

利用红外卫星云图资料估计降水量方法的研究

方竹君 肖稳安 汤达章

(南京气象学院大气物理学系, 南京 210044)

摘要 在条件气候均匀及范围足够大取样区域, 研讨面平均雨强与云覆盖率、云顶表面亮度温度的标准偏差、云覆盖率随时间的变化率三者之间的关系, 得到用1 h 间隔的数字化红外卫星资料估计降水的三种模式。通过对1991年7月5日、6日、10日降水过程的实例分析表明, 对于日降水量的估计, 效果较为理想。模式可用于与取样时间和地点的相似气象条件区, 且不需要对云进行分离和跟踪、考察对流单体的生命史演变过程, 便于应用。

关键词 数字云图, 条件气候均匀, 降水估计

分类号 P457. 6, P405

长期以来, 定量测量降水一直是广大气象科研人员和预报人员十分关注的问题。目前测量降水的方法, 已普遍应用的有地面雨量计测量和雷达测量。地面雨量计可直接测量降水, 有较高的精度, 但对降水分布不均匀的对流性降水, 代表性就较差。雷达测量基于雷达回波信号和云雨本身之间的关系来估计降水, 可以得到时空分辨率较高的降水分布, 但雷达覆盖面积有限, 不适合估计大面积的降水。随着卫星探测技术的提高和地面处理能力的增强, 由卫星得到的气象参数和信息不断增多, 利用卫星云图作定量降水估计正在蓬勃发展。早期工作是对云系进行分类; 以后又用降水云的覆盖情况估计降水。Gfrith^[1]和 Stout^[2]等又提出了利用连续几张红外及可见光云图估计对流云降水的生命演变法, 认为雨量是云临界面积和云生命史的函数, 要求在整个生命期中追踪云体。Alder 和 Negri 还结合一维云模式^[3]提出了一种估计对流云和层状云降水的方案。中村和信等^[4]利用稠密雨量计资料和 GMS 数字云图比较, 得到了平均雨强 R 和亮度温度 T_{BB} (或反照率 A) 之间的对应关系, 再由 T_{BB} 与 A 二维矩阵上的点和 R 之间的对应关系来推定降水量。

目前, 在条件气候均匀的区域(在作业区域, 一旦降水事件发生, 则任一点、任一时刻, 雨强 R 的分布是相近的, 它近似于该区域气候的雨强分布, 雨强的平均值也就近似不变), 一种简单而有效的利用卫星云图估计降水量的面积-时间积分法, 逐渐受到人们的关注。这种方法的主要思想是忽略个体对流的云的生命史效应, 仅选取数字化卫星云图上某一临界亮度温度包围的云面积作为唯一的预报因子, 利用长时间、大尺度的资料确定降水量与云面积的经验关系估计

降水。Richards⁶⁾讨论了云覆盖率与降水之间的关系, 证明两者之间存在较好的相关性。

本文利用长江流域梅雨锋降水的特征, 提出数字化红外卫星云图估计降水的几种方法, 可推广到估测大范围降水量, 结果满足气候精度的要求, 为全球气候变化的研究, 大气环流、污染物的跨国输送, 提供了可靠的降水量依据。

1 用红外卫星云图资料估计降水量的方法

1.1 方法的依据

数字化红外云图能给出云顶的亮度温度 T_{BB} , 可粗略地反映出云顶的高度, 同时在某种程度上, 还能揭示云内的一些物理特性。一般来说, 以天气尺度的梅雨锋为背景的对流性降水云系, 它在红外卫星云图上亮度温度越低, 云系面积越大, 等温线越密集, 表示云顶越高且上升运动越强, 低空辐合和高空辐散强烈, 大气中水汽丰富, 产生降水的可能性越大。从数字化红外卫星云图上等 T_{BB} 线与同时刻雨量计资料得到的等雨强线可以看出, 降水主要集中在 T_{BB} 较低, T_{BB} 等值线密集区, 即 T_{BB} 的高低及等温线的分布与降水的强弱有一定的对应关系, 为用 T_{BB} 估计降水建立了一定的基础。

1.2 方法概述

(1) 利用云覆盖率与降水强度之间的关系估计降水, 可用下式表示:

$$R = S_1 F_c T \tag{1}$$

这里 R 表示观测区内无条件面平均雨强, 即对整个观测区内降水量进行平均, 得到观测区内面平均雨强, 在这个观测区内, 有的地方有降水发生, 有的不一定有降水发生; F_c 表示观测区内亮度温度为 K 的等值线所包围的云覆盖面积与整个观测区面积的比; S_1 是一系数, 其量纲决定于 R 和 F_c , 为 mm h^{-1} , 相当于可降水云区的平均雨强, 其大小决定于临界亮度温度及气候降水概率的分布函数; T 是降水的持续时间。

在条件气候均匀区域, 各对流单体在生命史演变过程中降水的概率分布是相似的, 因此, 雨强 R 的平均值也近似保持不变^{6,7)}。在此前提下, 若观测面积足够大, 使某一瞬时视场内实际上包含了处于各个发展阶段的对流单体, 那么, 可降水云区内的平均雨强 S_1 是相对稳定的。

(2) 利用云覆盖率和云顶表面亮度温度的标准偏差来估计降水。

梅雨锋上云顶亮度温度等值线的密集程度¹⁾, 可以反应云内上升运动的强弱, 对降水强度的大小产生一定影响。为此, 考虑了云顶表面亮度温度标准偏差:

$$D_c = [1/N \sum_{i=1}^N (T_{BBi} - \overline{T_{BB}})^2]^{1/2} \tag{2}$$

N 是某一临界温度等值线包围的云所占的网格点数, $\overline{T_{BB}}$ 是这 N 个网格点亮度温度的平均, 由 (3) 式可以看出, 如果 D_c 较大, 则反映了云顶表面整体结构的不均匀, 有可能存在等亮度温度线的密集区。特别是当对流云发展处于旺盛阶段, 这种特征表现得非常明显, 于是可用下式:

$$R = S_2 F_c D_c T \tag{3}$$

S_2 的量纲由 R, F_c, D_c 决定, 为 $\text{mm h}^{-1} \text{K}^{-1}$ 。

(3) 利用云覆盖率与云顶亮度温度的标准偏差的乘积、云覆盖率随时间的变化率和云覆盖率与云顶表面平均灰度函数 $f(1)$ 的乘积三个因子估计降水, 其公式表示如下:

$$R = (S_{k1} F_c D_c + S_{k2} dF_c/dt) + S_{k3} F_c f(1) T \tag{4}$$

1) 肖稳安, 张运刚. 1991梅雨锋 T_{BB} 特征与降水(待发表)

在方法(1)中,条件气候均匀及取样面积足够大的条件往往只能近似满足,而难以完全满足,因此,有必要综合考虑云体的各种物理性质对降水的影响。研究表明,对于对流云单体的降水系统,降水主要发生在云团发展和旺盛阶段,这时云顶发展较高,云顶温度较低,冷云顶的面积逐渐扩大, $T_{\text{雨}}$ 等值线逐渐趋于密集,而当天气系统减弱,云区开始消亡的时候,情况就发生了逆转,在此我们选取三个因子进行多元回归分析,除去与降水相关性不显著的量,得到一个多元回归方程。

1.3 气候降水概率分布的统计结果

选取1991年7月6日、8日、9日,分布范围在 $29.0^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$, $111.0^{\circ}\sim 120.0^{\circ}\text{E}$ 之间,1 h的雨量资料,作雨强的概率分布统计。得到3 d降水强度的累积分布(图1a)。另外,再选取1986年~1991年梅雨季湖北省的广济、咸宁、孝感、黄陂、黄冈、仙桃、监利、浠水、崇阳、通城、潜江11个雨量站的资料。作同样的统计,得到6年的气候降水强度的累积分布(图1b)。

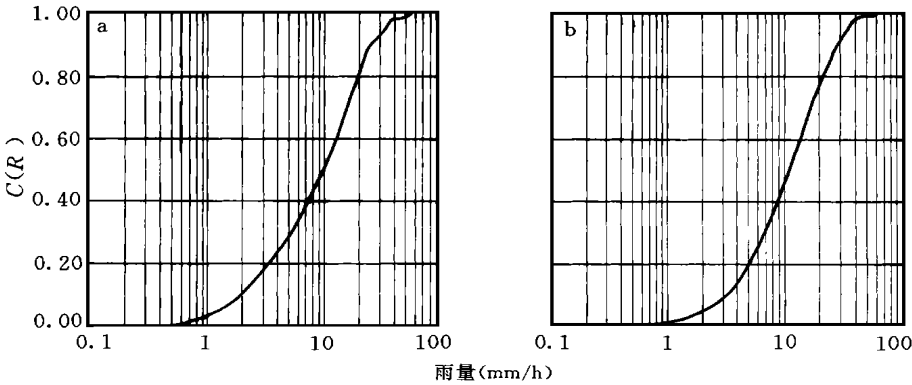


图1 3天(a)、6年(b)资料统计的降水强度累积分布

Fig. 1 Accumulative distributions of rainfall intensity,

based on statistics of rainfall data in 3 days(a) and 6 years, respectively

图中纵坐标表示气候降水强度的累积分布函数:

$$C(R_i) = \frac{\int_{R_i}^{\infty} RP(R) dR}{\int_{-\infty}^{\infty} RP(R) dR} \tag{5}$$

由于雨量计测量精度的限制,这里选取 $\tau = 0.5 \text{ mm h}^{-1}$,即认为雨强小于 0.5 mm h^{-1} 时探测不到。在气候统计的过程中,我们发现小的雨强常常占有相当大的频率,但对累积雨量的贡献却很小,为了更好地体现大雨强对降雨量的贡献,特选择(5)式来表示气候雨强的统计特征。

由图比较上述两个时段的统计结果,两者有一定的相似性,在3 d的降水强度累积分布中, 8 mm h^{-1} 以下的降水,对总降水量的贡献是40%,而6 a资料得到的气候降水强度累积分布中是35%;对于 20 mm h^{-1} 以下的降水,两者对总降水量的贡献基本上都达80%,两条曲线基本上是相似的,可以认为取样范围内近似满足气候的降水概率分布函数相似这一条件。

1. 4 降水估计模式

1. 4. 1 单因子回归分析

(1)降水强度与云覆盖率之间的关系

取3 d 共56个时次的卫星资料及雨量资料, 取样范围在29. 0 ~ 34. 5 N, 111. 0 ~ 116. 5 E。利用卫星资料计算出取样范围内亮度温度等于230 ~ 254 K 等值线所包围的云面积与观测面积的比值 F_c (以下简称云覆盖率), 与由雨量资料通过 Barnes 客观插值方案得到地面无条件面平均雨强 R , 进行一元线性回归分析, 用最小二乘法拟合, 得到临界温度从230 ~ 254 K 的25个回归关系式:

$$R_i = a_i + b_i F_c \quad (i = 1 \dots 25)$$

相关分析的结果表明, 临界温度 $\leq - 237$ K 的雨强与云覆盖率之间的相关性均高于 0. 613 03是显著的。为了保证雨强与云覆盖率之间有较高的相关, 以及使线性方程中的截距尽量小, 使估计降水量时, 不致产生较大的误差。我们选取临界温度 $K_0 = 232$ K (相关系数为 0. 694 18), 得到线性模式1:

$$R = 0. 183 + 4. 533 F_c$$

将上式两边再乘以降水持续时间, 就可以得到某一时段的累积面平均降水量。

(2)降水强度与云覆盖率和云顶表面亮度温度标准偏差的乘积的关系

设标准偏差为 D_c , 取 $K_0 = 230 \sim 254$ K, 对 R 和 $F_c D_c$ 进行一元线性回归分析, 分析结果表明 R 和 $F_c D_c$ 的相关性比较好, 相关系数要大于模式1的回归分析中相同临界温度下的相关系数约大于0. 672 75。其原因之一是, 亮度温度的标准偏差能从某种程度上反映云体结构的不均匀性, 反映云内上升运动的强弱, 从而影响降水强度。

仍取 $K_0 = 232$ K (相关系数为0. 791 31), 得到线性模式2:

$$R = 0. 236 + 0. 645 F_c D_c$$

1. 4. 2 多因子回归分析

选取以下因子作回归分析:

因子 a . 云覆盖率 F_c

因子 b . 云覆盖率与云顶表面亮度温度标准偏差的乘积 $F_c D_c$

因子 c . 云覆盖率与云顶表面平均灰度的函数 $f(1)$ 的乘积 $F_c f(1)$, 假定 $f(1) = (\text{平均灰度} - 175) / 10$

因子 d . 云覆盖率随时间的变化率 dF_c / dt

同样选取7月6日、8日、9日3 d 的卫星云图资料与雨量资料共50个时次的值分析无条件面平均雨强 R 与四个因子的关系。应用多元回归分析理论, 求出了雨强与不同因子的回归分析结果(表1, 表2, 表3)。表中 K_0 是临界亮度温度, b_0, b_1, b_2, b_3 是回归系数, F 是总体显著性检验, f_b, f_c, f_d 则分别表示 R 与 b, c, d 各因子的相关显著性检验, d_c 表示的是平均残差平方和。

回归分析的结果表明, 雨强与 b, d 两因子的相关性最为显著(表4), 取 $K_0 = 232$ K 得到一个双因子线性模式3:

$$R = 0. 301 + 0. 632 F_c D_c + 5. 016 dF_c / dt$$

表1 雨强与 b 、 c 、 d 三因子相关关系分析

Table 1 Analyses of multiple correlation between the rainfall rate and the factors ' b ', ' c ', and ' d '.

Factor ' c ' is the product of cloud coverage and a function of mean gray level at cloud top. Factor ' d ' is the temporal variability of cloud coverage

k_0	b_0	b_1	b_2	b_3	d_c	F	r	f_b	f_c	f_d
230	0.33	0.63	0.09	4.74	0.77	31.65	0.82	3.62	0.03	2.90
232	0.27	0.51	0.19	5.59	0.82	29.28	0.81	2.76	0.01	4.03
234	0.22	0.48	0.16	5.86	0.83	28.31	0.81	3.17	0.13	4.79
236	0.14	0.25	0.46	6.83	0.95	23.06	0.77	0.93	0.97	6.33

表2 雨强与 b 、 d 两因子相关关系分析

Table 2 Analyses of multiple correlation between the rainfall rate and the factors ' b ' and ' d '

k_0	b_0	b_1	b_2	d_c	F	r	f_b	f_d
230	0.35	0.69	4.46	0.76	48.45	0.82	73.68	3.72
232	0.30	0.63	5.02	0.80	44.64	0.81	65.93	4.49
234	0.24	0.57	5.40	0.82	43.20	0.81	62.24	5.33
236	0.18	0.49	5.61	0.95	34.12	0.77	47.64	5.39

表3 雨强与 a 、 d 两因子相关关系分析

Table 3 Analyses of multiple correlation between the rainfall rate and the factors ' a ' and ' d '

k_0	b_0	b_1	b_2	d_c	F	r	f_a	f_d
230	0.27	4.64	8.70	0.91	35.88	0.77	52.60	12.79
232	0.24	4.45	9.17	0.97	32.70	0.76	46.14	13.51
234	0.22	4.22	9.50	1.02	29.61	0.74	39.99	14.36
236	0.21	3.83	9.46	1.17	23.10	0.70	29.50	13.51

通过以上的回归分析可知,雨强与 a 、 b 、 c 、 d 因子都存在不同程度的相关性。由于降水强度与云覆盖率等因子的关系是一种经验的关系,并不存在明显的物理基础,因此,利用不同因子估计降水都会带来一定的误差。多元回归分析的目的在于,选取其中对雨强影响显著的物理因子,得到一定的经验关系,然后再把它应用于实际的降水估计。

以上得出的三种线性模式,雨强与各预报因子之间的相关性非常显著,相关系数均在0.7以上,具有一定的实用价值。

如果仍取7月6日、8日、9日的卫星资料,把取样面积缩小到14 115 km²,对雨强与云覆盖率的关系作一元线性回归分析的结果表明,当取样范围缩小时,云覆盖率与雨强的相关性明显减小,因此,在分析它们的关系时,必须保证足够大的取样范围。

需要说明的是,本文在利用云覆盖率与雨强之间的关系进行回归分析的时候,忽略了许多其他复杂的因子,仅仅利用一定的临界温度值来确定降水云面积,由于临界值是任意选取的,云的覆盖面积与真正的降水面积之间存在较大差别,这引起回归系数随临界温度值而变化,所以我们选取一个最佳临界亮度温度 $K_0=232\text{ K}$ 。

此外,用红外云图作间接的雨量估计,云和降雨之间的关系是通过气候统计经验确定的,建立在一定的气候条件基础上,因此,这3种模式仅限于用来确定这种关系的时间和地点,可用

于其他时间和地点的程度, 取决于两地之间气候条件的相似程度。

2 降水估计实例分析

2.1 在扩展范围内估计降水

把原取样范围扩展到 $30^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $111.9^{\circ}\sim 120.2^{\circ}\text{E}$, 分别利用模式1、2、3来估计降水, 图2为模式2估计降水(虚线)与真实降水(实线)的曲线。由图可见, 模式估计曲线与真实的雨强曲线总体走向是一致的, 只是实测雨强较大时, 模式估计值偏低了一些。此外还讨论了用模式2估计降水, 分别经过6 h、20 h 平均后每小时的平均绝对误差和未经平均的每小时绝对误差, 分析表明, 尽管每小时的误差较大, 但经过一定的时间平均效应后, 估计偏高值和偏低值抵消了一部分, 所以总体误差减小。

2.2 在相同区域相似气候条件下估计降水

取7月5日、10日卫星云图资料, 取样范围与应用于回归分析得到模式的范围一致, 分别利用模式估计降水。结果表明, 对于这两天每小时的降水估计都存在较大误差, 其中有的估计值偏高, 也有的偏低。但从日降水量的估计效果来看较为理想, 比如7月5日模式1、2、3估计降水, 相对误差分别

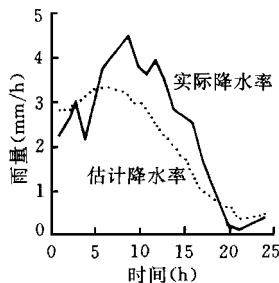


图2 1991年7月6日卫星云图
降水估计值与实测值比较

Fig. 2 Comparison between the direct of
servatiions ofrainfall and the estimations
from satellite imagery on July 6, 1991

为52.75%、24.53%、38.87%, 7月10日模式1、2估计降水, 相对误差分别28.07%、27.83%。

以上分析说明, 降水估计效果与取样时间尺度、空间尺度相关, 一般来说, 时间尺度越长, 空间尺度越大, 效果越好。

3 结 语

通过3种估计模式的研究和实例分析, 得到以下几点结论

(1) 只要取样范围足够大, 大多数可降雨云系的有效平均降雨率过程演变时变化不大。如果取样面积足够大, 以至包含了生命史不同阶段的大量单体, 则降雨率近似处于稳定状态。

(2) 对雨量资料的统计分析表明, 湖北、河南、江苏、安徽梅雨季节的降水强度概率分布是相似的, 近似条件气候均匀, 因此, 3种模式可用于该时空区域。

(3) 在采样面积很大, 能保证足够大的云覆盖面积的情况下, 3种模式都可以用于日降水量的估计, 相对误差较小, 而对于每小时降水量的估计, 存在较大误差。从回归分析和降水估计实例来看, 模式2的降水估计效果要好一些, 因为它从某种程度上考虑了云团发展强弱对降水效率的影响。

(4) 利用3种模式估计降水, 都不需要对云进行分离和跟踪, 考察对流单体的生命史演变, 便于业务上的应用。

由于资料限制, 本文回归分析取样的时次有限, 模式难以达到很好的气候代表性, 另外, 用卫星云图估计降水量的方法也只作粗浅的研究, 尚待于进一步探索。

参 考 文 献

studies. Mon Wea Rev, 1978, 106(8): 1153 ~ 1171

2 Stout J E, Martin D W, Sikdar D N. Estimating GATE rainfall with geosynchronous satellite images. Mon Wea Rev, 1979, 107(5): 585 ~ 598

3 Adler R F, Negri A J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. Appl Meteor, 1988, 27(1): 31 ~ 51

4 中村和信, 土屋乔, 由日本 GMS 的空间平均资料推定降水量. 天气(日), 1985, 32(10): 505 ~ 572

5 Richard F, Arkin P. The relationship between satellite-observed cloud cover and precipitation. Mon Wea Rev, 1981, 109(5): 1081 ~ 1093

6 Doneaud A A, Smith P L, Ddnns A S, et al. A simple method for estimating convective rain volume over an area. Water Resour Res, 1981, 17(6): 1676 ~ 1682

7 Dneaud A A, Niscov S I, Priegnitz D L, et al. The area-time integral as an indicator for convective rain vloumes. J clim Appl meteor, 1984, 23(4): 555 ~ 561

A STUDY ON THE METHODS FOR
ESTIMATING RAIN AMOUNT FROM
GEOSTATIONARY SATELLITE INFRARED IMAGES

Fang Zhujun Xiao Wen 'án Tang Dazhang

(Department of Atomospheric physics, NIM, Nanjing 210044)

Abstract The relationship of the rainfall rate averaged over a sampling area, which is sufficiently large and conditionally homogeneous of climate, with the cloud coverage, standard deviation of the brightness temperatures at cloud top, and temporal variability of the cloud coverage, has been studied, and three statistical models are obtained for estimating rain amount with digitized, 1-h interval infrared images from geostationary satellite. The results from the precipitating weather on the 5th, 6th and 10th of July in 1991 show that the models are quite good at the estimation of daily precipitation. Because cloud isolation and tracking to examine the life stage are not necessary, the models are easy for applications and can be used in other areas as well provided the sampling time and meteorological conditions are similar.

Keywords digital infraed images, conditional homogeneity of climate, rainfall estimation