫星 AVHRR 辐射计的 $1.58 \sim 1.64 \mu\text{m}$ 近红外 3A 通道资料可以反映云中粒子尺度的信息。降水云中粒子有效半径较大, 此通道图像上表现为暗色调区, 即降水云的 3A 通道反射率一般较小。

(2) 个例分析表明, 通道 1 可见光反射率与通道 3A 近红外反射率的差值 R_{1-3} 可以反映地面降水的信息。两者差值越大, 表明云层越厚和云粒子尺度越大, 地面降水的可能性就越大。统计分析表明, 降水几率随反射率差 R_{1-3} 呈线性变化, R_{1-3} 越大, 地面降水几率也越大。因此, R_{1-3} 的变化能反映地面降水的可能性, 是表征地面雨区的较好因子。

(3) 地面降水几率有随可见光反射率的增大而增大的趋势, 但随 1、3 通道反射率差 R_{1-3} 的不同差别很大。相同可见光反射率下, 反射率差 R_{1-3} 增大, 地面降水几率显著增大。

(4) 综合应用 AVHRR/3 的通道 1、通道

3A 通道资料识别降水, 既考虑了云的厚度信息, 又考虑了云中粒子尺度的信息, 可以有效地监测到地面降水的信息。建立的降水几率估计方程判别雨区, 样本资料检验和实例验证都有较高的判别精度。

(5) 由于获取的卫星资料样本较少, 文中仅对稳定性层状云的降水区域进行了判别, 降水强度的定量估计和夏季对流云降水区的判别仍需进一步研究。

参考文献

- 1 孟旭. 二〇〇一年全国人工影响天气工作概述. 人工影响天气(十五), 中国气象局科技教育司, 2002: 121~125.
- 2 董超华. 气象卫星业务产品释用手册. 北京: 气象出版社, 1999: 211~220.
- 3 J. Liu, C. Dong, and X. Zhu. Thermodynamic phase analysis of cloud particles with FY-1C data. Meteorol. Atmos. Phys., 2002, 80: 65~71.
- 4 陈渭民等. 卫星气象学. 北京: 气象出版社, 1989: 82~83.

Application of NOAA AVHRR Data to Identification of Precipitation Area

Liu Wen Wang Yilin

(Shandong Artificial Precipitation Office, Jinan 250031)

Zhao Yujin

(Shandong Meteorological Center)

Abstract

Using AVHRR data of NOAA polar orbiting meteorological satellite, the image characters of precipitation cloud and precipitation area from CH3A($1.58\text{--}1.64\mu\text{m}$) are analyzed. The differences between CH1($0.58\text{--}0.68\mu\text{m}$) and CH3A can reflect the information of precipitation and precipitation probability. The method of synthetic precipitation identification using AVHRR multi-channel satellite data is discussed. The precision of the method is higher.

Key Words: AVHRR data identification precipitation area stratiform cloud