

利用 FY-2C 双光谱图像反演白天像素级逐时雨强

诸葛小勇, 郁 凡

(南京大学大气科学系中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 基于中国静止气象卫星 FY-2C 的多光谱数据, 研究了由热红外亮温和可见光反照率拟合反演白天地面像素级逐时雨强分布的方法。利用降雨概率判识矩阵区分了降雨云和非降雨云, 技术得分为 0.5073, 比简单利用阈值划分方法显著提高了雨区判识精度。对逐时降水率的分析, 允许误差为 $\pm 20\%$ 内, 正确率为 52.19%。对降水等级的分析, 经 1200 多个实测有雨样本的检验, 其对小雨、中雨、大雨和暴雨的实测命中率达 62.79%。若将降水率小于 0.5 mm/h 的微雨这种临界状态作无雨处理, 则有雨样本的降水强度判识准确率达到 88.17%。

关键词: 降雨强度; 反演; 降雨概率判识矩阵; FY-2C 双光谱图像

中图分类号: TV122 文献标识码: A 文章编号: 100F-6791(2009)05-0607-07

暴雨、暴雪、台风等自然灾害现象对国计民生的影响和破坏极其巨大。引发自然灾害的降水过程往往具有多发性、突发性的特点。业务数值预报模式目前要实现及时、准确地估测降水, 尤其是大降水的突发时间、落区、强度突变和成灾分布还有很大难度。卫星遥感探测, 具有观测范围大、速度快、时空分辨率高、实时性好、动态性强等优点, 在监测和研究致洪暴雨及其它极端天气事件上具有得天独厚的优势。

近年来, 许多国内外学者进行了多光谱卫星信息反演降水的研究。由于卫星被动微波 (passive microwave, PMW) 遥感能够探测云内水滴或者/和冰粒子的物理特征, 估计瞬时降水率比较准确^[1-3], 但是微波探测器安装在极轨卫星上, 时间分辨率很低, 使得微波反演降雨的正确率受时间和区域限制^[4-5], 难以实现连续和大范围观测, 因此加强静止卫星多光谱信息反演降水的研究显得必要。Mamoudou 等^[6]提出的 GOES 多光谱降水算法 (GMSRA), 以可见光反照率阈值和红外亮温或有效半径阈值识别降水区, 有效提高了白天暖云顶降水的识别率, 进而通过红外二次曲线拟合了降水率; 延昊等^[7]应用 MODIS 红外和可见光数据, 按不同的红外亮温范围拟合相应的可见光反照率二次曲线反演了 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度区域的降水率, 分析结果与 AMSR-E 微波雨强较为一致; 刘文等^[8]应用 AVHRR 可见光、近红外通道卫星资料探讨了识别稳定性层状云降水区的方法; 杨引明等^[9]利用历史样本库建立降水估计方程, 进行了 6h 降水估计试验研究。但因方法或资料的限制, 使降水反演的空间分辨率和/或时间分辨率都受到了影响, 反演结果与地面实测降水率相比往往存在较大的误差。郁凡^[10-11]运用 GMS 静止气象卫星红外和可见光双光谱信息构建二维降水强度类属矩阵在估计无雨、小雨、中雨、大雨和暴雨的 5 等级降水强度分布上取得了较好的结果。本文拟在过去工作的基础上, 结合降水概率判识矩阵和红外亮温一定范围内可见光三次曲线拟合方法, 进行白天卫星图像像素级分辨率的降水强度等级和降水率的反演试验。

1 数据和处理

进行降水估计试验选用的是 FY-2C 静止卫星的热红外通道亮温和可见光通道反照率光谱数据。热红外光谱段范围是 10.3~11.3 μm , 可见光光谱谱段 0.55~0.90 μm 。在使用可见光数据时, 对反照率做了太阳高度角订正。图像采用等经纬度投影方式。投影的中心经度是 111°12'E, 中心纬度是 29°42'N, 经度和纬度的分辨率

收稿日期: 2008-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40875012); 淮河流域气象开放研究基金资助项目 (HRM200704)

作者简介: 诸葛小勇 (1986-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事卫星遥感方向的研究。E-mail: zgxy_nju@126.com

通信作者: 郁凡, E-mail: yufan@mail.nju.edu.cn

都是 5 km(相当于 $2'42''$), 共有 2007 年 5 月 1 日~ 7 月 14 日约 70 d 的 10: 00~ 14: 00(北京时间) 每 1h(或 0.5 h, 13: 30 增加观测了一次) 一次的卫星图像用作分析和检验。其中 5 月 1 日~ 7 月 7 日的卫星资料用于样本训练和分析, 7 月 8 日~ 14 日的卫星资料用作检验(其中, 8 日、9 日和 14 日局部有强降水)。

降雨资料包括安徽(经度范围 $114^{\circ}56' \sim 119^{\circ}37' E$, 纬度范围 $29^{\circ}18' \sim 34^{\circ}52' N$) 300 多个站自动雨量计记录的地面 1h 降雨量数据和全国地面观测站 1h MICAPS 降雨量数据。安徽站自动雨量则主要用于样本训练和分析, MICAPS 降雨量数据则用来检验估计方法的普遍适用性。共用实测样本 16 万余个, 其中地面实测有雨样本约 15 000 个。

首先按照地面测站所在位置从卫星图像上读取同时刻相应的双光谱卫星测值。为避免单点卫星测值可能造成的对测站及相邻区域缺乏代表性, 在从卫星图像读取测值之前, 均对各波段卫星图像进行了中值滤波处理^[12]。

2 筛选方法

为了便于分析, 首先将亮温值和反照率标准化, 即计算其灰度值(范围皆为 0~ 63)。本文首先对 16 万组数据进行统计, 求得各亮温的灰度和反照率的灰度下对应的降水概率判识矩阵(图 1), 图中的灰度值已经用具体的亮温值和反照率替代。由于样本充足和相对可靠, 因此该矩阵很好的反映了各亮温(纵坐标)和反照率(横坐标)组合下的降雨发生概率情况。从降水概率判识矩阵来看, 即使云顶亮温较低的区域, 也可能有降雨概率低值区, 这些区域可见光反照率较小, 通常对应了基本不产生降雨的厚卷云; 而云顶温度较高但反照率偏大的区域通常存在较高的降雨概率, 这往往对应了雨层云和暖云顶积雨云; 那些云顶温度低、反照率又大的区域, 则普遍对应了云顶发展很高、垂直厚度很厚的对流旺盛的积雨云。利用降水概率判识矩阵可以分析各种亮温和反照率条件下的降雨发生的可能性, 以不同的降雨概率为阈值, 可以产生不同的划分雨区的效果。

为评估该矩阵对降水检测的效果, 引入评价指标^[8]: Heidke“技术得分”(S)、降水检出概率(P)和虚警率(F), 其定义如下:

$$S = \frac{2(q_1q_4 - q_2q_3)}{q_2^2 + q_3^2 + 2q_1q_4 + (q_2 + q_3)(q_1 + q_4)} \quad P = \frac{q_4}{q_3 + q_4} \quad F = \frac{q_2}{q_2 + q_4} \quad (1)$$

式中 q_1 是卫星估计和观测都无降雨的百分数; q_2 是卫星估计有降雨而观测无降雨的百分数; q_3 是卫星估计无降雨而观测有降雨的百分数; q_4 是卫星估计和观测都有降雨的百分数; P 和 F 的值应该在 0 到 1 之间变化; S 的值应该在 1(表明算法很完美)和 -1(算法完全错误)之间变化, 0 代表分析技术与实际情况之间没有太大联系。理想情况是, S 值为 1, P 值为 1, 而 F 值为 0。实际上很难达到这一境界, 故必须用统计原理以诊断方式来评估。表 1 显示了对 2007 年 7 月 8 日、9 日和 14 日 3 d 内收集的数据使用不同的概率作为阈值得出的降雨或非降雨的分析结果。

表 1 使用不同的概率作为阈值的结果

Table 1 Results of using different rainfall probabilities as threshold

评价指标	概 率								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
P	0.9563	0.9003	0.8305	0.7515	0.6999	0.5808	0.4828	0.3208	0.1514
F	0.5432	0.4820	0.4405	0.3950	0.3414	0.2805	0.2202	0.1366	0.0926
S	0.2972	0.4010	0.4445	0.4734	0.5073	0.4885	0.4559	0.3487	0.1804

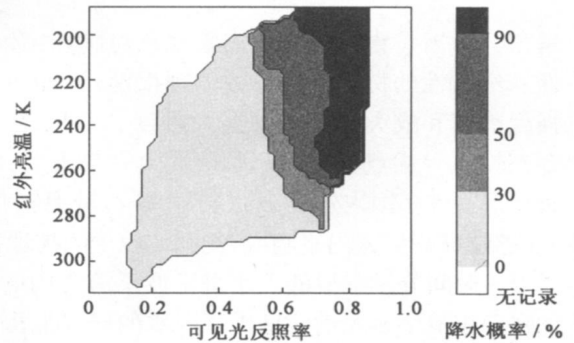


图 1 降水概率判识矩阵

Fig. 1 Rainfall probability identification matrix

表 1 显示, 随着阈值的提高, 虽然虚警率显著降低, 但降水检测概率也在降低, 技术得分呈现一个抛物线型, 在阈值很高或很低(也就是说选取较低的降雨概率或较高的降雨概率值作为阈值)时技术得分都比较低, 综合考虑, 把阈值定在 50% 左右比较合适, 这种情况下技术得分能达到 0.507, 虚警率只有 0.34, 而降水检测概率达到 0.70。

表 2 显示了应用降水概率判识矩阵区分降水区和非降水区的方法与其它方法的纵向比较结果。

表 2 不同筛选方法比较
Table 2 Comparison of different screening methods

设定阈值	评价指标	观测	卫星估计无降雨 / %	卫星估计有降雨 / %
可见光反照率 > 0.40 和云顶温度低于 230K	$S = -0.1339, P = 0.3279, F = 0.7378$	无降雨	35.12	31.14
		有降雨	22.68	11.07
可见光反照率 > 0.50	$S = 0.3864, P = 0.9082, F = 0.4916$	无降雨	36.62	29.64
		有降雨	3.10	30.65
判识矩阵 50% 的降雨概率	$S = 0.5073, P = 0.6999, F = 0.3414$	无降雨	54.01	12.24
		有降雨	10.13	23.62

当只考虑温度低于 230 K, 同时可见光反照率大于 0.40 的云时, 卫星只能检测出 33% 的地面降雨, 相应地, F 值为 73%, S 评分为 -0.13。这么低的技术得分说明有相当多的降雨与云顶温度超过 230K 的暖云有关。但是若把所有可见光反射率超过 0.50 的云均认为是降水云, P 的值增至 0.91, 但虚警率也将明显增加到 0.49, S 评分只有 0.39。这表明 0.50 的可见光反射率阈值在筛除非降雨暖云时也并不很理想。利用降水概率判识矩阵将降水概率定在 50%, 技术得分接近 0.51, 虚警率只有 0.34, 而降水检测概率接近 0.70。将可见光反射率超过 0.40 和 230K 作温度阈值的筛选方法与使用降水概率判识矩阵 50% 的降雨概率阈值的筛选方法做比较, 可以发现, 后者在没有显著改变 F 值的情况下明显改善了对雨区的正确检出率。

3 估计雨强

中纬度地区的陆面降雨强度通常与云顶高度和光学厚度显著相关。一般说来, 云顶越高(红外外通道亮温越低), 说明对流发展越旺盛, 越有利于形成较大的降水; 而云体本身光学厚度越大, 其可见光反照率一般就越大, 对应的降雨强度往往也越大。但仔细分析起来可以发现, 层状云降水与对流性降水的亮温区间基本是不同的, 在各自的亮温区间里, 降水强度的大小更依赖于可见光反照率。因此, 在建立拟合函数时, 不宜将亮温区间取得过小。

为了定量估计降水强度, 本文选取 200 个典型数据拟合函数。考虑到对流云降水和层状云降水的差异, 分别对不同的云顶亮温区间进行相应的拟合。通常, 产生大到暴雨的强积雨云的云顶亮温往往 < 220 K, 伴随着地面有较大瞬时降雨强度的阵性降雨; 而产生连续性降水的雨层云等层状云的云顶亮温则大多处在 240~270 K 间; 亮温介于上两类间的主要是弱对流云或多层云。针对以上 3 种情况, 对不同的云顶亮温区间, 各取 3 条曲线由可见光反照率 (V) 拟合雨强 (R)。拟合时, 亮温区间宽度为 20 K, 且相邻区间互有重合。最后确定的拟合函数为三次函数, 如图 2 所示, 各曲线的均方根差依次为 3.51、2.54、1.69、1.06、0.75、0.42、0.52 mm/h。

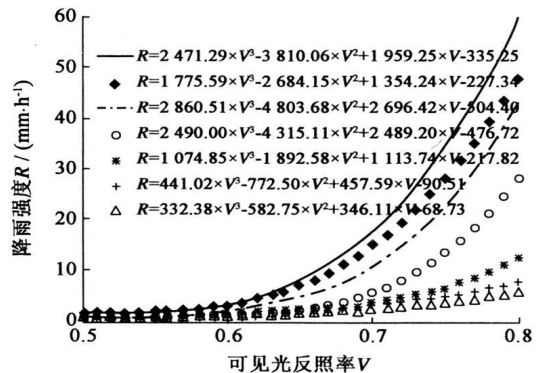


图 2 不同亮温范围下降雨强度与反照率的关系
Fig. 2 Relationship between rain rate and albedo under different bright temperatures

反演雨强时, 因区间重合, 各点的降水率估计值均由相邻两条拟合曲线所估计的降水率加权平均确定。

4 结果与检验

4.1 估计雨强的检验

选择 2007 年 7 月 8 日、9 日、14 日(此 3 日安徽为阴雨天气, 超过 1/3 的地区有降雨过程, 7 月 10~13 日, 天气晴朗)的有雨样本来对算法进行检验, 这样的有效样本有 1 200 多个。

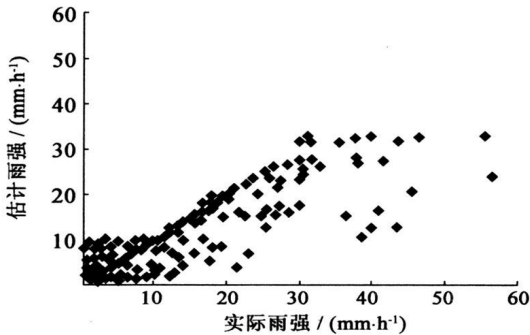


图 3 估计雨强与实际雨强的散点图

Fig. 3 Scatterplots of estimated and gauged rain rate

首先对有雨样本进行实测雨强与卫星反演雨强的对比检验。考虑到卫星瞬时观测反演降水率与地面 1 h 累计降水率之间的不一致, 在地面像素级分辨率下进行卫星反演雨强精度检验时, 若点对点取值进行比较显然是不合适的。因此, 采用点(站点实测降水率)对区域(设定比较半径)比较, 在比较半径内选择最接近的实测降水率做检验比较值。比较半径基本根据云移动速度决定, 对流云的移动速度通常能达到 50 km/h 以上, 本文采用比较半径为 10 个像素。评价的标准是: 满足 $0.8R_g \leq R_e \leq 1.2R_g$ 亦即允许误差为 $\pm 20\%$ 正确估计, 其中 R_g 为地面雨量计实测雨强, R_e 为卫星反演得到的估计雨强。图 3 为估计雨强和

实测雨强的散点分布图, 从散点图容易看出, 大部分估计雨强与实测雨强对应得较好, 较大的降水易偏低估; 较小的降水, 高估、低估都有发生, 仍然是低估的偏多。对降雨估计做总体定量评价, 在允许误差 $\pm 20\%$ 内, 有 52.19% 的估计是正确估计, 33.87% 的样本被低估, 13.94% 的样本被高估。

4.2 降雨等级估计的检验

为便于直观显示和应用, 本文还进行了卫星反演降雨强度等级的分析。降雨强度等级划分为: 小雨(≤ 2.5 mm/h); 中雨(2.6~8.0 mm/h); 大雨(8.1~15.9 mm/h); 暴雨(≥ 16.0 mm/h)。

对有雨样本降雨等级估计的检验, 总体正确率为 62.79%, 低估率为 33.16%, 高估率 4.05%。具体考察每一个等级的具体参数, 小雨的正确估计率为 44.11%, 低估率达到 50.78%; 中雨的正确估计率在 92.2%, 低估率和高估率分别为 4.36% 和 3.45%; 大雨的正确估计率为 80.85%, 低估率为 18.44%, 高估率为 0.71%; 暴雨的正确估计率为 82.02%, 低估率有 17.98%。这说明, 低估率高到 30% 以上主要是由小雨被低估引起的。为进一步分析, 这里细分小雨等级为微雨(< 0.5 mm/h)和小雨(0.5~2.5 mm/h)。微雨是有雨和无雨间的过渡状态, 是一个临界指标。若将实测为微雨但反演估计为无雨并不认为是错误的话, 反演准确率将会明显提高。若将微雨作无雨处理, 对小雨的估计正确率从 44.11% 显著提高到 82.93%, 相应地, 低估率和高估率分别为 8.16% 和 8.91%。若考察总体等级估计率, 正确率提高到 88.17%, 相比于处理前的 62.79% 有了明显改善。

5 个例分析

2007 年 7 月 8 日, 安徽大部有强降水过程, 局部地区雨量达到 46.6 mm/h。本文应用 FY-2C 相关时刻的红外和可见光通道数据对这次降雨云团进行连续跟踪反演(图 4)。时刻依次为北京时间 10:00(图 5(a))、11:00(图 5(b))、12:00(图 5(c))、13:00(图 5(d))。无降水区仍用热红外图像原图的灰度表示, 与色标对应的不同颜色分别表示了不同等级的降水强度, 着色圆点为地面实测降水。降水分析图像上的晴空区和非降水云区, 由降水概率判别矩阵分析得到, 降水区的雨量则由图 2 中列出的判决函数估计。

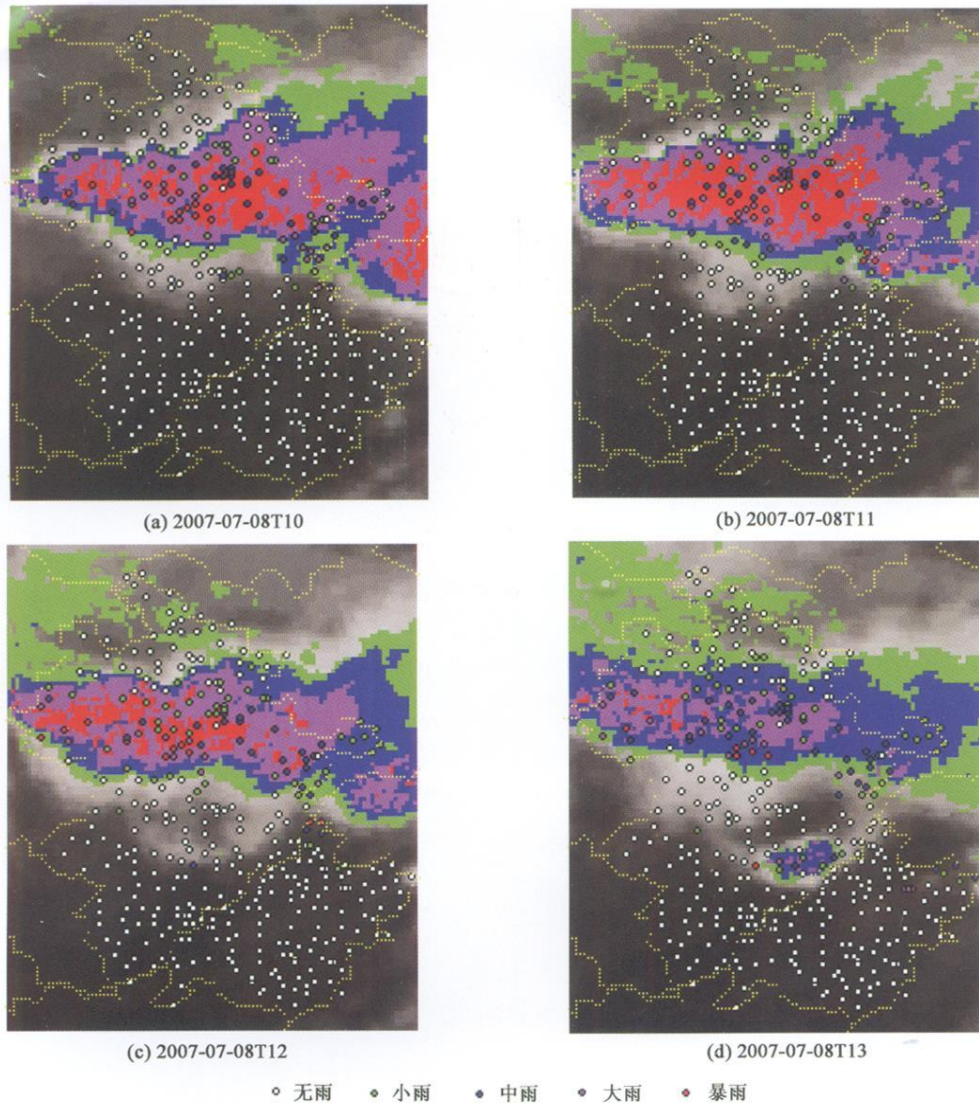


图4 2007年7月8日安徽1次降雨过程的估计

Fig. 4 Rainfall estimates of Anhui from 10:00 to 13:00 on July 8, 2007

在卫星图像上, 安徽各地的辐射特征表现比较明显, 皖南地区相对晴朗, 为少云(或卷云)天气; 皖北受较强降雨云团影响, 产生大范围的降水过程; 皖中地区由于夏季午后的对流运动, 产生雷阵雨天气。由图4可以看出, 考虑到卫星瞬时观测反演降水率与地面1h累计降水率之间的不一致, 本文所用的算法对无雨、小雨、中雨、大雨和暴雨区域进行了很好区分。10:00、11:00和12:00的强度中心都能非常精确地估计出来, 对皖中的强对流云的发展过程也能很好地跟踪并对其发展成成熟时产生的降水量很好地估计。

6 普遍适用性讨论

为了讨论该反演方法的普遍适用性, 进一步以2007年7月8日13:00包含更大范围的中国中东部地区的卫星反演降雨云图和降雨实况进行比较(图5)。

这一次降雨过程, 雨带主要分布在长江以北的川陕鄂边界至苏皖地区, 安徽降雨强度最大达到28 mm/h(颍上站, 114°21'E, 32°34'N), 河南降雨强度最大达到40 mm/h(正阳站, 116°12'E, 32°37'N)。本文所用的算法准

确地估计出了降雨强度, 尤其是以降雨等级考察时, 这种算法对雨区的估计与地面实测基本一致, 两个强度中心——豫南、皖西北, 一个次中心——川东都能比较准确的被反演出来。由于层云和对流云的性状不同而估计皖东等小部分地区的雨量时略偏大或偏小, 应是地面观测与卫星观测这两种不同观测方式的差异引起的, 毕竟地面雨量计观测雨量是 1h 的累计, 而卫星观测是瞬时完成的。如果能够应用更短时间间隔的卫星图像进行反演, 应能够有效改善这个问题。

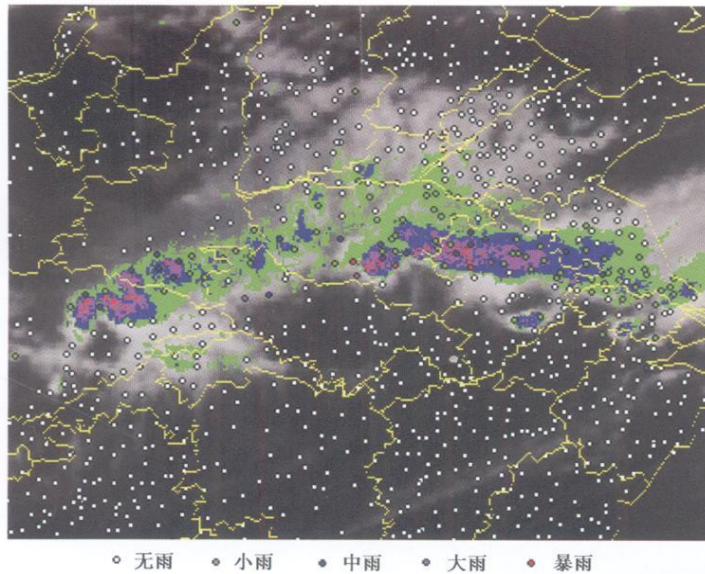


图5 2007年7月8日13:00中国中东部地区的降雨量估计

Fig. 5 Rainfall estimates of the center east of China at 13:00 on July 8, 2007

7 结 论

(1) 本文提出了利用 FY-2C 静止卫星的红外-可见光图像拟合反演白天地面逐时雨强分布的方法。该方法通过降水概率判识矩阵区分降雨云和非降雨云, 技术得分达 0.5073, 比简单利用阈值划分方法显著提高了雨区判识精度。样本检验表明, 对逐时降水率的分析, 允许误差在 $\pm 20\%$ 内, 正确率为 52.19%。该方法对降水等级的分析, 经 1200 多个实测有雨样本的检验, 其对小雨、中雨、大雨和暴雨的实测命中率达 62.79%。若将降水率小于 0.5 mm/h 的微雨这种临界状态作无雨处理, 则有雨样本的降水强度判识准确率达到 88.17%。

(2) 卫星进行的是每 1h 一次的瞬时观测, 而雨量计则是 1h 雨量的累计, 误差讨论表明, 卫星和地面对降水率进行的这两种完全不同方式的观测是产生比较误差的重要原因。当前 FY-2C 和 FY-2D 同时在轨运行并业务化, 可以实现每 0.5h 甚至 15min 时间间隔的卫星图像观测, 同时自动气象站的雨量计记录亦可提供与之相应的累计雨量, 这为更精确反演降雨提供了可能。另外, 结合应用热红外亮温和可见光反照率反演降水, 只能应用于白天的情况, 夜间降水估计还需利用近红外、水汽和亮温差信息。拟在后续的研究中, 着重进行这两方面的研究。

参考文献:

- [1] TODD M C, KIDD C, KNIVERTON D, et al. A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small scale rainfall [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2001, 18: 742-755.
- [2] TAPIADOR F J, KIDD C, LEVIZZANI V, et al. A neural network-based fusion technique to estimate half hourly rainfall estimates at 0.1°

- resolution from satellite passive microwave and infrared data[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2004, 43: 576-594.
- [3] OLSON W S, KUMMEROW C D, YANG Song, et al. Precipitation and latent heating distributions from satellite passive microwave radiometry: Improved method and uncertainties[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2006, 45: 702-720.
- [4] MORRISSEY M L, JANOWIAK J E. Sampling induced conditional biases in satellite climate scale rainfall estimates[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 1996, 35: 541-548.
- [5] SOMAN V V, VALDES J B, NORTH G. Satellite sampling and the diurnal cycle statistics of Darwin rainfall data[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 1995, 34: 2481-2490.
- [6] MAMOUDOU B A M, GRUBER A. GOES multispectral rainfall algorithm (GMSRA)[J]. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 1500-1514.
- [7] 延昊, 吴门新, 刘桂青, 等. 利用 MODIS 的多通道信息估计中纬度降雨[J]. *气象学报*, 2006, 64(2): 205-210. (YAN Hao, WU Men xin, LIU Gui qing, et al. Overland rainfall estimates in midlatitude by using MODIS multi channels[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(2): 205-210. (in Chinese))
- [8] 刘文, 王以琳, 赵玉金. AVHRR 卫星资料在层状云降水区判别中的应用[J]. *气象*, 2003, 30(2): 3-9. (LIU Wen, WANG Yi lin, ZHAO Yu jing. Application of NOAA AVHRR data to identification of precipitation area[J]. *Meteorologica*, 2003, 30(2): 3-9. (in Chinese))
- [9] 杨引明, 姚祖庆. 应用 GMS-5 多通道云图估计降水技术的研究[J]. *气象*, 2003, 30(11): 8-13. (YANG Yin ming, YAO Zu qing. Study of rainfall estimate technique with GMS-5 data[J]. *Meteorologica*, 2003, 30(11): 8-13 (in Chinese))
- [10] 郁凡. 多光谱 GMS 卫星图像气象特征量的提取及其在中尺度数值预报模式中的应用[D]. 南京: 南京大学, 1998 (YU Fan. Extraction of meteorological characteristic elements from GMS images and their application to mesoscale NWP[D]. Nanjing: Nanjing University, 1998. (in Chinese))
- [11] 郁凡. 多光谱卫星图像降水强度场的分析[J]. *气象学报*, 2003, 61(3): 334-345. (YU Fan. Analysis of rainfall intensity field by using multi spectral GMS imagery[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(3): 334-345. (in Chinese))
- [12] 郁凡, 刘长盛, 余志豪. 用多光谱卫星信息分析白昼云天条件下的湿度场[J]. *气象学报*, 2002, 26(6): 748-757. (YU Fan, LIU Chang sheng, YU Zhi hao. Humidity fields analysis in daytime cloudy sky with multi spectral satellite information[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 26(6): 748-757. (in Chinese))

Retrieval of the daytime pixel-level hourly rain rate using FY-2C's dual-spectral imagery*

ZHUGE Xiaoyong, YU Fan

(Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Department of Atmospheric Science,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on the geostationary meteorological satellite FY-2C's multi-spectral data of China, this paper studies the method using thermal infrared bright temperature and visible light albedo to imitate and demonstrate the pixel-level hourly rainfall rate and rainfall intensity class. We firstly employ the rainfall probability analysis matrix to differentiate precipitation cloud and non-precipitation cloud with the skill score reaching 0.5073. This notably improves the accuracy of the rain area estimation compared with the threshold value distinguishing method. The accuracy of analyzing hourly rain rate with the method is about 52.19% if the deflection of $\pm 20\%$ is permitted. And after the test of more than 1200 samples, the accuracy of this investigation of small, middle and heavy rain and rainstorm reaches 62.79%. Furthermore, if we consider the tiny rain with its rain rate less than 0.5 mm/h as the non-rain case, the accuracy of the rainfall rate estimation can reach 88.17%.

Key words: rainfall rate; retrieval; rainfall probability identification matrix; FY-2C dual-spectral imagery

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No.40875012).