# 冰雹生长物理过程参数化研究*

房 文 郑国光 胡志晋

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

对冰雹生长物理过程的理论与实验研究都表明, 冰雹生长过程中表面热量与质量传输决定了冰雹生长率及其结构特征。然而, 许多模式研究者在冰雹的热量平衡方程中, 关键的热传输系数一直引用 Ranz 和 Marshall 在小雷诺数下对水滴蒸发的测定结果进行外推, 与实际的冰雹状况差距较大。本文利用郑国光在与实际冰雹尺度相对应的雷诺数范围内, 对热传输系数的测定结果, 进行参数化处理, 应用于胡志晋等的一维及三维冰雹生长模式, 结果发现冰雹的融化、蒸发、干湿增长都有很大不同。其中冰雹的融化率比原模式大 12% ~ 50%; 冰雹的蒸发率比原模式大 10% ~ 200%; 冰雹的干湿增长率增大 10% ~ 40%。

关键词: 冰雹, 参数化, 数值模拟, 热传输。

## 1 引 言

对冰雹生长物理过程的理论与实验研究都表明[1~3], 冰雹生长过程中表面热量与质量传输决定了冰雹生长率及其结构特征。冰雹动力学特征决定了冰雹在云中的运动状况、滞留时间和下落到地面的成灾强度, 实质上也影响着云中冰雹生长状况。冰雹热传输直接影响冰雹的湿增长、融化、蒸发等。然而许多云物理模式研究人员在冰雹增长的热量平衡方程中一直采用 Ranz 和 Marshall 在小雷诺数下 ($Re \leqslant 200$) 对水滴蒸发所测定的热量传输系数, 并将其扩展到 $1\times10^4 \leqslant Re \leqslant 1\times10^7$。与实际的冰雹状况差距较大[4,5]。Macklin 实验研究了融化的冰粒子的热量和水汽传输, 他发现粒子传输的热量和水汽要比用 Ranz 和 Marshall 的传输系数计算结果大得多, 并且扁球形粒子的热量和水汽传输要比圆球形粒子大得多。Zheng G G[5] 利用一个热成像系统精确测量了 $1.1\times10^4 \leqslant Re \leqslant 5.2\times10^4$ 范围内冷却的冰粒子的表面温度, 并设计发展了一个确定热量传输系数($Nu$, Nusselt 数) 的数值模式。结果表明, 对于光滑的球形粒子, 他们得到的 $Nu$ 数比 Ranz 和 Marshall 表达式计算结果大 30% 左右; 扁球形冰粒子的 $Nu$ 数比相同直径的球形粒子大 40%; 表面粗糙的冰粒子的 $Nu$ 数比相同直径的球形粒子的甚至提高了 100%。

过去, 在冰雹的热量平衡方程中, 关键的热传输系数一直引用 Ranz 和 Marshall 在小雷诺数下($Re \leqslant 200$) 对水滴蒸发的测定结果, 即:

$$Nu = 2.0 + 0.53 \times Re^{0.5} \tag{1}$$

而 Zheng G G[5] 在加拿大多伦多大学利用垂直可控压风洞模拟冰雹生长的实验中, 测定的热传输系数在 $1\times10^4 \leqslant Re \leqslant 5.2\times10^4$ 条件下,

$$Nu = 0.330 \times Re^{0.57} \tag{2}$$

$$Nu = 0.313 \times Re^{0.599} \tag{3}$$

$$Nu = 0.114 \times Re^{0.74} \tag{4}$$

其中式(2) 适用于光滑圆球形冰雹粒子, 即形状比 $\alpha = 1$; 式(3) 适用于光滑扁球形粒子, 即 $\alpha = 0.67$; 式(4) 适用于表面粗糙度 $\beta = 2\%$ 的光滑扁球形($\alpha = 0.67$) 冰雹粒子。

这里将式(1), (2), (3), (4) 的 $Nu$ 分别用 $Nu_1$, $Nu_2$, $Nu_3$ 和 $Nu_4$ 表示。下文中利用式(1), (2), (3), (4) 计算所得相应物理量分别加下标 1, 2, 3, 4。

可以看出, $Nu_2$ 比 $Nu_1$ 大 2% ~ 30%, 平均提高了 14%; $Nu_3$ 比 $Nu_1$ 大 4% ~ 69%, 平均提高了 35%; 而粗糙粒子在 $\beta = 2\%$ 时, $Nu_4$ 比 $Nu_1$ 平均提高了 83%, 在 $Re$ 数较大处, $Nu_4$ 比 $Nu_1$ 提高 150%

* 初稿时间: 2001 年 12 月 18 日, 修改稿: 2002 年 10 月 20 日。
资助课题: 国家自然基金“冰雹生长物理过程参数化研究”(49775255)。

以上。

表 1　$1\times 10^3 \leqslant Re \leqslant 5.2\times 10^4$ 范围内, 4 个 $Nu$ 值的比较

| $Re$ | $Nu_1$ | $Nu_2$ | $Nu_3$ | $Nu_4$ |
|---|---|---|---|---|
| $1.0\times 10^3$ | 18.887 | 16.924 | 19.651 | 18.919 |
| $1.5\times 10^3$ | 22.682 | 21.325 | 25.052 | 25.539 |
| $2.8\times 10^3$ | 30.257 | 30.436 | 36.410 | 40.532 |
| $3.4\times 10^3$ | 33.137 | 33.998 | 40.901 | 46.795 |
| $4.4\times 10^3$ | 37.421 | 39.381 | 47.731 | 56.632 |
| $5.2\times 10^3$ | 40.507 | 43.415 | 52.755 | 64.084 |
| $6.5\times 10^3$ | 45.052 | 49.189 | 60.299 | 75.589 |
| $7.6\times 10^3$ | 48.553 | 53.775 | 66.219 | 84.861 |
| $9.4\times 10^3$ | 53.773 | 60.701 | 75.211 | 99.316 |
| $1.0\times 10^4$ | 55.400 | 62.880 | 78.051 | 103.970 |
| $2.2\times 10^4$ | 81.205 | 98.559 | 125.166 | 186.336 |
| $3.0\times 10^4$ | 94.491 | 117.618 | 150.720 | 234.409 |
| $3.7\times 10^4$ | 104.717 | 132.551 | 170.895 | 273.762 |
| $5.2\times 10^4$ | 123.771 | 160.929 | 209.538 | 352.166 |

文中将以上 4 个表达式进行参数化后, 分别代入胡志晋、何观芳[6, 7] 的一维积云时变模式和三维模式做比较计算。

## 2　参数化方案

在胡志晋、何观芳[6] 的一维积云时变模式中, 推导了 26 种主要的微物理过程中水汽、云滴比水量和冰晶、雨、霰、雹的群体比水量和比浓度的转化率。这些过程都用 3 个英文字母表示, 第一个指过程名称, 第二个是被消耗的相, 第三个是生成相或作用相, 它们同时用来表达过程中的比质量变化速率。在此, 我们只关注受 $Nu$ 影响的冰雹的凝华、升华( $S_{vh}$)、雹的融化( $M_{hr}$) 及雹的干、湿增长临界值( $C_{hw}$) 。

原模式在对冰雹的干湿增长、融化、蒸发过程的公式推导中, 对其中的积分部分用经验公式做了近似替代, 举例说明, 如在冰雹的凝华、升华方程中:

$$\begin{aligned} S_{vh} &= \pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) \times Nu \times \int_{D_8}^{\infty} N_0 D^{1.9} \exp(-\lambda_h D)\,\mathrm{d}D \\ &= 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.29 \sqrt{\rho A_{vh}/\mu} \int_{D_*}^{\infty} N_D D^{1.9} \exp(-\lambda_h D)\,\mathrm{d}D \\ &\approx 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.29 \sqrt{\rho A_{vh}/\mu} \cdot N_h \lambda_h^{-1.9} [(\lambda_h D_*)^{1.9} + \Gamma(2.9)(0.9\lambda_h D_* + 1)] \end{aligned}$$

这样造成的计算误差有 10% 左右, 文中用分部积分和数值积分的结果重新推导了精确的参数化方程, 计算误差为 2% 左右。

### 2.1　冰雹的凝华、升华( $S_{vh}$)

湿增长时( $kk = 1$) ,

$$\begin{aligned} S_{vh1} = {} & 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.26 \sqrt{\rho A_{vh}/\mu} Nu \lambda_h^{-1.9} \\ & [(\lambda_h D_*)^{1.9} + 1.827\exp(-2.375) \times (\lambda_h D_{*1})^{0.611} + 1.827)] \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} S_{vh2} = {} & 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.17 (\rho A_{vh}/\mu)^{0.57} \\ & Nu \lambda_h^{-2.03} [(\lambda_h D_*)^{2.03} + 2.03(\lambda_h D_*)^{1.03} + \\ & 2.06\exp(-3.363)(\lambda_h D_*)^{0.595} + 2.06)] \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} S_{vh3} = {} & 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.156 (\rho A_{vh}/\mu)^{0.599} \\ & Nu \lambda_h^{-2.08} [(\lambda_h D_*)^{2.08} + 2.08(\lambda_h D_*)^{1.08} + \\ & 2.16\exp(-2.375)(\lambda_h D_*)^{0.611} + 2.16)] \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} S_{vh4} = {} & 2\pi k_d \rho (Q_v - Q_{so}) 0.057 (\rho A_{vh}/\mu)^{0.74} \\ & Nu \lambda_h^{-2.33} [(\lambda_h D_*)^{2.33} + 2.33(\lambda_h D_*)^{1.33} \\ & + 1.049(\lambda_h D_*)^{0.744} + 2.77)] \end{aligned} \tag{8}$$

干增长时( $kk = 0$) ,

$$S_{vh1} = \left\{ \text{式(5) 右端} - \frac{L_f k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)(C_{ch} + C_{rh}) \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{L_s k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right) \right]^{-1} \tag{9}$$

$$S_{vh2} = \left\{ \text{式(6) 右端} - \frac{L_f k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)(C_{ch} + C_{rh}) \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{L_s k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right) \right]^{-1} \tag{10}$$

$$S_{vh3} = \left\{ \text{式(7) 右端} - \frac{L_f k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)(C_{ch} + C_{rh}) \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{L_s k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right) \right]^{-1} \tag{11}$$

$$S_{vh4} = \left\{ \text{式(8) 右端} - \frac{L_f k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)(C_{ch} + C_{rh}) \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{L_s k_d \rho Q_{si}}{k_t T}\left(\frac{L_s}{RT} - 1\right) \right]^{-1} \tag{12}$$

### 2.2　雹的融化( $M_{hr}$)

$$\begin{aligned} M_{hr1} = {} & \int N_{0h} \exp(-\lambda_h D) \frac{2\pi D}{L_f} [k_t (T - T_0) + L_v k_d \rho (Q_v - Q_{s0})] 0.26 \sqrt{A_{vh}\rho/\mu} \cdot D^{0.9}\,\mathrm{d}D + \frac{C_w}{L_f}(C_{ch} + C_{rh})(T - T_0) \\ = {} & \frac{0.52\pi}{L_f} \sqrt{A_{vh}\rho/\mu} [k_t (T - T_0) + L_v k_d \rho (Q_v - Q_{so})] N_h \lambda_h^{-1.9} \times [(\lambda_h D_*)^{1.9} + 1.827 \cdot \exp(-2.375) \cdot (\lambda_h D_*)^{0.611} + 1.827)] + \\ & \frac{C_w}{L_f} + (C_{ch} + C_{rh})(T - T_0) \end{aligned} \tag{13}$$

$$M_{hr2}=\frac{0.33\pi}{L_f}(A_{vh}\rho/\mu)^{0.57}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.03}\times[(\lambda_hD_*)^{2.03}+2.03(\lambda_hD_*)^{1.03}+2.06(\lambda_hD_*)^{0.595}+2.06]+\frac{C_w}{L_f}(C_{ch}+C_{rh})(T-T_0) \quad (14)$$

$$M_{hr3}=\frac{0.313\pi}{L_f}(A_{vh}\rho/\mu)^{0.599}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.08}\times[(\lambda_hD_*)^{2.08}+2.08(\lambda_hD_*)^{1.08}+2.16\exp(-2.375)\cdot(\lambda_hD_*)^{0.611}+2.16]+\frac{C_w}{L_f}(C_{ch}+C_{rh})(T-T_0) \quad (15)$$

$$M_{hr4}=\frac{0.114\pi}{L_f}(A_{vh}\rho/\mu)^{0.74}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.33}\times[(\lambda_hD_*)^{2.38}+2.33(\lambda_hD_*)^{1.33}+2.77\exp(-0.979)\cdot(\lambda_hD_*)^{0.74}+2.77]+\frac{C_w}{L_f}(C_{ch}+C_{rh})(T-T_0) \quad (16)$$

### 2.3 雹的干、湿增长临界值($C_{hw}$)

$$C_{hw1}=\left\{\int N_{oh}\exp(-\lambda_hD)2\pi D^{1.9}0.26\sqrt{\frac{A_{vh}\rho}{\mu}}\cdot[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]\mathrm{d}D-C_{ih}C_i(T-T_0)\right\}[L_f+C_w(T-T_0)]$$
$$\approx\left\{0.53\pi\sqrt{\frac{A_{vh}\rho}{\mu}}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho\cdot(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-1.9}[(\lambda_hD_*)^{1.9}+1.827\exp(-2.375)(\lambda_hD_*)^{1.611}+1.827)]+C_{ih}C_i(T-T_0)\right\}/[L_f+C_w(T-T_0)] \quad (17)$$

$$C_{hw2}=\left\{0.33\pi\left(\frac{A_{vh}\rho}{\mu}\right)^{0.57}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.03}[(\lambda_hD_*)^{2.03}+2.03(\lambda_hD_*)^{1.03}+2.06(\lambda_hD_*)^{0.595}+2.06]+C_{ih}C_i(T-T_0)\right\}/[L_f+C_w(T-T_0)] \quad (18)$$

$$C_{hw3}=\{0.313\pi\left(\frac{A_{vh}\rho}{\mu}\right)^{0.599}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.08}[(\lambda_hD_*)^{2.08}+2.08(\lambda_hD_*)^{1.08}+2.16\exp(-2.375)\cdot(\lambda_hD_*)^{0.611}+2.16]+C_{ih}C_i(T-T_0)\}\cdot[L_f+C_w(T-T_0)]^{-1} \quad (19)$$

$$C_{hw4}=\{0.114\pi\left(\frac{A_{vh}\rho}{\mu}\right)^{0.74}[k_t(T-T_0)+L_vk_d\rho(Q_v-Q_{so})]N_h\lambda_h^{-2.33}[(\lambda_hD_*)^{2.33}+2.33(\lambda_hD_*)^{1.33}+2.77\exp(-0.979)\cdot(\lambda_hD_*)^{0.744}+2.77]+C_{ih}C_i(T-T_0)\}\cdot[L_f+C_w(T-T_0)]^{-1} \quad (20)$$

## 3 计算结果

### 3.1 一维模式计算结果

我们以山东德州 1989 年 7 月 1 日的探空资料做为个例进行了计算, 计算结果表明:

#### 3.1.1 雹的干、湿增长临界值($C_{hw}$)

4 个表达式计算的 $C_{hw1}$, $C_{hw2}$, $C_{hw3}$, $C_{hw4}$变化趋势是一致的, 但在量值上 $C_{hw2}$, $C_{hw3}$, $C_{hw4}$均比 $C_{hw1}$大, 平均来说, $C_{hw2}$比 $C_{hw1}$大 10%左右, $C_{hw3}$比 $C_{hw1}$大 30% 左右, $C_{hw4}$比 $C_{hw1}$大 40% 左右(如图 1)。以 $Nu_1$ 代入模式, 从第 21 分钟 6.2 km 高度处(该高度 $T=-12.411$ ℃) 冰雹出现湿增长, 之后, 湿增长层逐渐变厚, 到第 54 分钟, 从云底向上到 6.2 km高度均为湿增长, 此时, 干湿增长临界值为 $2.89\times10^{-3}$ g/(kg•s), 临界温度为 -12.029 ℃; 以 $Nu_2$ 代入模式, 冰雹进入湿增长的时间也在第 21 分钟, 高度略低, 在 6 km 高度处, 温度为 -11.050 ℃, 第 54 分钟从云底到 6 km 高度均为湿增长层, 干湿增长临界值为$2.76\times10^{-3}$ g/(kg•s), 临界温度为 -12.023 ℃; 以 $Nu_3$ 代入模式, 冰雹出现湿增长是在第 24 分钟的 5.8 km 高度处, 此时温度为 -9.934 ℃, 以后湿增长层逐渐变厚, 到第 51 分钟, 从云底到 5.8 km 高度均为湿增长层, 干湿增长临界值为$2.35\times10^{-3}$ g/(kg•s); 以 $Nu_4$ 代入模式, 冰雹在第 24 分钟5.8 km高度出现湿增长, 此时温度为 -9.934 ℃, 到第 51 分钟, 从云底到 5.8 km 高度均为湿增长, 干湿增长临界值为 $2.61\times10^{-3}$ g/(kg•s), 临界温度为 -9.385 ℃。

4 个表达式代入模式均是在 24 分钟开始有湿增长, 但湿增长的厚度不同, 采用 $Nu_2$ 时与采用 $Nu_1$ 大致相同, 只在 21 和 24 分钟时, 采用 $Nu_2$ 计算得到的湿增长层比采用 $Nu_1$ 计算的多一层, 即增加了 200 m; 采用 $Nu_3$ 时, 湿增长层从 27 分钟开始比采用 $Nu_1$ 少 1~2 层, 即湿增长变薄, 78 分钟后两者相同; 采用 $Nu_4$ 时, 湿增长层从 27 分钟起, 比用 $Nu_1$ 计算少 2~3 层, 81 分钟后两者计算结果相同。

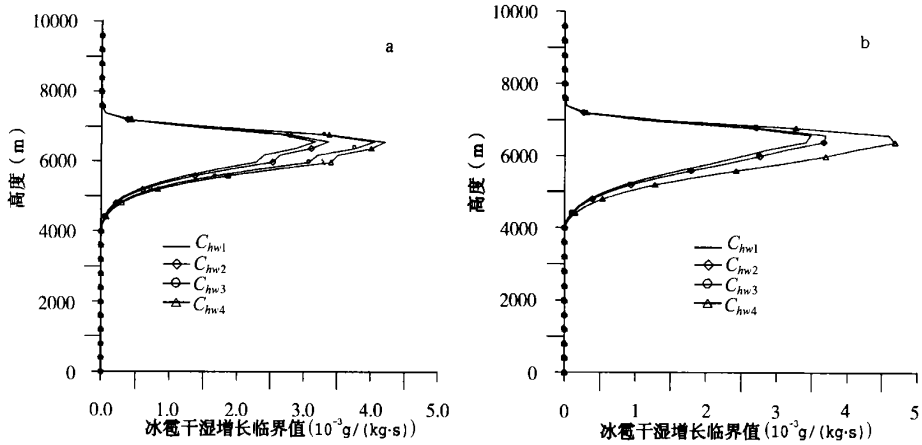


图 1　冰雹干湿增长临界值随高度分布

(a. 51 分钟, b. 54 分钟)

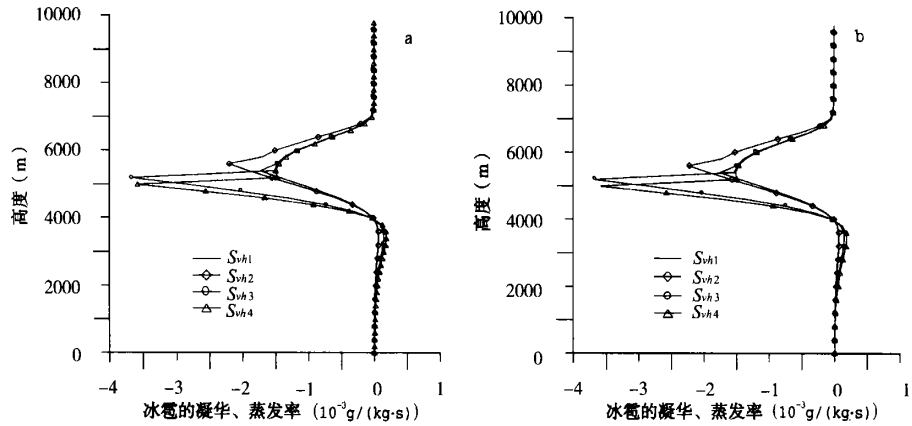


图 2　冰雹的凝华、蒸发率

(a. 60 分钟, b. 63 分钟)

3.1.2　冰雹的凝华、升华($S_{vh}$)

4 个表达式计算的 $S_{vh1}$, $S_{vh2}$, $S_{vh3}$, $S_{vh4}$同在 33 分钟 6400 m 高度达到 $10^{-6}$量级, 以后逐渐增大, 在 63 分钟时 $S_{vh1}$在 5400 m 处达到最大值 $1.93\times10^{-4}$ g/(kg·s), $S_{vh2}$在 5600 m 处达到最大值 $2.20\times10^{-4}$ g/(kg·s) (如图 2a), $S_{vh2}$在 60 分钟 5600 m 高度达到最大值 $3.67\times10^{-4}$g/(kg·s), $S_{vh4}$在 60 分钟 5400 m 高度达到最大值 $3.83\times10^{-4}$g/(kg·s) (如图 2b)。63 分钟以后量值逐渐减小。$S_{vh1}$, $S_{vh2}$, $S_{vh3}$, $S_{vh4}$相比较, $S_{vh2}$比 $S_{vh1}$大 10% 左右, 而 $S_{vh3}$平均比 $S_{vh1}$大 130%, $S_{vh4}$则比 $S_{vh1}$大 200% 左右。可见冰雹粒子的形状因素及表面粗糙度对凝华、升华的影响是很大的。

3.1.3　雹的融化($M_{hr}$)

在 45 分钟前, 4 个表达式计算的 $M_{hr1}$, $M_{hr2}$, $M_{hr3}$和 $M_{hr4}$的量值均小于 $1\times10^{-6}$ g/(kg·s), 之后融化量逐渐增大, 在 81 分钟时 1800 m 高度处分别达到最大值: $M_{hr1}$为 $6.3\times10^{-3}$ g/(kg·s), $M_{hr2}$为 $7.2\times10^{-3}$ g/(kg·s), $M_{hr3}$为 $8.6\times10^{-3}$g/(kg·s), $M_{hr4}$为$1.06\times10^{-2}$g/(kg·s) (如图 3b)。然后一直到 93 分钟过程结束, 逐渐减小(如图 3a, b, c)。在量值上, $M_{hr2}$比 $M_{hr1}$平均提高了 12% ~ 15%, $M_{hr3}$比 $M_{hr1}$提高了 30% 左右, 而 $M_{hr4}$则比 $M_{hr1}$提高了 50% 左右。

3.1.4　采用 $Nu_2$, $Nu_3$ 和 $Nu_4$ 代入模式计算

得到的冰雹尺度 $X_h$, 冰雹含量 $Q_h$ 均比采用 $Nu_1$ 计算结果大。$Q_{h1}$是在 66 分钟, 高度为 5600 m 处达到最大值2.8433 g/kg; $Q_{h2}$是 69 分钟 5200 m

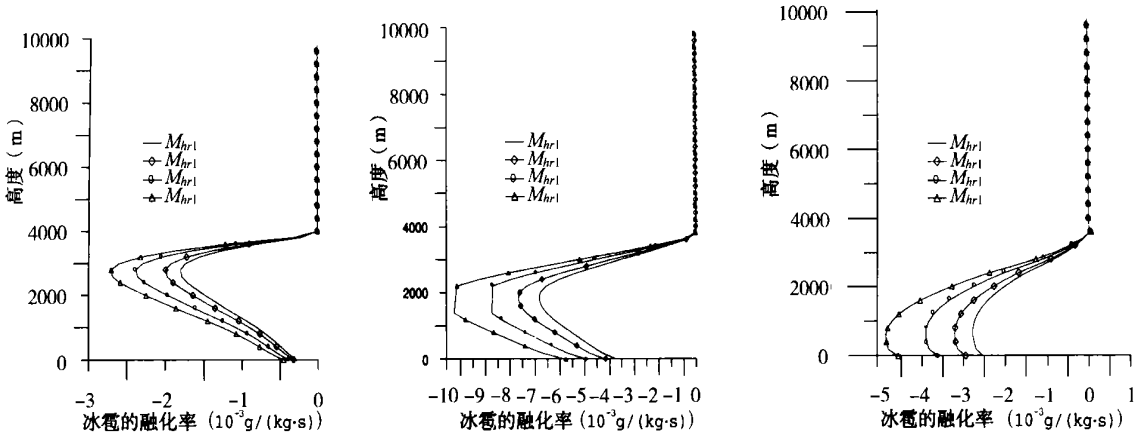


图 3 冰雹的融化率

(a. 75 分钟, b. 81 分钟, c. 87 分钟)

高度处达到最大值 3.3773 g/kg; $Q_{h3}$是在 69 分钟 5200 m 处达到最大值 3.5741 g/kg; $Q_{h4}$是 69 分钟在 5000 m 高度达到最大值 3.1423 g/kg。

3.1.5 以 $Nu_1$ 代入模式的计算结果

表明降雨量为 17.358 mm, 降雹 2.518 mm；以 $Nu_2$ 代入模式得到的结果是降雨量为 18.002 mm，降雹 2.410 mm；以 $Nu_3$ 代入模式结果为降雨量 18.815 mm, 降雹2.124 mm；以 $Nu_4$ 代入模式计算结果为降雨量 19.471 mm，降雹 1.694 mm 。即由于冰雹粒子的形状因素和表面粗糙度等的影响, 其融化增大, 因而降水量增加, 冰雹减少了。

**3.2** 三维模式计算结果

1996 年 6 月 10 日下午北京市海淀、宣武、石景山、密云等地出现降雹。郭恩铭同志测得大冰雹长轴 8 cm, 短轴 4 cm。小冰雹分别为 1.5 cm 和 0.6 cm。实测回波顶高 11 km, 强中心 70 dBz, 位于 6.5 km。三维模式计算结果表明: 采用郑国光的热量传输系数后, 冰雹量比采用原模式计算减少, 冰雹粒子的大小有所增加, 降雨量增大。原模式计算得到降雨量为 $820.5121\times10^6$ kg, 降雹 $486.2410\times10^6$ kg; 采用新的热传输系数计算结果为: 降雨量分别为 $823.1110\times10^6$ kg, $843.7347\times10^6$ kg, $865.8835\times10^6$ kg; 降雹量分别为 $483.6983\times10^6$ kg, $454.1077\times10^6$ kg, $422.4604\times10^6$ kg(如图 4, 图 5)。

由图 6 可见, 霰收集云水($C_{rg}$)一直是霰增长的最主要的机制, 冰晶的分布相对云水要高, 所以霰分布廓线的偏下的中心浓度值较高。霰收集冰晶($C_{ig}$)随着冰晶的逐渐增多而增大, 而雨滴与冰晶的

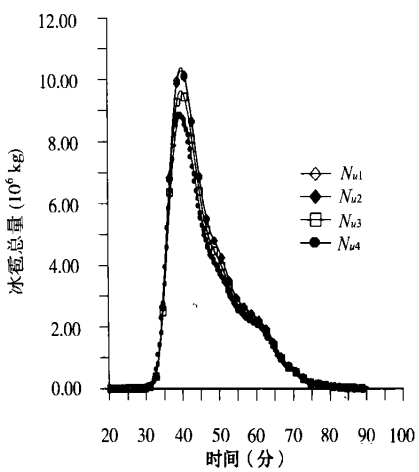


图 4 4 种 $Nu$ 下冰雹总量随时间的变化

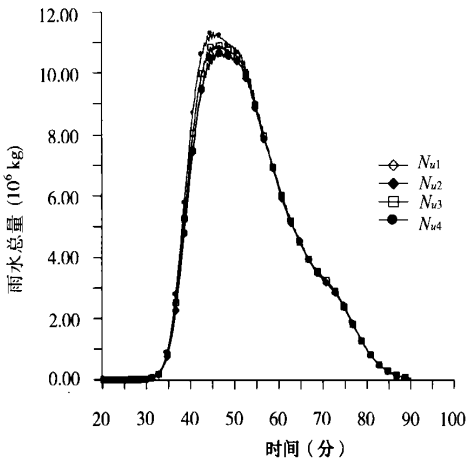


图 5 4 种 $Nu$ 下雨水总量随时间的变化

碰并由于云中上升速度的减小、过冷雨滴的消失而逐渐失去效果。霰的凝华增长( $S_{vg}$) 随霰量的变化而增减, 贡献一直不大, 在云的发展后期成为霰增长的主要机制。而冰霰自动转化( $A_{ig}$) ( 图 6) 是生成霰的主要过程, 但在霰后来的增长过程中所起的作用不大, 云霰自动转化( $A_{cg}$) 的贡献更小, 未在图中标出, 而雨滴碰并冰晶( $C_{ri}$) 提供了一定的霰。冰雹融化导致冰雹尺度减小从而转化成的霰量也不大, 但与冰霰转化相比要多很多。

图 7 为 4 种冰雹形成机制的演变情况, 其中霰雹自动转化( $A_{gh}$) 和雹收集云滴( $C_{ch}$) 占了很大比重, 而冰雹收集雨滴( $C_{rh}$) 冰雹收集冰晶( $C_{ih}$) 和凝华生长( $S_{vh}$) 的贡献要小 1~ 2 个数量级

由图 8 可见, 雨滴收集云水( $C_{cr}$) 和云雨自动转化( $A_{cr}$) 是雨水增长初期的最主要的机制, 由云雨自动转化生成最初的雨滴, 随即雨滴碰并云水而迅速长大。在 22 分钟霰下落到暖区开始融化, 随后霰的融化( $M_{gr}$) 即成为雨水形成的最主要机制, 也是后期连续性降水的最主要来源。过冷雨滴与冰晶碰并成霰( $C_{ri}$) 在云发展初期是雨水消耗的最主要机制, 此外霰对过冷雨滴的收集( $C_{rg}$) 也要消耗一定的雨水, 雨滴的蒸发( $S_{vr}$) 在整个云发展过程中都是雨水消耗的主要机制并在后期消耗了大量的雨水, 总量上看几乎是相当于霰融化量的一半, 说明霰下落到暖区所融化形成的雨滴将大量蒸发而不能及地形成降水。

$M_{hr1}$ 最大值为: $2.217\times10^{-3}$ g/ ( kg• s) ; $M_{hr2}$ 最大值为: $2.222\times10^{-3}$ g/ ( kg• s) ; $M_{hr3}$ 最大值为: $2.659\times10^{-3}$ g/ ( kg• s) ; $M_{hr4}$ 最大值为: $3.038\times10^{-3}$ g/ ( kg• s) ( 图 9) 。

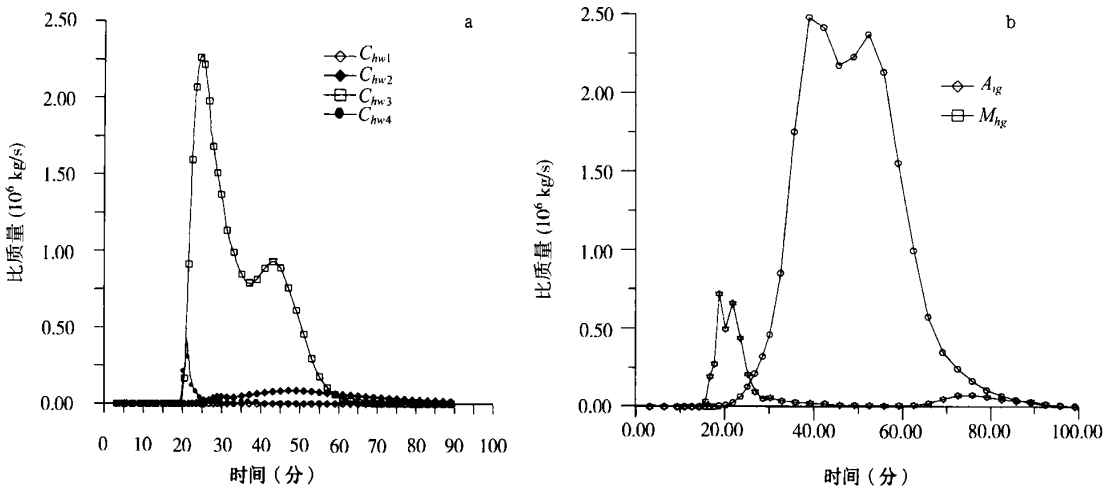


图 6　生成霰的 4 种机制及冰霰自动转化和冰雹融化后减小为霰的过程随时间的变化

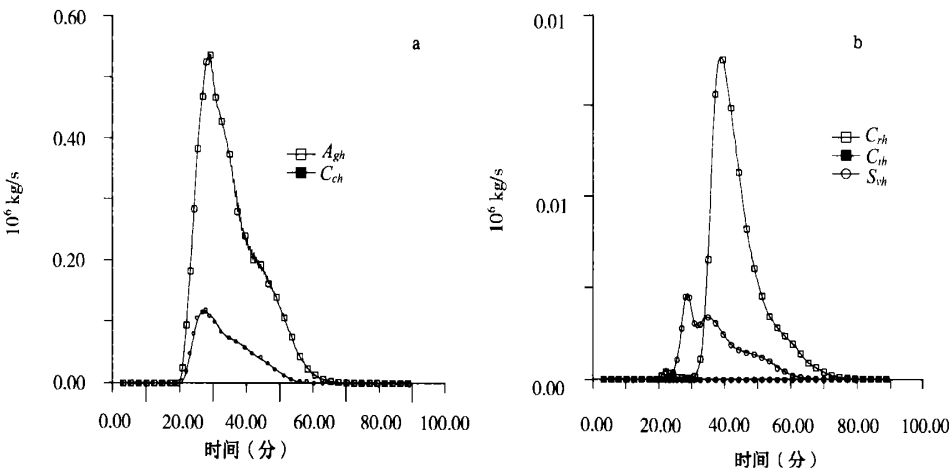


图 7　生成雹的 5 种主要机制随时间的变化

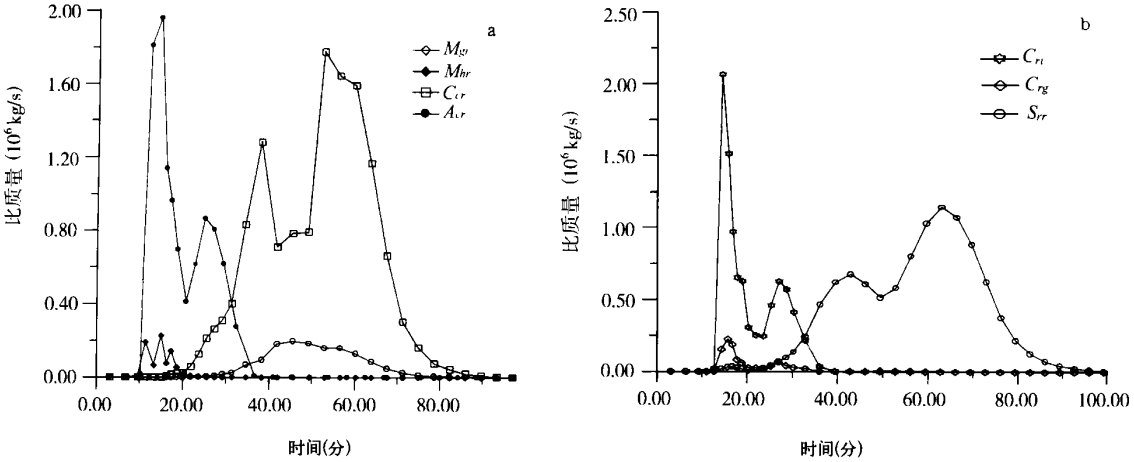


图 8 雨水形成的 4 种主要机制(a) 和雨水消耗(b) 随时间的变化

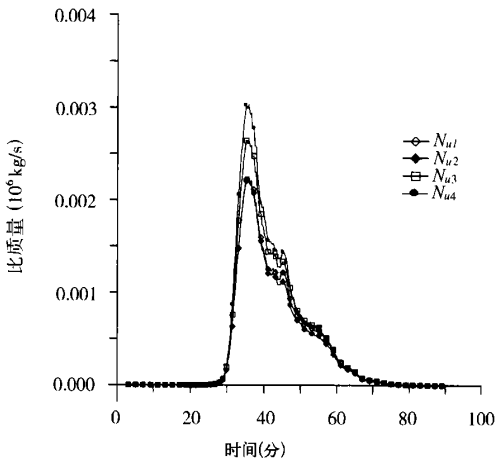


图 9 4 种 $Nu$ 下冰雹的融化随时间的变化

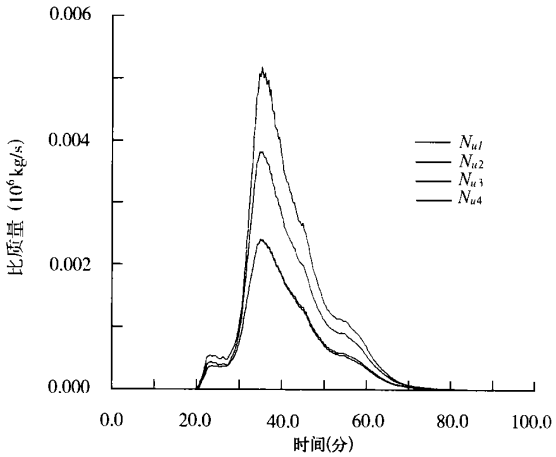


图 10 4 种 $Nu$ 下冰雹的蒸发随时间的变化

$S_{vh1}$最大值为: 2.413 × $10^3$ kg/s; $S_{vh1}$最大值为: 2.403 × $10^3$ kg/s; $S_{vh2}$最大值为: 3.925 × $10^3$ kg/s; $S_{vh3}$最大值为: 5.165 × $10^3$ kg/s(图 10)。

## 4 结 论

(1) 冰雹的热量传输系数是影响冰雹生长率及其结构特征的重要参数, 过去一直采用的在小雷诺数下对水滴蒸发所测定的热传输系数与实际冰雹存在较大的误差。

(2) 采用郑国光等测定的热传输系数, 代入模式计算表明, 降雨量增加, 降雹量减少, 并且随着冰雹的形状因子及表面粗糙度的不同而不同, 椭球形的、粗糙的冰雹粒子比圆球形的、光滑的冰雹粒子热传输量大, 因而前者的融化、蒸发、干湿增长临界值均比后者大。平均来说冰雹的融化率比原模式大 12%~ 50%; 冰雹的蒸发率比原模式增大 10%~ 200%; 冰雹的干湿增长率临界值增大 10%~ 40%。

## 参 考 文 献

1 Schumann T E W, The theory of hailstone formation. Quart J Roy Meteor Soc, 1938, 64, 3~ 21

2 Ludlam F H, The hail problem. Nubila, 1958, 1: 12~ 96

3 List R. General heat and mass exchange of spherical hailstones. J Atmos Sci, 1963, 20, 189~ 197

4 List R. Analysis of sensitivities and error propagation in heat and mass transfer of spheroidal hailstones using sphReadsheet. J Appl Meteor, 1989, 28: 1118~ 1127
5 Zheng G G. An experimental investigation of convective heat transfer of rotating and gyrating hailstone models: [Ph. D. thesis], Department of Physics. University of Toronto, 1994, 121pp
6 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟Ⅰ. 气象学报, 1987, 45(4): 467~ 484
7 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟Ⅱ. 气象学报, 1988, 46(1): 28~ 40

# PARAMETERIZATION OF PHYSICAL PROCESSES FOR HAILSTONE GROWTH

Fang Wen　Zheng Guoguang　Hu Zhijin
*(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081*)*

The theoretical and experimental researches on the process of hail growth have expressed that the mass and heat transfer of hail's surface decided the rate of hail's growth and structure, the hail's dynamic character decided its movement, time of stopping in cloud and the disaster degree after the hail landed on ground, in a word, decided the hail's growth. The hail's mass and heat transfer affects growth, melting and evaporation of hail. But many researchers used the transfer coefficient which Ranz and Marshall measured on water drop evaporation under small Renold number ($Re \leqslant 200$) and expanded it to $10^4 \times Re \leqslant 10^7$ (the actual hail's mass and heat transfer coefficient), it exists bigger difference. Zheng (1994) measured accurately the surface temperature of cooling ice particle using AGMA system under the range of $1.1 \times 10^4 \leqslant Re \leqslant 5.2 \times 10^4$ and developed the numerical model to compute the Nusset number. On the basis of the experiment mentioned above, the paper parameterized the experiment result in the range of Renold numbers corresponding to natural hail's Re number, then put it in 1D and 3D cumulus model to compute the hail's growth situation of 4 different areas of China under various parameterization schemes. we found that the hail' growth, melting and evaporation difference from that of Provo scheme. The hail' melting rate is 12% —50% bigger than the previous model and the hail's evaporation rate is 10% —200% bigger than the previous model, the dry and wet growth rate is 10% —40% bigger than the previous model.

**Key words:** Hail, Parameterization, Numerical model, Heat transfer.