

梅雨锋层状云系 降水效率的一种计算方法

周文贤 谢平平*

提 要

在假定空气绝热上升的基础上,本文根据云的凝结率和地面的降水率,推导出层状云系降水效率的计算公式,其优点是可以用常规探空资料和地面雨量求得降水效率。本文还利用1980和1983年梅雨期的南京、阜阳和安庆探空资料估算云中垂直气流速度,得到云的凝结率;对上述两年的地面降水率分别用安徽白湖地区和南京以西滁县地区的加密雨量站网求得平均雨量,进而得到梅雨锋层状云系的降水效率。

目前,人工降雨是根据贝吉隆过程或者碰并增长过程,提高云系的降水效率,达到增雨的目的。为了避免人工降雨的盲目性,必须研究云系的降水效率。另外,降水效率的研究对于了解自然降水机制也是有帮助的。

国外许多学者对各类云系的降水效率进行了研究。美国霍布斯(Hobbs, P. V., 1980)^[1]等借助多卜勒雷达测量云中垂直气流速度,研究了温带气旋中雨带的降水效率,指出暖区雨带的降水效率为40—50%;窄冷锋雨带的降水效率为30—50%;宽冷锋雨带的降水效率可达80%。牛顿(Newton, C. M.)用估计降到地面的水汽平流值的方法,计算了美国俄克拉荷马州两条飚线的降水效率,其值约为50%。马尔威兹(Marwitz, J. D., 1972)^[2]研究了风切变与降水效率的关系,认为两者可能呈反相关。索柯凯贝拉(Sakakibara, H.)^[3]研究了浅薄对流云引起的暴雨的降水效率,得出了大于1的数值,他们认为降水效率数值大于1的原因在于所用参数的估算存在误差,但是降水效率偏高是肯定的。现在国内对于云系降水效率的研究还做得不多。

迄今降水效率的定义还不太统一,常用的大致有:1.到达地面的降水率与云中凝结率之比;2.到达地面的降水量与云中含水量之比;3.成为降水的水量与绝热上升凝结的水量之比。显然,各类云系的降水效率是各不相同的,即使对同一降水性云系,根据不同定义计算出的降水效率也不相同。

本文采用的降水效率是到达地面的降水率和云中凝结率之比, 地面的降水率用加密雨量站网的平均区域雨量, 云中凝结率用湿绝热上升的水汽凝结量, 从而研究梅雨锋层状云系的降水效率。

一、计 算 方 法

1. 湿绝热上升凝结率

由水汽方程

$$\frac{dq}{dt} = -R_{\text{cond}} + K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$$

式中 R_{cond} 为凝结率, q 为比湿, K_q 为水汽的乱流扩散系数。如果忽略乱流扩散和挟卷作用, 则云的凝结率为 $R_{\text{cond}} = -dq/dt$ 。由于云内按湿绝热过程考虑, 则得

$$R_{\text{cond}} = -\frac{dq_s}{dt} \quad (1)$$

式中 q_s 为饱和比湿。

考虑到水汽凝结释放潜热, 根据热力学第一定律和静力学方程, 可得

$$-Ldq_s = c_p dT + g dz \quad (2)$$

式中 c_p 为空气的等压比热, g 为重力加速度, T 为空气温度。

对 (2) 式各项除以 dt , 则得

$$-L \frac{dq_s}{dt} = W \left[c_p \frac{dT}{dz} + g \right]$$

式中 $W = dz/dt$ 为云内垂直气流速度, dT/dz 为饱和湿空气的垂直变温率。

注意到饱和湿空气的垂直变温率 dT/dz 满足*

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_{pd}} \cdot \frac{p + \varepsilon LE/RT}{p + \varepsilon^2 EL^2/c_{pd} R_d T^2}$$

式中 c_{pd} 为干空气的等压比热, E 为饱和水汽压, p 为气压, R_d 为干空气的气体常数, ε 等于 0.622。

此时云的凝结率为

$$R_{\text{cond}} = Wg \frac{L - \frac{c_{pd}}{\varepsilon} T}{L^2 + \frac{c_{pd} R_d}{\varepsilon^2} \cdot \frac{p T^2}{E}}$$

* 王鹏飞, 云雾降水物理学讲义, 南京气象学院大气物理系, 1980

对于单位截面云柱来说, 则有

$$R_{\text{cond}} = \frac{1}{R^*} \int_{z_b}^{z_T} W g [(p-E)M_d + EM_w] \frac{\left(L - \frac{c_{pd}}{\varepsilon} T\right) / T}{L^2 + \frac{c_{pd} R_d}{\varepsilon^2} \cdot \frac{p T^2}{E}} dz \quad (3)$$

式中 R^* 为普适气体常数, M_d 为干空气摩尔气体质量, M_w 为水汽摩尔气体质量, z_b 为云底高度, z_T 为云顶高度。

2. 云中垂直气流速度

由于目前还不能直接测量云内垂直气流速度 W , 所以只能由其它途径计算, 这里采用连续方程修正方法计算。

由连续方程可得

$$W_i = W_{i-1} + \bar{D}_i \Delta p$$

式中 W_i 为第 i 层处的垂直气流速度, $\bar{D}_i = (D_i + D_{i-1})/2$ 是第 i 层至第 $i-1$ 层的平均散度, $\Delta p = p_{i-1} - p_i$ 是第 $i-1$ 层与第 i 层的气压差。 D_i 可用三站的探空资料计算, 其公式为

$$D_i = \frac{(u_1 - u_2)(y_2 - y_3) - (u_2 - u_3)(y_1 - y_2) - (v_1 - v_2)(x_2 - x_3) + (v_2 - v_3)(x_1 - x_2)}{(x_1 - x_2)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)}$$

式中 x_i 、 y_i 分别是各站在东西和南北方向上的坐标量; u_i 、 v_i 分别是各站水平风的向东和向北分量。

对 W_i 再作如下修正*

$$W_K' = W_K - \frac{K(K+1)}{N(N+1)} W_N$$

式中 $N=9$ 是所取层次总数, K 为层次序数。

3. 地面降水率

在计算垂直气流速度的三个探空站的区域内, 选择一定范围的密度较高的雨量站网, 然后按以下步骤求出降水率 R_p : (1) 根据定时观测的雨量, 绘制地面雨量图; (2) 分析雨量图的等值线; (3) 用求积仪求出各等雨量线之间的面积 S_i , 其间的雨量取两条等雨量线的算术平均值 R_i ; (4) 根据公式 $\bar{R} = \sum R_i S_i / \sum S_i$, 求出平均区域雨量图; (5) 最后将平均区域雨量折合成地面的降水率 R_p 。

4. 降水效率

根据定义, 降水效率是到达地面的降水率和云中凝结率之比, 即

$$E = \frac{R_p}{R_{\text{cond}}}$$

* 吉林省气科所, 科研报告第4期, 1978

其中 R_{cond} 由(3)式计算而得。

二、实 例

1. 资料来源

1980年梅雨期间在安徽白湖地区进行了综合观测, 面积约为 50×50 平方千米的区域内设置了23个雨量站, 定时观测雨量, 并用711测雨雷达跟踪云系的移动和测定降水回波强度。

1983年梅雨期间在南京西部滁县地区一块南北宽约120千米, 东西长约115千米的区域内进行了观测。该区域内有43个气象站和水文站, 组成站网测量降水量。711测雨雷达跟踪云系的移动和测定降水回波强度。

估算云中垂直气流速度是选用南京、阜阳、安庆的探空资料(07时或19时), 云中的温度和等压面高度取上述三站的平均值。地面雨量也采用07时或19时的资料。

云底高度 z_b 由绝热上升凝结高度确定, 云顶高度 z_T 取自07时或19时雨量站网上空的平均最大雷达回波顶高度。

2. 计算结果

用上述方法分别对1980和1983年梅雨期间云系的云内凝结率、地面降水率及降水效率进行了计算, 所得结果列于表1内, 并且列出了对应的雷达回波强度。

表1 凝结率、降水率及降水效率的计算结果

日 期	降水率 R_p 10^{-4} 千克/米 ² ·秒)	凝结率 R_{cond} (10^{-4} 千克/米 ² ·秒)	降水效率 E	对应的雷达 回波强度
1980年6月10日	12.065	9.754	1.237	20dB
6月12日	4.605	6.994	0.658	20dB
6月19日	4.264	6.252	0.682	25dB
6月21日	2.242	3.786	0.592	20dB以上
7月8日	24.233	7.260	3.334	40dB以上
1983年6月23日	4.219	2.637	1.600	25dB以上
6月25日	2.215	5.647	0.376	20dB
6月30日	6.392	12.472	0.513	20dB以上
7月1日	4.344	6.919	0.629	

三、讨 论

1. 由表1可以看到, 9次实例的降水效率为0.376至3.334不等, 其中6次在37%—68%之间, 平均值为57%。说明对于稳定性层状云系(其平均雷达回波强度在20dB左右), 利用上述计算降水效率的方法基本上是可行的。

2. 由表1还可以看到, 9次实例中有3次的降水效率大于1, 从理论上来看是不可能的。但是问题在于本文所述的计算方法没有考虑水汽的水平输送和辐合以及云系边缘的挟卷作用等因素。如以 M 表示某一固定空间区域内云中水分总质量, F_{out} 表示单位时间内离开该空间区域的水质量, F_{in} 表示单位时间内进入该空间区域的水质量, 则必然满足下列水分平衡方程

$$\partial M / \partial t = R_{cond} - R_p - F_{out} + F_{in}$$

根据降水效率的定义, 由上式可得

$$E = 1 - \frac{1}{R_{cond}} \cdot \frac{\partial M}{\partial t} - \frac{F_{out}}{R_{cond}} + \frac{F_{in}}{R_{cond}}$$

如果雨带中有水分水平输送作用和辐合作用, 则 F_{in} 为正值; 或者云系边缘有挟卷作用, 则 $\partial M / \partial t$ 为负值, 此时完全有可能导致降水效率 E 大于1, 特别是云系内对流剧烈、水分循环充分时, E 值可远大于1。1980年7月8日就是一例, 值得进一步研究。对于层状云内嵌入对流泡的云系或水平范围较小的云系(其平均雷达回波强度在25—40dB之间), 上述计算降水效率的方法需作必要的修正。

3. 必须指出, 本文所得结果存在着一定的误差。降水率是用区域平均的雨量折合而来的, 这里就存在着地面雨量的观测误差和各雨量等值线之间面积的计算误差。凝结率的误差是在饱和湿绝热上升的条件下计算水汽的凝结量时造成的, 其中垂直气流速度直接影响到凝结率的大小。国外用实测垂直气流速度计算凝结率, 而本文用连续方程修正方法计算的是区域平均垂直气流速度, 与实测值相比肯定会有一定的误差, 特别是与嵌入对流泡的层状云系情况相比会有较大的出入。上述问题有待于今后进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Hobbs, P.V. and Matejka, T., The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones, J. Atmos. Sci., Vol. 37, No. 3, 588—596, 1980.
- [2] Marwitz, J. D., Precipitation efficiency of thunderstorms on the high plains, J. De Rech. Atmos., Vol. 6, No. 4, 365—370, 1972.
- [3] Sakakibara, H., Heavy rainfall from very shallow convective clouds, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 59, No. 3, 387—394, 1981.

A METHOD OF CALCULATING PRECIPITATION EFFICIENCY IN STRATIFORM CLOUDS

Zhou Wenxian Xie Pingping

ABSTRACT

Based upon the cloud condensation rate and the precipitation rate on the ground, a formula for calculating the precipitation efficiency in stratiform clouds is presented on the assumption that the air rises adiabatically. The primary advantage of this method is that the precipitation efficiency can be obtained by using only the routine sounding data and rainfall measurement. In this paper the cloud vertical velocity and condensation rate are also estimated from the sounding data at Nanjing, Fuyang and Anqing during the plum rain seasons of 1980 and 1983, and the average areal rainfall and condensation rate are calculated by use of the data from the station network in the rain area for the two years. The precipitation efficiency of the plum rain are thus obtained.