

用 GMS 卫星资料反演复杂地形下的降水率

陈 乾 杨兰芳 韩 涛

(兰州干旱气象研究所 兰州 730020)

摘 要 强降水主要由生命史短的中小尺度天气系统造成, 对此类天气系统的预报, 目前只有依靠卫星和雷达的实时监测并结合中系统的概念模式外推来完成。由于中国西北地区地形极为复杂, 造成雷达盲区, 影响其估算降水率。因此采用 GMS-4 卫星的红外和可见光展宽云图资料, 经处理并转换后, 再加入相应网格点上的数字化地形高度资料作为因子之一, 用多级逐步判别模式估算逐时雨强等级, 最后形成一套可在微机上对雨强场进行图像显示及处理的软件系统, 满足了现时预报的需要。结果表明, 小雨以上的降雨区域不论面积、形状均与实况基本一致。

关键词 GMS 卫星 地形 降水率 估算

分类号 p333

虽然数字化雷达资料估算降水率具有坚实的物理基础, 其反演精度较高。但中国西北地区地形极为复杂, 地形屏障造成雷达盲区和地物回波干扰影响其估算降水。而用地球同步气象卫星的定量资料, 运用一定的统计模式估算降水率, 以弥补辽阔的高原和山区缺少常规气象资料, 不失为降水监测和短时预报的有效工具。本文针对青藏高原东北边坡复杂地形下, 将 GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 卫星展宽云图的红外和可见光信息与其相匹配的数字化地形模型相结合。采用多级逐步判别方案, 建立 GMS-4 卫星定量化信息和海拔高度与 1h 雨量等级之间的统计关系, 制作估算降水率场的自动处理显示系统。

1 降水强度的分析

观测表明, 控制降水强度的宏观因子有云顶高度、云层厚度和云中含水量等。这些和雨强有关的云宏观参数可通过观测频次高的 GMS 卫星 (间隔 30min 一次) 红外和可见光信息 (量化的) 经一定的处理得到。例如可见光信息可转换成云顶反照率, 它与云层光学厚度及云中含水量有关; 红外信息可转换成云顶温度。利用探空的等压面高度和温度资料, 可由云顶温度推算出云顶高度; 海拔高度则作为下边界限制条件。夏建平^[1]对西北地区东部暴雨云团的统计分析表明, 自甘肃省西部东移的低槽云系与副高西侧的高原积云区相接之处, 最利于暴雨云团发展。据此笔者普查了 1987~1990 年西北地区东部处于副高西北缘西低东高环流型下符合上述云图模式的 36 次陕、甘、宁三省 (区) 的大暴雨过程。由于 GMS 云图的定量信息自 1989 年开始逐时存档, 故仅用 1989 和 1990 年两个夏季的资料共 152 时次, 其中 107 次用于建立统计模型, 45 次留作检验。取陕、甘、宁三省 (区) 和青海省东部农业区与卫星资料相应时刻 190 个站的 1h 雨量资料。由于地面测站比相应区域 (33~38 N, 103~110 E) 卫星的信息量 14241

小二个量级,为了充分利用卫星资料并降低个别缺乏代表性的测站降水资料的权重,采用平面拟合插值方案,将190个测站降水资料插到0.1度的经纬度网格上,与卫星象元相对应将有3621个数据。采用逐步回归多级判别程序,建立卫星云图定量信息和数字化地形模型与雨强等级之间的统计关系。为进行多级判别,首先要将1 h雨量分级。根据西北地区具体情况,为保证暴雨有足够的样本,按下列标准,将22863个实测的雨量样本分为五个等级,如表1所示。

表1 雨量分级标准及其统计

Table 1. Standard and statistics of rainfall grade

雨量等级 K	1	2	3	4	5
雨强 (mm/h)	0	0.1~1.0	1.1~3.0	3.1~8.0	> 8.0
名称	多云	小雨	中雨	大雨	暴雨
样本数	15228	3984	1962	1318	371

2 卫星资料的处理方法

为使卫星资料的定位准确,并使其信息与雨强之间的物理意义更明确,作如下处理:

(1) 为了消除 GMS 卫星原投影的畸变,且便于数据定位,将其转换成经纬度网格正方形投影,分辨率取0.05°:

(2) 中国西北地区距 GMS 星下点很远。实际分析表明降水区略偏于红外灰度阈值195等值线的东南方。雨强中心多数位于亮温冷中心东南侧约0.2~0.3°。这主要由于本区对卫星的仰角(28~40°)较低,致使云顶定位出现误差。当然也可能由于取卫星观测时刻后近1 h的雨量有关。为此先用下式计算各点对 GMS 卫星的仰角和方位角。

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{(\cos \delta - 0.15086)}{\sin \delta} \right] \quad (1)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \Delta \lambda}{\sin \delta} \right) \quad (2)$$

式中 $\cos \delta = \cos \varphi \cdot \Delta \lambda$, φ 为观测点的纬度, $\Delta \lambda$ 是星下点与观测点的经度差, β 和 α 为某测点对静止卫星的仰角和方位角。

GMS 卫星位于140°E赤道上空,设观测点位置为106°E, 36°N。由(1)、(2)式可得 $\beta = 35^\circ$, $\alpha = 139^\circ$; 当云顶高度 H 为10 km 时,水平偏移 $L = H / \operatorname{tg} \beta = 14.3$ km,由方位角可算出东西和南北方向上的偏移分别为9.4 km 和10.8 km。按0.05度经纬度网格为步长单位,应向东和南移2个格距。当云顶高为15 km 时, $L = 21.4$ km, 应向东,南移3个格距。

(3) 将红外和可见光灰度值(0~255)转换成亮温和反照率。根据卫星气象中心提供的转换表,分段拟合出红外灰度值转换成亮温的公式:

$$T_B = \begin{cases} 246.771 - 1.94242I_i & i = 0 \sim 8 \\ 234.418 - 0.38783I_i & i = 9 \sim 100 \\ 244.947 - 0.49526I_i & i = 101 \sim 155 \\ -39.116 + 44.365 \ln(256 - I_i) & i = 156 \sim 234 \\ 600.596 - 2.12727I_i & i = 235 \sim 246 \\ 1143.26 - 4.32667I_i & i = 247 \sim 255 \end{cases} \quad (3)$$

式中 下标 i 为红外灰度值的区间, I_i 为红外灰度值, T_B 为亮温, 单位取绝对温标减100以保证一字节。(3) 式相关系数在 -0.99153 至 -0.99957 之间, 绝大多数误差小于1度。

将可见光灰阶由 $0 \sim 63$ 内插成 $0 \sim 255$, 然后拟合出转换成反照率 A (%) 的定标公式

$$A = \begin{cases} 0.11469V_i & i = 0 \sim 81 \\ -18.174 + 0.033906V_i & i = 82 \sim 142 \\ -45.586 + 0.53254V_i & i = 143 \sim 203 \\ -82.150 + 0.71176V_i & i = 204 \sim 255 \end{cases} \quad (4)$$

式中 V_i 为可见光灰度值, 下标 i 为可见光灰度值的区间。(4) 式相关系数分别为 $0.96512 \sim 0.99949$, 误差小于2%。由于可见光亮度随太阳照度不同而变化, 而太阳照度随太阳天顶角而变。因此需归一化到太阳天顶角为零度时的反照率值, 通常按式 (5) 作天顶角余弦订正。

$$A_c = A / \cos Z_s \quad (5)$$

式中 A_c 为订正后的反照率; Z_s 为探测点的太阳天顶角, 可根据年、月、日, 先计算出太阳在天球上的位置即偏角 δ , 然后由 δ 和探测点的地理纬度以及经度和时间确定时角后计算出某时刻各探测点的太阳天顶角。

(4) 将云顶亮温转换成云顶高度 H (km)。采用目标区内18个探空站900至100hPa11层标准等压面7~8月平均高度和温度资料拟合出由温度推算高度的回归方程

$$H = \begin{cases} 35801.28 - 177.08T & T > 3 \\ 32600.97 - 157.57T & T < 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中 T 为亮温, 取绝对温标减100。(6) 式相关系数达 -0.9996 。由于亮温和气温有差别, 加之实际温度垂直廓线与平均状况有偏差, 故计算的云顶高度与实际高度会有误差, 但其相对分布是合理的。

(5) 海拔高度对降水率影响的估算。由于水汽随高度呈指数递减, 故随海拔升高, 气柱水汽含量迅减。地面是云底的下边界, 当云顶高度相同时, 高原地区云层厚度相对较薄, 云内含水量较少, 因此青藏高原上雨强小, 极少出现暴雨。为此将估算的云顶高度减去当地海拔高度, 称为最大可能云层厚度, 作为反演降水率的因子。

3 多级逐步判别方程的建立

考虑到云顶温度、反照率和降水强度的关系不一定是线性关系, 因此在设计统计因子时对云顶亮温和反照率分别取一次项和二次项。由于云的发展状态 (如发生、极盛、衰亡) 与降水强度有关, 故取亮温和反照率的1 h 变量为因子。本区处于高原边坡, 海拔落差大, 最高为5334 m, 最低61 m。如前所述海拔高度将影响整层水汽含量和云层可能厚度, 故取云层最大可能厚度作为地形影响的统计因子。GMS 卫星的红外和可见光信息是 VISSR 仪器对本区扫描时获取的。因此它反映的是相应扫描点的瞬时降水率, 而我们用的是1 h 雨量。在对流性降水情况下, 雨强时空变化较大, 其统计关系差于稳定性降水。用1 h 雨量与上述诸因子作多元线性回归分析, 复相关系数不高。白天有红外和可见光两组信息时, 相关系数最高的时次仅0.459。故用雨量等级作逐步多级分辨处理。此统计模式具有逐步回归筛选因子的功能, 同时完成多级判别^[2]。取筛选因子的显著性检验水平5%, $F = 2.22$, 结果入选的有云顶亮温, 反照率

以及它们的平方和云层最大可能厚度五个因子。亮温取摄氏温标, 当温度低于零度时, 其平方项仍取负值。当亮温 $T_B > 7$ 或者反照率 $A < 35\%$ 时定义为晴空, 它不可能产生降水, 这些象元将不参加统计。所得雨量等级的判别方程为

$$R_K = C_0 + C_1 T_B + C_2 T_B^2 + C_3 A + C_4 A^2 + C_5 D \quad (7)$$

式中 R_K 为雨强等级 K 的判别函数值; T_B 为亮温 ($^{\circ}\text{C}$); A 为反照率 ($\%$); D 为云层最大可能厚度 ($\text{m}/70$); C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 C_5 分别为判别方程各项系数 (如表2):

表2 白天雨强等级判别方程各项系数

Table 2. Every coefficient of the discrimination equation for rainfall rate grade in the daytime

雨强等级 K	C_0	$C_1 T_b$	$C_2 T_b^2$	$C_3 A$	$C_4 A^2$	$C_5 D$
1	- 26. 0963	1. 4486	0. 0026	0. 6869	- 0. 0055	0. 6906
2	- 29. 6224	1. 3723	0. 0033	0. 7287	- 0. 0056	0. 6855
3	- 30. 8539	1. 3368	0. 0037	0. 6904	- 0. 0051	0. 6847
4	- 32. 2352	1. 4069	0. 0035	0. 6846	- 0. 0050	0. 7065
5	- 33. 1138	1. 5456	0. 0017	0. 6813	- 0. 0050	0. 7190

使用时可将卫星资料和相应范围及分辨率的海拔高度输入, 当满足晴空条件时设 $K = 0$, 这些象素点不参与判别方程 (7) 计算, 其余则分别代入雨强等级, $K = 1, 2, \dots, 5$ 的5个判别方程, 得到5个 R_K 值, 取其中最大的 R_K 所对应的 K 值作为所判定的雨量等级。上述判别方程的历史拟合率为60. 24%。由于取的样本量很大, 每个时次有3621个格点。用未参与统计的样本检验拟合率降低较小。

夜间仅有红外云图信息, 当亮温 $T_B > 0$ 时判为晴空, 这些样本不参与判别统计。判别方程可写成

$$R_K = C_0 + C_1 T_B + C_2 T_B^2 + C_3 D \quad (8)$$

上式各符号意义同 (7) 式, 其中各项系数见表3。

表3 夜间雨强等级判别方程各项系数

Table 3. Every coefficient of the discrimination equation for rainfall rate grade at night

雨强等级 K	C_0	$C_1 T_b$	$C_2 T_b^2$	$C_3 D$
1	- 27. 0389	1. 1815	0. 0075	0. 7998
2	- 24. 5419	1. 0569	0. 0077	0. 7510
3	- 24. 9654	1. 0038	0. 0079	0. 7425
4	- 26. 0834	1. 0439	0. 0070	0. 7399
5	- 31. 4950	1. 2212	0. 0067	0. 8150

因夜间无可见光信息, 判别式 (8) 的历史拟合率下降为52. 11%, 使用效果较白天差。

4 反演雨强等级的自动处理系统

利用GMS展宽云图定量信息和海拔高度反演雨强等级的自动处理可在微机上实现, 无需价格昂贵的图像板和大屏幕显示器。其工作流程见图1。

图2 (a) 和 (b) 分别为1990年7月25日16时反演的雨强场和16~17时的雨量实况。对照这两幅图可看出: 总的分布相似, 庆阳地区暴雨范围略大些。通过对几次暴雨过程检验, 总的处理效果还是比较令人满意的。但8~10mm/h的弱暴雨和小范围短历时暴雨有时判读不出或判为大雨, 而20mm/h的强暴雨估算范围偏大。然而, 反演的小雨以上降雨区域不论面积和形

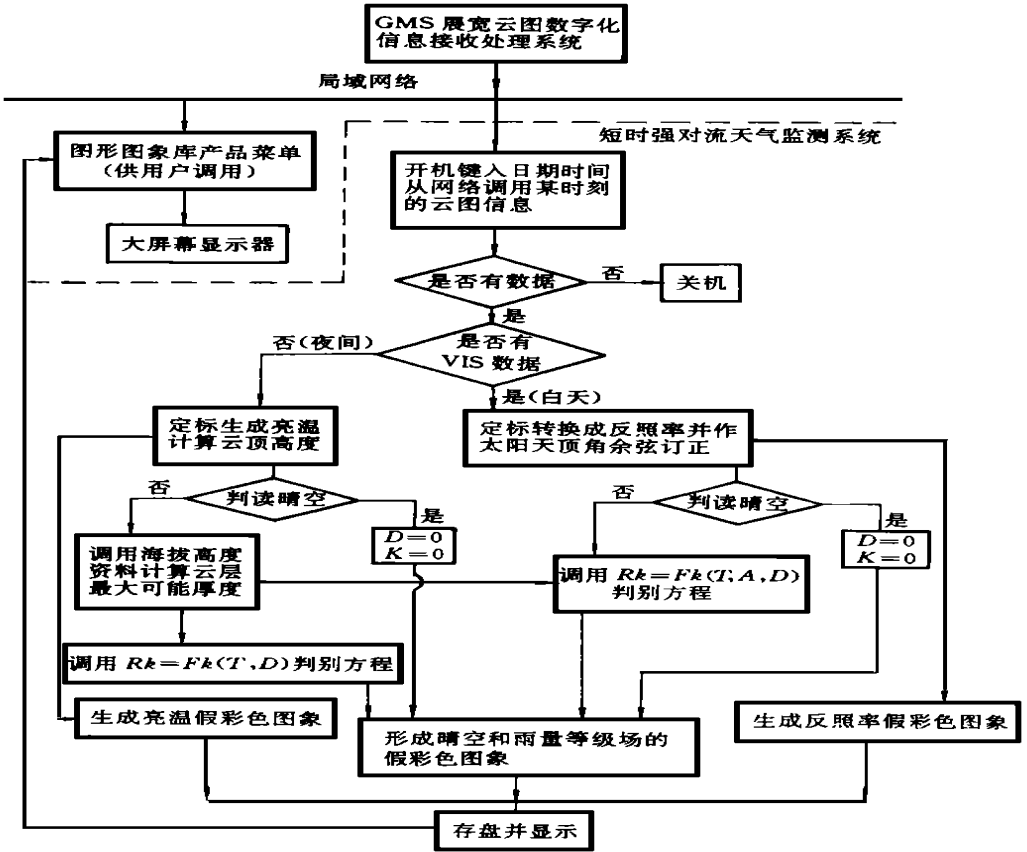


图1 由 GMS 定量信息反演雨强处理系统工作流程图

Fig. 1. Flow scheme of estimating rain rate from information of GMS

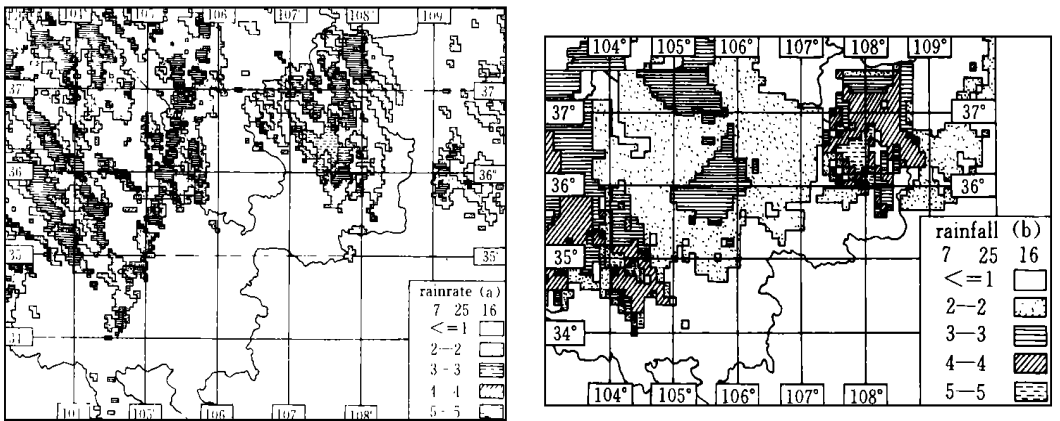


图2 1990年7月25日16时反演的雨强 (a) 和实测的15~16时雨量等级 (b)

图例说明: 1. 无雨; 2. 小雨; 3. 中雨; 4. 大雨; 5. 暴雨

Fig. 2. Comparison of estimated rain rate (a) and observed rainfall (b) (July 25, 1990)

状均与实况一致。这可能是由于用1h雨量代替瞬时雨量作统计造成的。处理结束后将上述三幅图像存入库中,由图形图像库管理,用户可随时调阅。此处理系统已投入兰州区域气象中心预报业务系统中试用,在1993、1994两年的汛期,试运行反应效果良好,特别在几次大降水和雷雨天气过程中,其所提供的“逐时降水率”场,对于短时客观预报具有较高的参考价值,取得了明显的社会效益。

致谢:王大昌提供经纬度网格卫星资料,陈添宇、莽根提供部分程序,朱阳生、罗云峰、黄蕾诺收集整理雨量资料,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 夏建平,郭清台.西北区东部暴雨云团的统计分析.甘肃气象.1988,6(1):2~4
- 2 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法.北京:气象出版社,1990.133~160

Rainfall Rate Retrieval from GMS Satellite Data over Complex Terrain

Chen Qian, Yang Lanfang, and Han Tao

(Lanzhou Arid Meteorological Institute, Lanzhou 730020)

Abstract: Heavy rainfall is mainly generated by the mesoscale and microscale synoptic systems that are short life cycle. Presently, the forecast with this kind of synoptic systems can only rely on the combining real-time monitoring by satellite and radar and extrapolating by the conceptual model of the mesoscale systems. Because the terrain is very complex in the Northwest China, the terrain creates radar shadow that have influence on estimating rainfall rate. Therefore, the information of GMS-4 satellite infrared and visual stretched image have been used. These data are converted and reduced. The digital terrain data of corresponding grid mesh of the satellite data are a available factor for use. The multilevel stepwise discriminatory model is used to estimate rainfall rate grade. At last, a set of software system which can be performed false color image display and process of rainfall rate field at microcomputer has been created. This system has been satisfied a great need for nowcasting. The result has been proved that the estimation of area and shape, of hourly rainfall rate grade that is more than light rain, is generally consistent with the real-time rainfall.

Key words: GMS satellite; terrain; rainfall rate; estimation.