

暖积云降水过程中的云雨自动转换*

李桂忱 徐华英

(中国科学院大气物理研究所)

Kessler^[1], Berry^[2], Simpson^[3], Cotton^[4], 胡志晋^[5]等提出了各自不同的云雨自动转换率公式,用参数化的方法处理云雨自动转化过程。本文在二维时变的暖积云降水模式中^[6],使用 Kessler, Berry, 胡志晋三种云雨自动转换公式,对不同强度的暖积云进行了数值计算。

计算结果表明,在暖积云降水数值模拟中,使用不同云雨自动转换公式,对于强暖积云降水总量的影响很小,其变化范围在 6% 以内,对于弱暖积云降水的起时时间和降水总量有一定的影响,降水总量的变化率在 20% 左右,最大不超过 82%,由于降水弱,所造成降水总量的变化并不大。因此,云雨自动转换率对于降水总量是一个不敏感的因子。

1. 公 式

1) Kessler 云雨自动转换公式:

$$P = K_1(Q_c - A/\rho) \tag{1}$$

式中 P 为云雨自动转换率($\text{g}/\text{g}\cdot\text{s}$), K_1 一般取 $10^{-3}/\text{s}$, ρ 为空气密度(g/m^3), Q_c 为云水比含量(g/g), A 为发生云雨自动转换的最低云水含量即阈值,一般取 A 为 $0.5 \text{ g}/\text{m}^3$ 或 $2 \text{ g}/\text{m}^3$ 。公式中的 K_1 和 A 是可调的。

2) Berry 云雨自动转换公式:

$$P = \frac{\rho^2 Q_c^2}{60 \left(2\rho + \frac{0.0266}{D_0} \frac{N_0}{Q_c} \right)} \tag{2}$$

式中 N_0 和 D_0 为云底部初始云滴谱的浓度($1/\text{cm}^3$)和离散度,式中其它符号同式(1), N_0 和 D_0 是根据所研究积云的不同情况而确定的。

3) 胡志晋云雨自动转换公式:

$$P = \begin{cases} 0 & \text{当 } F_c \leq 1 \\ \frac{J_1 \rho^2 Q_c^2}{360 \rho Q_c + 1.20 \frac{N_0}{D_0}} & \text{当 } F_c > 1 \end{cases} \tag{3}$$

式中 $J_1 = 0.5$,

$$\frac{dF_c}{dt} = \frac{\rho^2 Q_c^2}{1.6 \frac{N_0}{D_0} + 120 \rho Q_c} \tag{4}$$

2. 不同强度云对转换率的敏感性

我们用上述几种云雨自动转换公式,对两种不同强度的暖云进行数值计算,以 Berry 的自动转换公

* 本文于 1986 年 5 月 31 日收到, 1987 年 5 月 8 日收到最后修改稿。

式($N_0=500/\text{cm}^3$, $D_0=0.146$)为标准,它的转换率称为 P_B , 其它转换公式的计算结果与 P_B 的进行比较,部分结果列于表 1, 表 2。

对于弱暖积云降水(上升气流最大可达 2.3 m/s, 云最大厚度 2 km, 瞬时最大雨强 10 mm/h 左右, 平均总降水量 3 mm 以下。), 由表 1 可见, 使用阈值 $A=0.5 \text{ g/m}^3$ 的 Kessler 公式比 Berry 公式 P_B 计算的总降水量增加 26%。而 $A=1.5 \text{ g/m}^3$ 的 Kessler 公式却比 Berry 公式 P_B 所计算的总降水量减弱 28%。用 Kessler 公式计算, 阈值大的 ($A=1.5 \text{ g/m}^3$) 比阈值小的 ($A=0.5 \text{ g/m}^3$) 总降水量减少 54%。

对于强暖积云降水(上升气流最大可达 13 m/s, 云的最大厚度 6 km, 瞬时最大雨强 45 mm/h, 平均总降水量 6 mm 以上。), 由表 2 可见, 对于 Kessler 公式, 无论阈值取 $A=0.5 \text{ g/m}^3$ 或 $A=2 \text{ g/m}^3$, 与 Berry P_B 计算的瞬时最大雨强和总降水量都相差不大, 增减率都在 5% 以内。kessler 公式中, A 从 0.5 g/m^3 提高到 2 g/m^3 , 瞬时最大雨强从 45.69 mm/h 提高到 46.38 mm/h, 增加 1.5%, 48 min 总降水量从 6.81 mm 减少到 6.47 mm, 相对减少 5%。由此可认为对于强暖积云, 阈值 A 的大小对总降水量的影响很小。

表 1 弱暖云条件下各转换公式计算的云和降水各参量表

转换公式		最大云水含量 (g/m^3)	最大云厚 (km)	最大上升气流 (m/s)	瞬时最大雨强 (mm/h)	48min 总降水量 (mm) (3.5km 平均)	56min 总降水量 (mm) (3.5km 平均)	总降水增减值 (mm) (48min)	总降水增减率 (%) (48min)
Berry(P_B)	$N_0=500/\text{cm}^3$ $D_0=0.146$	1.82	2	2.33	11.02	1.47	1.53		
Berry加阈	$A=1\text{g/m}^3$	1.86	2	2.33	10.99	1.55	1.62	+0.08	+5.4
	$A=2\text{g/m}^3$	2.17	2	2.33	10.67	1.07		-0.40	-27.2
Kessler	$A=0.5\text{g/m}^3$	1.72	2.5	2.33	11.65	1.85		+0.38	+25.9
	$A=1.5\text{g/m}^3$	2.17	2	2.33	10.19	1.06		-0.41	-27.9
胡志晋	$N_0=500/\text{cm}^3$ $D_0=0.146$	2.92	2	2.33	3.94	0.27		-1.20	-81.6
Berry	$3.75P_B$	1.51	2	2.30	11.98	2.08	2.27	+0.61	+41.5
	$\frac{1}{3}P_B$	2.11	2	2.33	10.16				

A.I.Weinstein^[7]讨论了阈值的影响,在他的计算中阈值 A 从 0.5 g/m^3 增加到 2 g/m^3 时, 转换系数 K' 分别取 $10^{-2}/\text{s}$, $10^{-3}/\text{s}$, $10^{-4}/\text{s}$ 时, 其降水量分别减少 8%, 14.5%, 13.4%, 这些数值比他认为不明显的转换率影响($<10\%$) 也大不了多少。他还给出了阈值 A 加大到 4 g/m^3 , 5 g/m^3 , 6 g/m^3 时, 雨量明显减少, 但这么高的阈值是否合理, 沈志来等^[8] 在新安江流域飞机穿积状云测得的结果指出, 平均云厚为 2.4 km 的积状云, 含水量平均值为 0.79 g/m^3 , 其最大值 2.39 g/m^3 , 这时大云滴浓度达 1672/ m^3 。由此将含水量的阈值假设过大是不合理的, 对于 Kessler 或 Berry 公式, 我们认为其阈值 A 取 2 g/m^3 比较合适。

用胡志晋的云雨转换公式计算了强云, 其 60 min 总降水量为 9.01 mm, 使用 Berry 加门阈 $A=2 \text{ g/m}^3$ 转换公式, 总降水量为 8.95 mm, 如果 $A=4 \text{ g/m}^3$, 其总降水量为 8.93 mm, 这就又进一步说明, 对于强暖积云降水, 使用不同转换公式及所加阈值的不同大小对总降水量的影响不大。对于弱云, 胡志晋的

表 2 强暖云条件下各转换公式计算的云和降水各参量表

转换公式		最大云 水含量 (g/m^3)	最大 云厚 (km)	最大上 升气流 (m/s)	瞬时最 大雨强 (mm/h)	48min 总降水量 (mm) (5.5km 平均)	60min 总降水量 (mm) (5.5km 平均)	总降水 增减值 (mm) (48min)	总降水 增减率 (%) (48min)
Berry(P_B)	$N_0=500/cm^3$ $D_0=0.146$	2.19	6	13.25	44.80	6.70			
Berry加阔	$A=2g/m^3$	2.43	6	13.39	44.81	6.62	8.95	-0.08	-1.2
	$A=4g/m^3$	3.85	6	13.38	55.21	6.39	8.93	-0.31	-4.6
Kessler	$A=0.5g/m^3$	2.10	6	13.10	45.69	6.81		+0.11	+1.6
	$A=2g/m^3$	3.04	6	13.43	46.38	6.47		-0.23	-3.4
胡志晋	$N_0=500/cm^3$ $D_0=0.146$	5.47	5.5	13.15	66.33	6.27	9.01	-0.43	-6.4
Berry	$3.75P_B$	1.80	6	13.26	45.71	6.93		+0.23	+3.4
	$\frac{1}{4}P_B$	2.72	6	13.44	44.56	6.58		-0.12	-1.8

公式比其它公式计算的瞬时雨强和总降水量都要小得多,瞬时雨强降低了64%,总降水量减少81.6%。见表1及表2。

对自动转换率而言,除了阈值以外,各公式的转换率数值也有差异,在一般的云水含量中相差2—4倍,最大可达10倍。因此,我们对Berry大陆性积云的转换率扩大3.75倍、缩小4倍分别进行了模式计算,来分析云雨自动转换率的大小对降水的影响。

对强暖云将Berry转换公式的转换率扩大3.75倍,其最大瞬时雨强由44.80 mm/h提高到45.71 mm/h,增加了2%,总降水量由6.70 mm提高到6.93 mm,增加3.4%。如果将转换率降低4倍,最大瞬时雨强由44.80 mm/h减少到44.56 mm/h,降低0.5%,总降水量由6.70 mm降低到6.58 mm,减少1.8%。对于弱暖云也进行了同样的计算,将Berry公式的转换率扩大3.75倍,这样瞬时最大雨强由11.02 mm/h提高到11.98 mm/h,增加8.7%,而总降水量由1.47 mm增加到2.08 mm,增加41.5%。

我们还做了瞬时雨强及总降水量随时间变化比较图。

图1是强暖云瞬时雨强及总降水量随时间的变化,图2是弱暖云瞬时雨强及总降水量随时间的变化。由图1图2可见,自动转换率扩了3.75倍,即使对于变化较大的弱暖云,所引起瞬时雨强及总降水量的变化也仅在50%以内。

在计算中我们还发现,不论是强还是弱暖云降水的例子,云雨转换率对云发展的最大厚度和上升气流的最大值都没有影响,见表1及表2。对于强云,使用各种不同转换公式,云的最大厚度都在6 km,而最大上升气流都在13 m/s左右,对于弱云,最大云厚都在2 km,最大上升气流都在2 m/s左右。这是因为由于转换率不同所引起降水总量值的变化是一个小量,这种由于转换率大,转换雨水多,减少拖带作用而引起上升气流的增加值一般还不到0.1 m/s,最大也只有0.4 m/s。由于上升气流变化极小,形成云的最大厚度也就没有多大变化。

3. 自动转换率在降水形成中的作用

在参数化方法中云水通过自动转换和碰并两个过程转换为雨水。碰并转换过程是雨滴碰并云水而

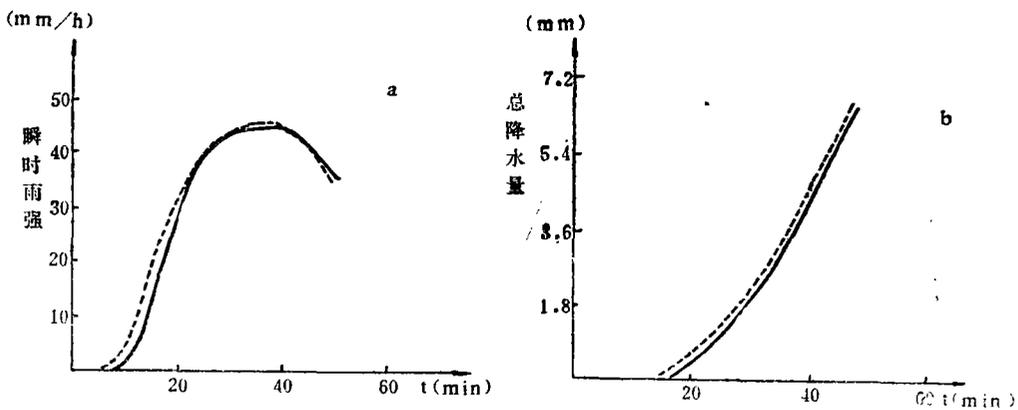


图 1 不同大小自动转换率计算的强暖云降水的演变
(——自动转换率 = P_B ,自动转换率 = $3.75 P_B$)

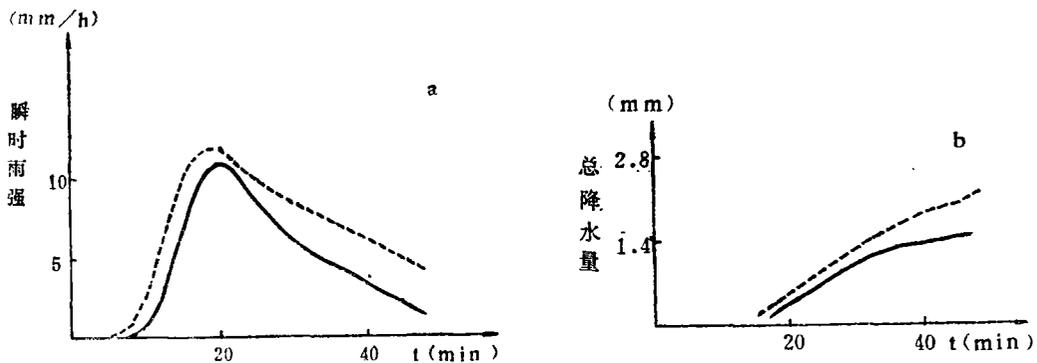


图 2 不同大小自动转换率计算的弱暖云降水的演变
(——自动转换率 = P_B ,自动转换率 = $3.75 P_B$)

将云水转为雨水的，因此当云形成初期云中尚未形成雨滴或雨水含量甚少时碰并转换率为零或很小，这时往往自动转换率要比它大，即在降水形成初期自动转换率起主要作用，随着雨水含量增加碰并转换率加大并大大超过自动转换率，这时自动转换率的大小对雨水形成的影响就很小了。表 3 给出了模式中计算的两种转换率数值，就强云的例子来看，云发展到 8 min 时，碰并率已是自动转换率的 1.5 倍，云发展到 24 min 时，碰并率就是自动转换率的 3.8 倍了。对于弱降水云，同样，随着云的发展，自动转换率

表 3 云雨自动转换率与碰并转换率随时间变化表

		$t(\text{min})$	8	12	16	20	24	28	32
		$P(\text{g/m}^3\text{s})$							
强暖云降水	$P_{\text{自}}$	0.04	0.08	0.07	0.10	0.09	0	0	
	$P_{\text{碰}}$	0.06	0.56	1.19	2.09	3.40	1.69	0.11	
	$P_{\text{碰}}/P_{\text{自}}$	1.5	7	17	20.9	37.78			
弱暖云降水	$P_{\text{自}}$	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0	
	$P_{\text{碰}}$	0.05	0.24	0.29	0.20	0.17	0.15	0.12	
	$P_{\text{碰}}/P_{\text{自}}$	1.67	6	9.7	20	17	15		

的作用也越来越小,但由于降水弱,降水维持时间短,碰并率超过自动转换率的值少,碰并率与自动转换率比值的最大值为 20,所以,弱降水云受自动转换率的影响大一些。

4. 结 论

1. 云雨自动转换率的大小,只对发展初期的云或弱云的降水量有一定的影响,对云中上升气流和云厚无影响。当云发展到一定强度后,云水通过碰并过程向雨水的转换率远远超过自动转换率,这两个转换率的比值就是在弱降水云中也要达 10 倍以上,所以降水一旦启动,自动转换率的大小对降水总量不会产生多大影响。因此,在暖积云降水的数值模拟中,云雨自动转换率对降水总量不是一个敏感因子。

2. 当讨论降水的起始时间和弱降水问题时,云雨自动转换公式中加上适当的阈值是必要的。

参 考 文 献

- [1] Kessler, E., Microphysical parameters in relation to tropical cloud and precipitation distribution and their modification, *Geophysica International* (5), 79—88, 1965.
- [2] Berry, E. X., Modification of the warm rain process, *proc. First Nat. Conf. on Wea. Mod. Amer. Meteor. Soc.*, Albany, New York, 81—85, 1968.
- [3] Simpson, J., and V. Wiggert, Models of precipitation cumulus towers, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 471—489, 1969.
- [4] Cotton, W. R., Numerical simulation of precipitation development in supercooled Cumuli-Part I, *Mon. Wea. Rev.*, 100, 757—763, 1962.
- [5] 胡志晋、蔡利栋, 积云暖雨过程及其盐粉催化的参数化数值模拟, *大气科学*, 3, 4, 334—342, 1979.
- [6] 徐华英、李桂忱、郝京甫, 积云降水过程的数值模拟研究, *中国南方云物理学和人工降水论文集*, 110—120, 1986.
- [7] Weinstein, A. I., A numerical model of cumulus dynamics and microphysics, *J. Atmos. Sci.*, 27, 246—255, 1970.
- [8] 沈志来、何珍珍、黄美元, 新安江流域积状云中巨盐核、大云滴和含水量的观测分析, *中国南方云物理学和人工降水论文集*, 67—73, 1986.

THE STUDIES OF AUTOCONVERSION RATE FROM “CLOUD WATER” TO “HYDROMETEOR WATER” IN THE RAIN FORMING PROCESS OF WARM CUMULUS CLOUD

Li Guichen Xu Huaying

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper three formulas of autoconversion rate were used to calculate the precipitation using a two-dimensional and time-dependent model of warm cloud. The result shows that the differences in total precipitation are small (less than 6%). But it becomes larger in weak warm rain process, about 20%, with maximum value less than 82%. It is found out that the autoconversion rate is not a sensitive factor in numerical simulation of warm cloud rainfall.