

电离层钡云释放早期动力学行为的数值模拟*

胡耀垓[†] 赵正予 张援农

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

(2011年7月16日收到; 2011年9月1日收到修改稿)

在中性钡云扩散动力学模型的基础上, 考虑钡原子的氧化和电离损耗, 探讨了钡云释放早期 ($t \leq 100$ s) 的演化基本特征、钡云形态、亮度以及电子密度分布等问题. 得到了不同释放量 (1, 10 kg)、不同释放高度 (250, 300 km) 和不同初始形状因子 (1, 10) 条件下钡云释放早期动力学行为的数值模拟结果.

关键词: 化学物质释放, 钡释放, 扩散模型, 中性钡云演化

PACS: 94.20.Vv, 94.20.dv

1 引言

空间主动释放是采用探空火箭、卫星及其他航天器向电离层或磁层注入某些能显著改变局部电离层参数的化学物质, 形成具有一定时空结构的人工不均匀等离子体. H_2 , H_2O , CO_2 和 SF_6 等电离层释放物质的作用机理是将电离层中的主要离子成分 O^+ 转变为分子离子后再与电子发生离解复合, 本质是引入中性气体加速电子与 O^+ 的复合, 导致释放区域电离层电子密度有很大程度上降低, 形成所谓电离层洞^[1-3]. 本文讨论的释放物质钡 (该类物质还包括锂、铯、铷、铯等碱金属或碱土金属) 具有较低的电离电位, 在光辐射作用下即可直接离解成正离子和电子, 形成局部高密度不均匀等离子体, 也称为人工等离子体云团^[4].

人工等离子体云团在近地空间的形成与演化非常复杂, 自 20 世纪 60 年代开始就受到空间物理学家的广泛关注, 并基于主动释放试验、实验室实验和数值模拟开展了大量研究^[4-17]. 钡云释放主要历经中性云团扩散、中性云团 (光) 电离和等离子体云团沿磁力线拉伸三个阶段, 其演化进程与释放物种类、注入速度、云团密度、释放区域电离

层和热层环境等因素关系密切.

本文关注于电离层钡云释放早期动力学行为. 在中性钡云扩散动力学模型的基础上, 考虑钡原子的氧化和电离损耗, 探讨了钡云释放早期 ($t \leq 100$ s) 的演化基本特征、钡云形态、亮度以及电子密度分布等问题. 得到了不同释放量 (1, 10 kg)、不同释放高度 (250, 300 km)、不同初始形状因子 (1, 10) 条件下钡云释放早期动力学行为的数值模拟结果. 本文工作可为进一步开展近地空间人工等离子体云团演化行为分析和空间主动释放试验提供参考.

2 钡云演化模型

2.1 中性云团扩散方程

中性云团粒子的一般方程如下^[11]:

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_s n_s) = \nabla \cdot (D \nabla n_s) - \sigma n_s - k_c n_{O_2} n_s, \quad (1)$$

这里, n_s 是钡云的数密度; \mathbf{u}_s 是中性云团速度; $D = k_B T / m \nu_D$ 是扩散系数 (本文取 $D = 1.75 \text{ km}^2/\text{s}$), 其中 T 和 m 分别是钡原子的温度和质量, k_B 是玻尔兹曼常数, ν_D 是扩散碰撞频率; $\nabla \cdot (\mathbf{u}_s n_s)$ 是

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2010AA8093202) 和中央高等学校基本科研基金 (批准号: 3103001) 资助的课题.

[†] E-mail: farawayhu@sohu.com

对流项; $\nabla \cdot (D\nabla n_s)$ 是扩散项; $-\sigma n_s$ 是光电离损耗, 如果忽略高层大气中太阳入射光通量的变化, $\sigma = 0.036 \text{ s}^{-1}$; $k_c n_{\text{O}_2} n_s$ 是氧化损耗 (120 km 以上高度可以忽略钡和 O 原子的反应), 其中 $k_c = 0.9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$ 是反应常数, n_{O_2} 是所在电离层的 O_2 密度, 通常情况下, 在电离层、磁层高度处 $\sigma \gg k_c n_{\text{O}_2}$, 可不考虑氧化损耗.

$$n_s(\mathbf{r}, t) = \frac{N_0}{\pi^{3/2}(4Dt + r_0^2)(4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \times \exp \left(-\frac{(x - x_0 - \int u_x dt)^2 + (y - y_0 - \int u_y dt)^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{(z - z_0 - \int u_z dt)^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2} - (\sigma + k_c n_{\text{O}_2})t \right), \quad (2)$$

其中, (x_0, y_0, z_0) 是云团初始中心; $u_x, u_y,$ 和 u_z 是云团中心运动速度 \mathbf{u}_s 的三个分量; r_0 是云团初始半径; N_0 是初始粒子总数; ε 是云团形状因子, 当 $\varepsilon = 1$ 时云团呈球状分布, 当 $\varepsilon > 1$ 时云团为沿 z 方向拉伸的椭球.

由 (2) 式可知, 随着时间 t 的增大, $4Dt + r_0^2$ 和 $4Dt + \varepsilon^2 r_0^2$ 的区别逐渐减小, 最终都接近于球状分布. 而 \mathbf{u}_s 的存在仅改变钡云中中性成分密度分布的中心位置, 不影响密度分布, 即云团整体减速运动过程和云团自扩散过程相互独立, 可近似表示如下:

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{v}_0 \exp(-\nu_s t). \quad (3)$$

这里, \mathbf{v}_0 为云团初始速度, ν_s^{-1} 为云团减速时间常数, 本文取 $^{[11,12]}\nu_s = 0.04 \text{ s}^{-1}$.

由 (3) 式可得云团中心位置改变量

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_c &= \int_0^t \mathbf{u}_s(t) dt \\ &= \int_0^t \mathbf{v}_0 \exp(-\nu_s t) dt \\ &= \frac{\mathbf{v}_0}{\nu_s} (1 - \exp(-\nu_s t)). \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 光电离电子密度分布

中性钡原子径向扩散的同时会在光照作用下发生电离 (时间常数约为 28 s). 电离前后, 可认为钡离子保持原来中性原子运动状态不变, 而电离产生

的光电子初始速度方向是随机的, 能量约为 0.7 eV. 在钡云扩散过程中, 由于 Ba^+ 密度分布梯度的存在, 因而会形成从云团中心沿磁力线方向的极化电场, 该电场作用于 O^+ 并导致钡云中心处 O^+ 密度下降形成空洞, 从而在沿磁力线方向堆积形成 O^+ 双峰, 此即所谓的“静电扫雪机效应”^[11,12,14]. Bernhardt 等^[18] 提出了“碰撞扫雪机效应”, 解释高分辨非相干散射雷达观测到的电离层洞边缘的 O^+ 堆积现象. 本文仅关注钡云释放早期中性云团演化, 且钡云密度较低 (设钡云释放量为 1 kg, 初始半径为 1 km, 则初始时刻云团中心处最大数密度仅为 $7.88 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, 低于 10^9 cm^{-3} 的 O_2 数密度量级), 不考虑静电效应和碰撞扫雪机效应, 即认为背景 O^+ 分布不受钡云扩散的影响.

由于电中性原则, 宏观上一个钡离子电子对 ($\text{Ba}^+ + e$) 仍具有原来中性原子 Ba 的运动特征, 尽管与当前钡离子 Ba^+ “配对” 的电子并不一定由其电离前原子所提供. 释放空间位置 \mathbf{r} 处 t 时刻没有光电离作用下的数密度 $n_{\text{ph}}(\mathbf{r}, t)$ 与有光电离作用下的数密度 $n_s(\mathbf{r}, t)$ 之差, 即为已光电离 $\text{Ba}^+ + e$ 对数密度

$$\begin{aligned} n_{\text{Ba}^+}(\mathbf{r}, t) &= n_{e^-}(\mathbf{r}, t) \\ &= n_{\text{ph}}(\mathbf{r}, t) - n_s(\mathbf{r}, t), \end{aligned}$$

$$n_{\text{ph}}(\mathbf{r}, t) = \frac{N_0}{\pi^{3/2}(4Dt + r_0^2)(4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{(x - x_0 - \int u_x dt)^2 + (y - y_0 - \int u_y dt)^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{(z - z_0 - \int u_z dt)^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2} - k_c n_{\text{O}_2} t\right). \quad (5)$$

则

$$n_{\text{Ba}^+}(\mathbf{r}, t) = n_{e^-}(\mathbf{r}, t) = \frac{N_0}{\pi^{3/2}(4Dt + r_0^2)(4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{(x - x_0 - \int u_x dt)^2 + (y - y_0 - \int u_y dt)^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{(z - z_0 - \int u_z dt)^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2} - k_c n_{\text{O}_2} t\right) \times (1 - \exp(-\sigma t)). \quad (6)$$

(6) 式即为在仅考虑光电离作用情况下的钡离子/电子密度分布。

经过短时间球状径向扩散演化后, 云团密度剧降, 扩散在云团粒子运动中不再具有主导地位. 释放后期云团粒子(等离子体云团)受释放空间电场、磁场作用, 形成沿磁力线方向的螺旋运动和 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移, 导致等离子体云团宏观上沿磁力线方向拉伸^[4].

钡云在光致电离作用下失去电子, 可使释放区域在极短时间内电子密度剧增. 由于光电子质量远远小于钡离子, 因此, 尽管光电离产生的电子初始速度方向是随机的, 仍可认为电离前后钡离子保持原来中性原子运动状态不变. 如不考虑电离层释放区域电场和磁场的作用, 则光电离前后钡云(包括 Ba, Ba⁺+e 对)维持原来的扩散运动, 满足(1)式. 由此可知, 电子稠团不具有时间累积性, 仅与中性钡云具有相同的维持时间尺度.

与钡云电离形成的电子稠团不具有时间累积性不同, 电离层释放 H₂, H₂O, CO₂ 和 SF₆ 等化学物质, 其本质是在这些中性气体分子参与下促进了电子与 O⁺ 的复合, 从而导致释放区域电离层电子密度有很大程度降低. 该电离层电子密度损耗区在空间上是静止的, 因此在时间上具有累积性, 即“电离层洞”历经形成、变宽、加深, 最后由于释放物质在扩散作用下逐渐消失而无法继续维持 O⁺ 与电子的复合优势, 加之等离子体扩散作用而又逐

步变浅、变窄, 直至消失. 因此, 电离层空洞也具有比中性释放物质更长的维持时间, 相关讨论详见文献 [2].

2.3 中性云团亮度分布

当钡云在日侧高空释放时, 钡原子在 553.5 nm (黄绿波段) 处有一条明亮的共振谱线, 可以利用相机或光度计等光学设备对钡云辐射进行观测^[19].

考虑光学薄情况, 钡云亮度由云团粒子辐射沿视线的积分决定^[20], 即

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} n_s \beta dl, \quad (7)$$

其中, $\beta = 8.4/\text{s}$ 为钡原子的光辐射率, 钡云亮度的单位为 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. 可见亮度与沿视线的钡原子总数成正比, 由于中性云团密度受扩散和中性损耗影响, 因此这两个因素也会导致钡云亮度下降.

由(1)式得到的中性钡云密度分布和(7)式, 可以得到云团亮度分布图.

不失一般性, 可假设云团中心静止, 即 $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) = 0$, 定义中心坐标 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$. 则(2)式可改写为

$$n_s(x, y, z, t) = \frac{N_0}{\pi^{3/2}(4Dt + r_0^2)(4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{z^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2}\right)$$

$$-(\sigma + k_c n_{O_2})t). \quad (8)$$

假设观察点位于 z 轴且距云团无穷远处, 则将 (8) 式代入 (7) 式, 可得到钡云亮度的水平二维 (x - y 面) 分布为

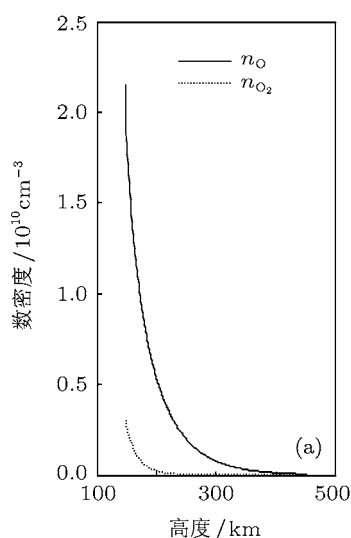
$$\begin{aligned} B(x, y, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} n_s(x, y, z, t) \beta dz \\ &= \frac{N_0 \beta}{\pi^{3/2} (4Dt + r_0^2) (4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \\ &\quad \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4Dt + r_0^2} - (\sigma + k_c n_{O_2})t\right) \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2}\right) dz \\ &= \frac{N_0 \beta}{\pi^2 (4Dt + r_0^2) (4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)} \\ &\quad \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4Dt + r_0^2} - (\sigma + k_c n_{O_2})t\right). \end{aligned} \quad (9)$$

由 (9) 式可得不同时刻钡云中心位置的亮度为

$$B(0, 0, t) = \frac{N_0 \beta}{\pi^2 (4Dt + r_0^2) (4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)} \times \exp(-(\sigma + k_c n_{O_2})t). \quad (10)$$

类似地, 假设观察点位于 y 轴且距云团无穷远处, 则钡云亮度的水平二维 (x - z 面) 分布为

$$\begin{aligned} B(x, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} n_s(x, y, z, t) \beta dy \\ &= \frac{N_0 \beta}{\pi^{3/2} (4Dt + r_0^2) (4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \\ &\quad \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{z^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2}\right) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &-t(\sigma + k_c n_{O_2})t) \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{4Dt + r_0^2}\right) dy \\ &= \frac{N_0 \beta}{\pi^2 (4Dt + r_0^2)^{3/2} (4Dt + \varepsilon^2 r_0^2)^{1/2}} \\ &\quad \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt + r_0^2} - \frac{z^2}{4Dt + \varepsilon^2 r_0^2} - (\sigma + k_c n_{O_2})t\right). \end{aligned} \quad (11)$$

显然, 当形状因子 $\varepsilon = 1$ 时, 钡云在 x - y 平面和 x - z 平面具有相同的亮度分布。

3 数值模拟

首先讨论与钡云演化有关的电离层释放环境和中性钡云演化的基本特征, 然后给出不同释放量 (1, 10 kg)、不同释放高度 (250, 300 km)、不同初始形状因子 (1, 10) 条件下, 释放早期 ($t \leq 100$ s) 的钡云演化数值模拟结果。

背景电离层和热层参数分别由国际参考电离层 IRI-2007^[21] 和 MSIS-E-90^[22] 得到, 钡云释放点所在地理位置均为 (110°E, 20°N), 云团初始半径 $r_0 = 1$ km。

3.1 中性钡云演化基本特征

由 MSIS-E-90 给出的钡云释放所在的电离层区域不同高度 O_2 分子和 O 原子的数密度和中性气体温度分布如图 1 所示。

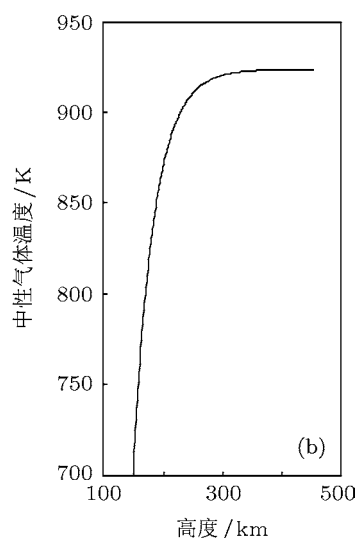


图 1 不同高度 O_2 分子数密度 n_{O_2} 和 O 原子数密度 n_O 及中性气体温度 (a) n_{O_2} 和 n_O ; (b) 中性气体温度

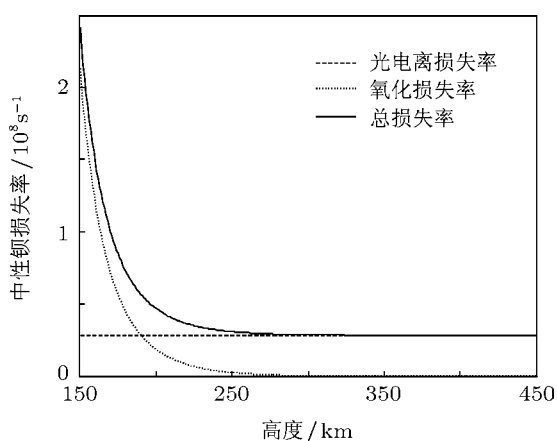


图2 不同高度处的钡原子损失率

钡原子在不同高度处的光电离损失率、氧化损失率和总损失率如图2所示. 可见在190 km高

度以下, 氧化与光电离相比, 氧化更主导了中性钡原子损失. 在190—250 km范围内, 氧化和光电离对损失率的作用处于同样的量级. 当超过250 km高度时, 氧化作用可以忽略, 而光电离成为中性损失过程的唯一考虑因素, 且钡原子的光电离损失率是独立于高度的.

图2中假设 O_2 数密度 n_{O_2} 保持恒定, 实际上钡原子的氧化反应会造成 n_{O_2} 的变化. 在150 km以下, n_{O_2} 高于 $3.01 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 高于中性钡云的数密度(不大于 $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$), 可以忽略 O_2 在反应中的损耗; 在150—220 km范围内, O_2 与钡的数密度处于同等量级. 由于 O_2 分子的扩散系数远大于钡原子, 可以近似认为 n_{O_2} 值保持不变; 在220 km以上, 氧化反应会导致 n_{O_2} 下降, 因此中性钡原子的损失率比图2的曲线稍低.

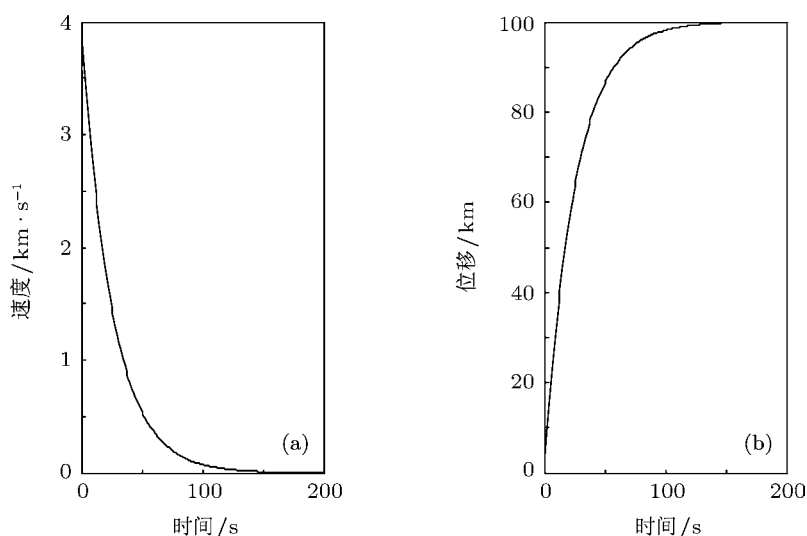


图3 中性钡云中心速度和位移 (a) 速度; (b) 位移

假定 $v_0 = 4 \text{ km/s}$, 由(3)和(4)式可以得到不同时刻钡云中心速度及位移(图3). 从图3可以看出, 约200 s后, 云团中心趋于静止(速度几乎为零), 位移量约为100 km. 由此可知, 云团与大气粒子之间的碰撞作用导致云团减速, 该减速机制使得云团初始速度仅在有限的时间内对其中性成分的中心位置造成有限的改变, 此后如同静止释放. 随着高度的降低, 大气粒子密度增大, 云团粒子与大气粒子的碰撞频率 ν_s 增大, 减速更加显著, 云团中心可移动距离更短. 因此, 不失一般性, 在中性钡云演化行为分析中可以仅考虑无初始速度的情况.

在300 km高度释放1 kg的钡原子, 钡云在不同时刻(1—10 s)数密度分布及变化如图4所示. 图4(a)为不同时刻(1—10 s)钡云中心处钡原子数密度变化, 可见云团中心释放物质在释放之初的10 s内即剧烈下降2—3个数量级, 随着时间的推移, 密度变化率逐渐趋缓. 图4(b)的曲线从上到下分别为 $t = 1, 2, \dots, 10 \text{ s}$ 时刻钡云密度空间分布, 可见随着时间的增加, 除了云团中心处的密度迅速下降外, 还以云团中心对称向周围空间扩散.

不同时刻(1—10 s)钡云中心亮度变化如图5所示. 由图5可见, 钡云中心点亮度在初期剧烈下

降, 该趋势与中心点钡原子数密度的迅速下降一致.

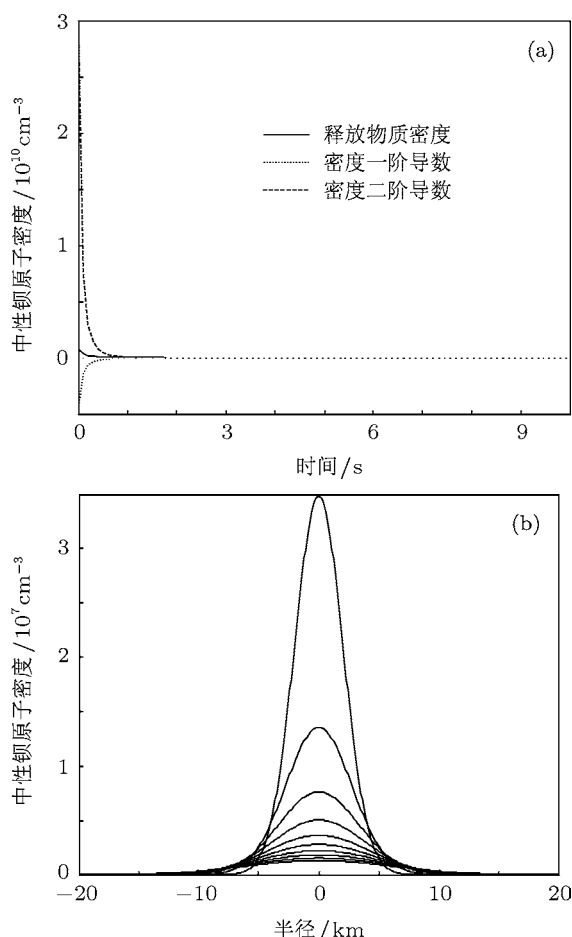


图 4 不同时刻 (1—10 s) 钡云数密度分布及变化 (a) 钡云中中心处钡原子数密度变化; (b) 钡云密度空间分布

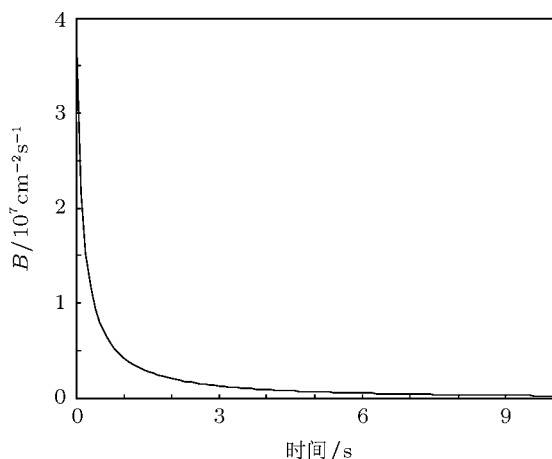


图 5 不同时刻 (0—10 s) 钡云中心亮度 B 的变化

3.2 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子

3.2.1 形状因子 $\epsilon = 1$

图 6 为在 300 km 高度释放 1 kg 的钡原子 (形

状因子 $\epsilon = 1$) 后, $t = 1, 10, 50, 100$ s 时刻云团中性钡原子和电子密度分布, 图 7 为对应各时刻云团中心处电子密度剖面图, δ 为电子密度的最大相对变化量.

由图 6 和图 7 可见, 随着时间的推移, 中性钡云弥散区域逐渐扩大, 数密度减小, 由呈球状分布逐渐变为沿水平方向拉伸的椭球状分布. 相应的光电离产生的电子也与中性钡云粒子类似, 在初期具有较大数密度值, 边界清晰, 此后电子密度迅速减小并向周围空间弥散, 边界逐渐模糊. 电子稠团形态由最初的近似球状逐渐发展成沿水平方向拉伸的椭球状. 中性钡云和电子密度在释放初期下降迅速, 光电离电子同中性云团一起扩散, 在一定的空间不具有时间累积性, 无法长时间维持电子密度稠团状态.

图 8 为不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面亮度分布, 由于 $\epsilon = 1$ 的情形下, 云团呈球对称分布, 因此 $x-y$ 平面和 $x-z$ 平面亮度分布相同.

图 8 所示的不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面亮度分布表明, 钡云亮度以中心点最强, 随半径增大迅速减弱, 边界模糊. 随着时间的推移, 钡云亮度迅速下降, 但可见区域扩大.

3.2.2 形状因子 $\epsilon = 10$

图 9 为在 300 km 高度释放 1 kg 的钡原子 (形状因子 $\epsilon = 10$) 后 $t = 1, 10, 50, 100$ s 时刻云团中性钡原子和电子密度分布, 图 10 为对应各时刻云团中心处电子密度剖面图.

将图 9 和图 10 分别与形状因子 $\epsilon = 1$ 的图 6 和图 7 进行对比可见, 形状因子 $\epsilon = 10$ 的钡云及其电子密度分布, 在初期表现与 $\epsilon = 1$ 明显不同, 呈垂直方向为长轴的椭球状. 但随着时间的推移, 约 50 s 后与 $\epsilon = 1$ 的差异几乎可以忽略, 呈近似球状. 此后, 中性钡云和电子云团的演化规律同 $\epsilon = 1$ 的情形, 即弥散区域逐渐扩大, 边界趋于模糊, 数密度减小, 电子稠团逐渐发展成沿水平方向拉伸的椭球状.

图 11 为不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面和 $x-z$ 平面的亮度分布.

图 11 表明不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面亮度分布为圆形, 但释放初期 $x-z$ 平面亮度分布为椭圆形, 随着时间的推移, 50 s 后近似为圆形, 与 $\epsilon = 1$ (图 8) 的情形类似.

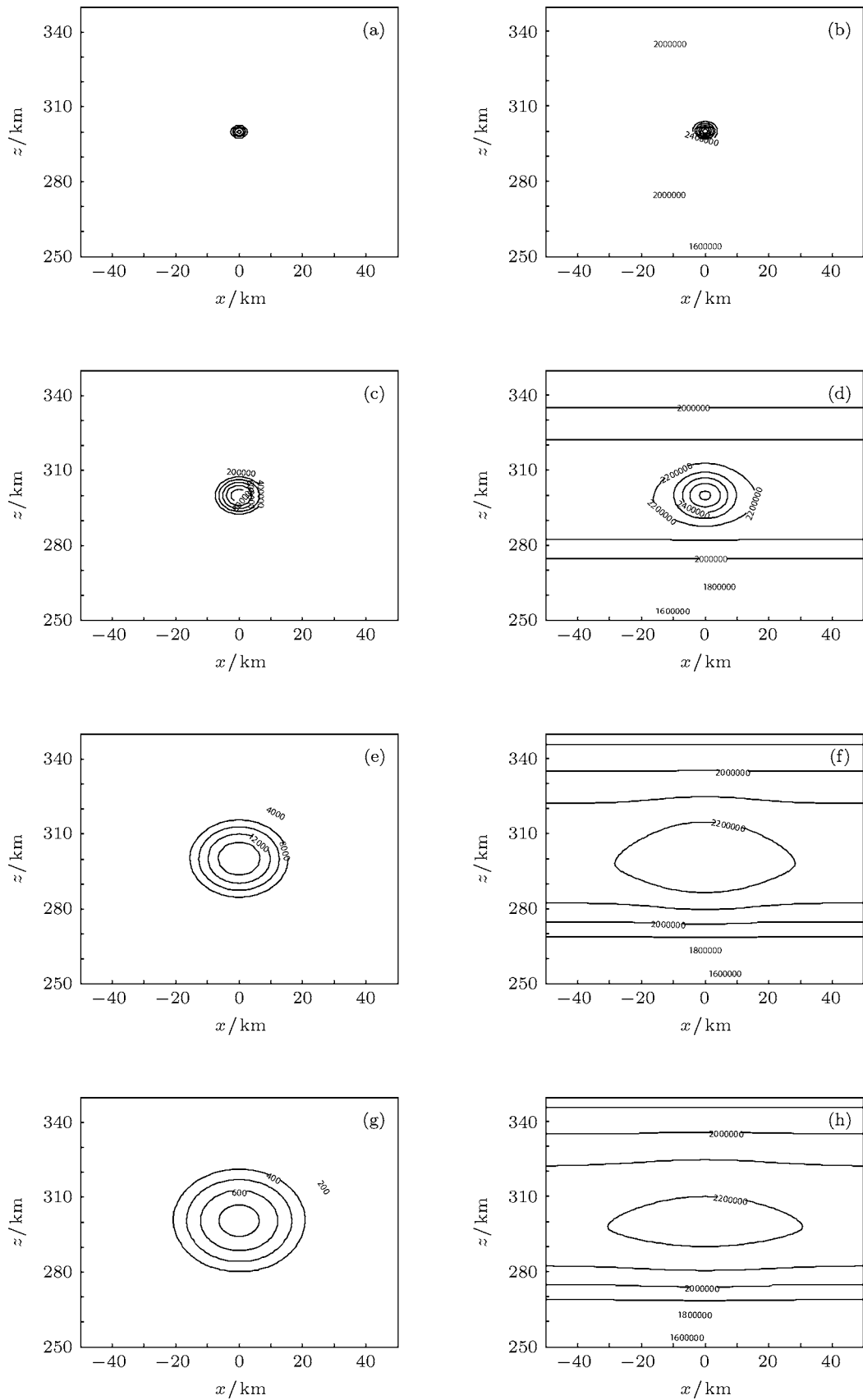


图 6 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云和电子密度分布 (a) $t = 1$ s, 钡原子密度分布; (b) $t = 1$ s, 电子密度分布; (c) $t = 10$ s, 钡原子密度分布; (d) $t = 10$ s, 电子密度分布; (e) $t = 50$ s, 钡原子密度分布; (f) $t = 50$ s, 电子密度分布; (g) $t = 100$ s, 钡原子密度分布; (h) $t = 100$ s, 电子密度分布

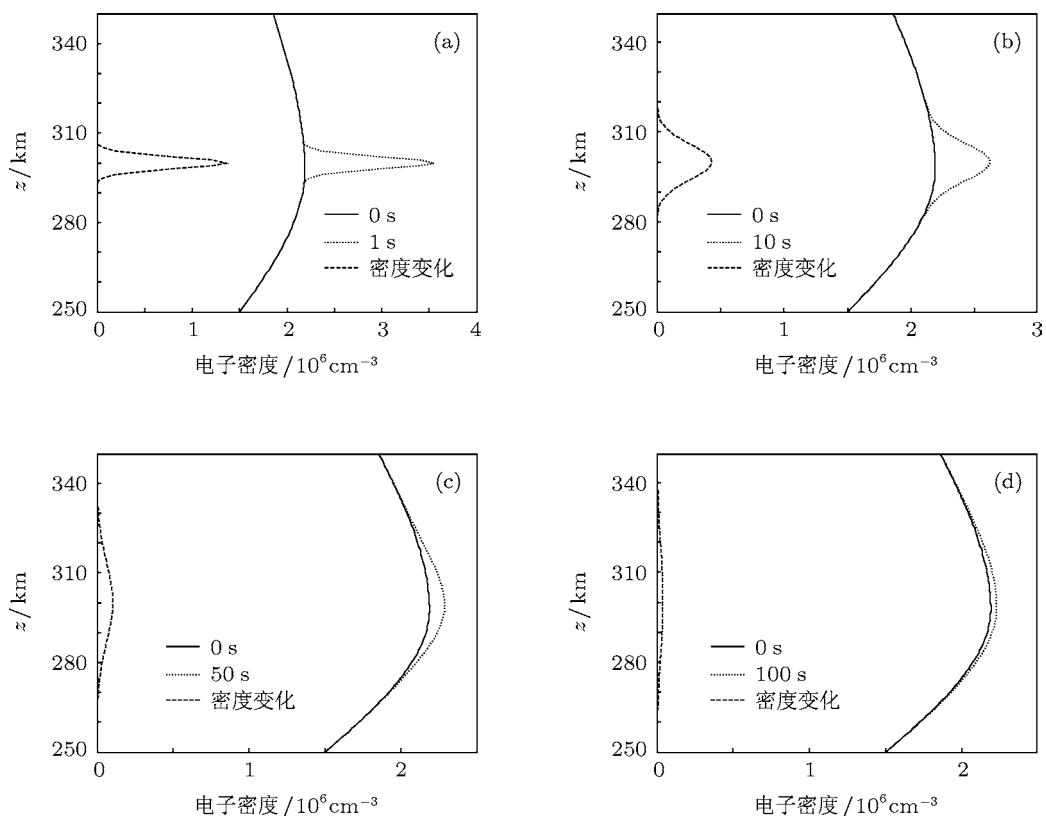


图7 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻云团中心处电子密度剖面图 (a) $t = 1$ s, $\delta = 62.3232\%$; (b) $t = 10$ s, $\delta = 19.7346\%$; (c) $t = 50$ s, $\delta = 4.6201\%$; (d) $t = 100$ s, $\delta = 1.8163\%$

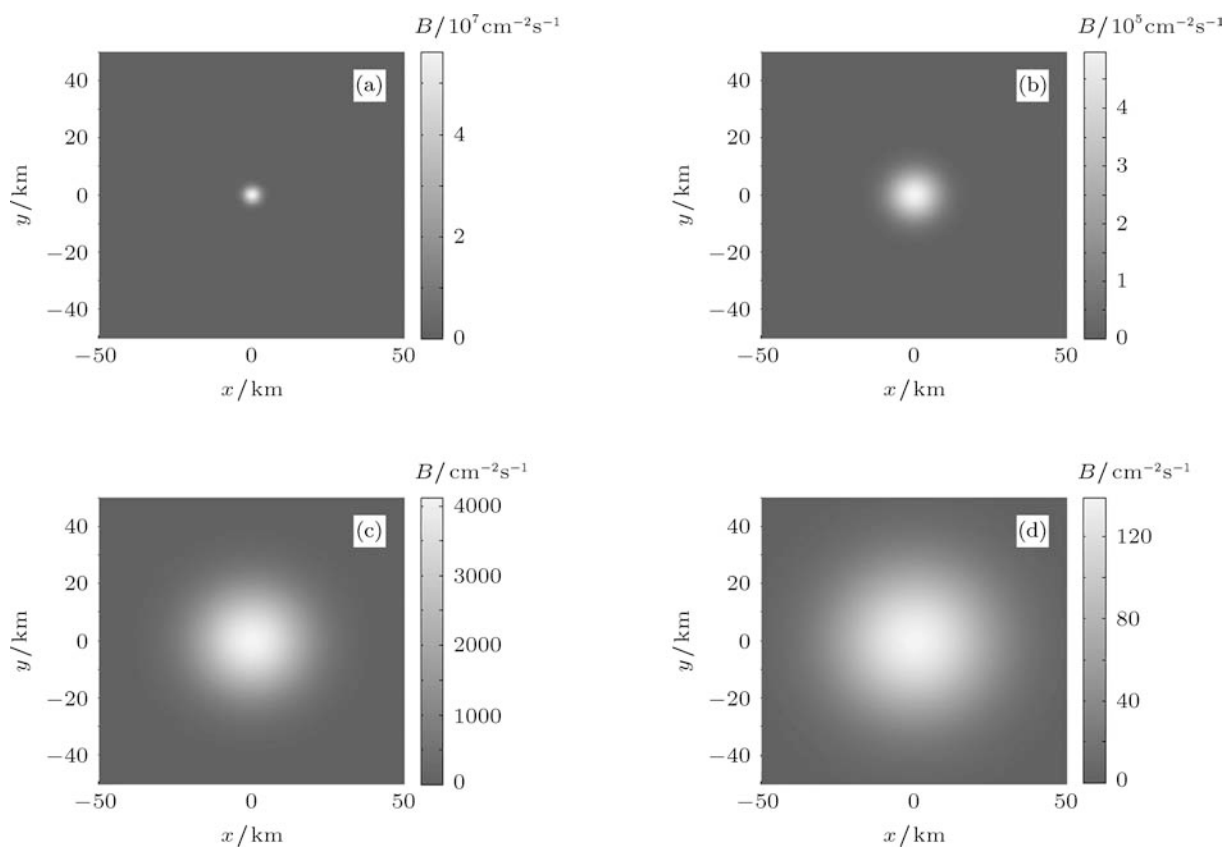


图8 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云 x - y 平面亮度分布 (a) $t = 1$ s; (b) $t = 10$ s; (c) $t = 50$ s; (d) $t = 100$ s

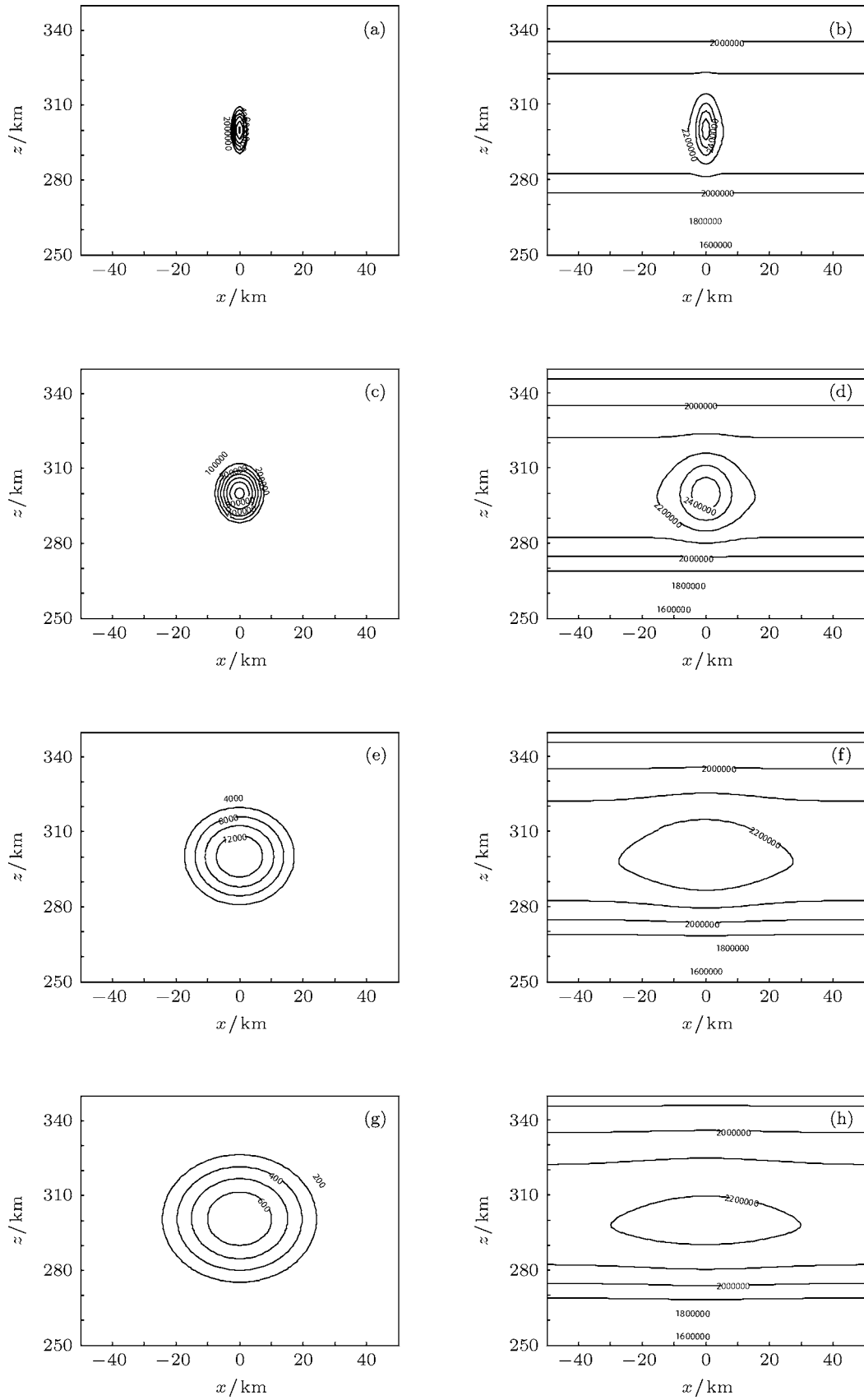


图9 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 10$) 后不同时刻中性钡云和电子密度分布 (a) $t = 1\text{ s}$, 钡原子密度分布; (b) $t = 1\text{ s}$, 电子密度分布; (c) $t = 10\text{ s}$, 钡原子密度分布; (d) $t = 10\text{ s}$, 电子密度分布; (e) $t = 50\text{ s}$, 钡原子密度分布; (f) $t = 50\text{ s}$, 电子密度分布; (g) $t = 100\text{ s}$, 钡原子密度分布; (h) $t = 100\text{ s}$, 电子密度分布

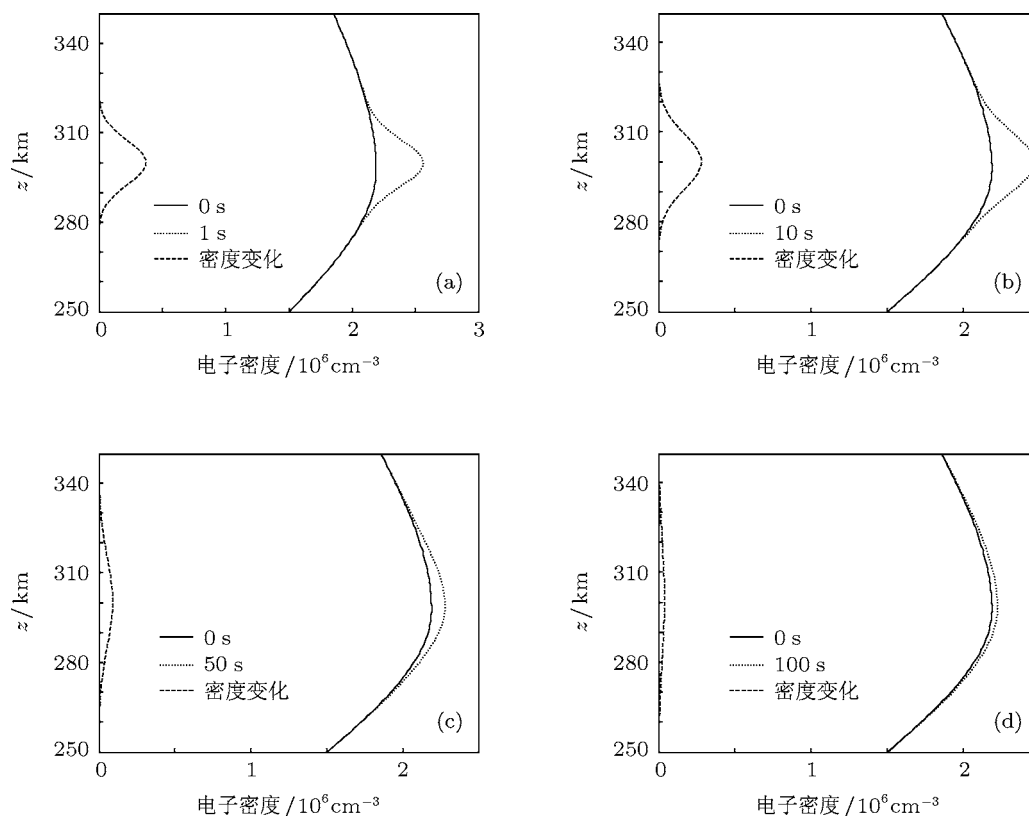


图 10 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 10$) 后不同时刻云团中心处电子密度剖面图 (a) $t = 1$ s, $\delta = 17.0413\%$; (b) $t = 10$ s, $\delta = 12.7536\%$; (c) $t = 50$ s, $\delta = 4.0804\%$; (d) $t = 100$ s, $\delta = 1.7005\%$

由以上对比可见, 不同形状因子, 仅对钡云演化初期形态具有显著影响, 随着时间的推移, 其中性云团形态差异逐渐缩小, 都呈近似水平方向拉伸的椭球状分布. 因此, 以下将仅给出 $\epsilon = 1$ 的模拟结果.

3.3 在 300 km 高度释放 10 kg 钡原子

图 12 为在 300 km 高度释放 10 kg 钡原子 (形状因子 $\epsilon = 1$) 后 $t = 1, 10, 50, 100$ s 时刻云团中性钡原子和电子密度分布, 图 13 和图 14 分别为对应各时刻云团中心处电子密度剖面图和中性钡云 $x-y$ 平面的亮度分布.

图 12 和图 13 表明, 随着时间的推移, 中性钡云在扩散作用下弥散区域逐渐扩大, 数密度减小, 由球状分布逐步变成沿水平方向拉伸的椭球状分布. 相应的光电离产生的电子也与中性钡云粒子类似, 在初期具有较大数密度值, 此后迅速减小且向周围空间弥散, 由最初的近似球状分布逐渐发展成沿垂直方向压缩的椭球状分布. 与图 6 和图 7 对比显示, 在一定范围内释放量不同, 中性钡云遵循类似的演化规律, 但随释放量的增加, 所形成的中性

云团和电子云团也更大, 维持时间更长.

图 14 所示不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面的亮度分布表明, 钡云亮度以中心点最强, 随半径的增大而迅速减弱, 边界模糊. 随着时间的推移, 钡云亮度迅速下降, 但可见区域扩大. 与图 8 对比显示, 随释放量的增加, 所形成的中性云团亮度也正比增强.

3.4 在 250 km 高度释放 1 kg 钡原子

图 15 为在 250 km 高度释放 1 kg 钡原子 (形状因子 $\epsilon = 1$) 后 $t = 1, 10, 50, 100$ s 时刻云团中性钡原子和电子密度分布, 图 16 和图 17 分别为对应各时刻云团中心处电子密度剖面图和中性钡云 $x-y$ 平面的亮度分布.

图 15 与图 6 对比显示, 在不同高度释放钡原子, 中性钡云的形态基本一致, 但随着高度的降低, 云团在水平方向扩散范围更大, 而在垂直方向扩散范围减小, 呈更明显的水平方向拉伸的椭球形态. 而释放高度的不同, 电离得到的电子稠团及电子密度剖面有很大区别, 这主要是由于不同高度处背景电离层电子密度剖面不同所致.

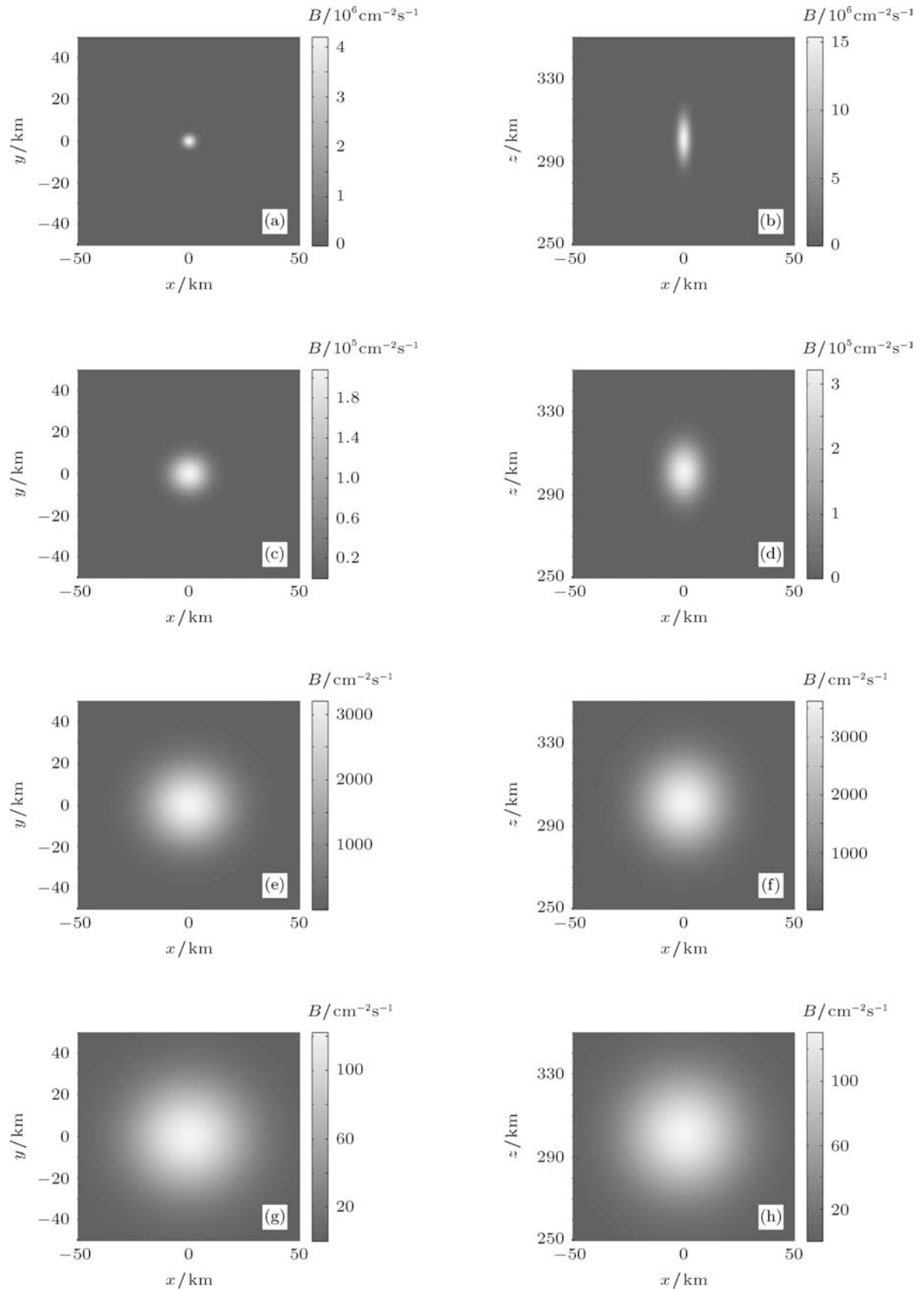


图 11 在 300 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 10$) 后不同时刻中性钡云 $x-y$ 平面和 $x-z$ 平面的亮度分布 (a) $t = 1$ s, $x-y$ 平面; (b) $t = 1$ s, $x-z$ 平面; (c) $t = 10$ s, $x-y$ 平面; (d) $t = 10$ s, $x-z$ 平面; (e) $t = 50$ s, $x-y$ 平面; (f) $t = 50$ s, $x-z$ 平面; (g) $t = 100$ s, $x-y$ 平面; (h) $t = 100$ s, $x-z$ 平面

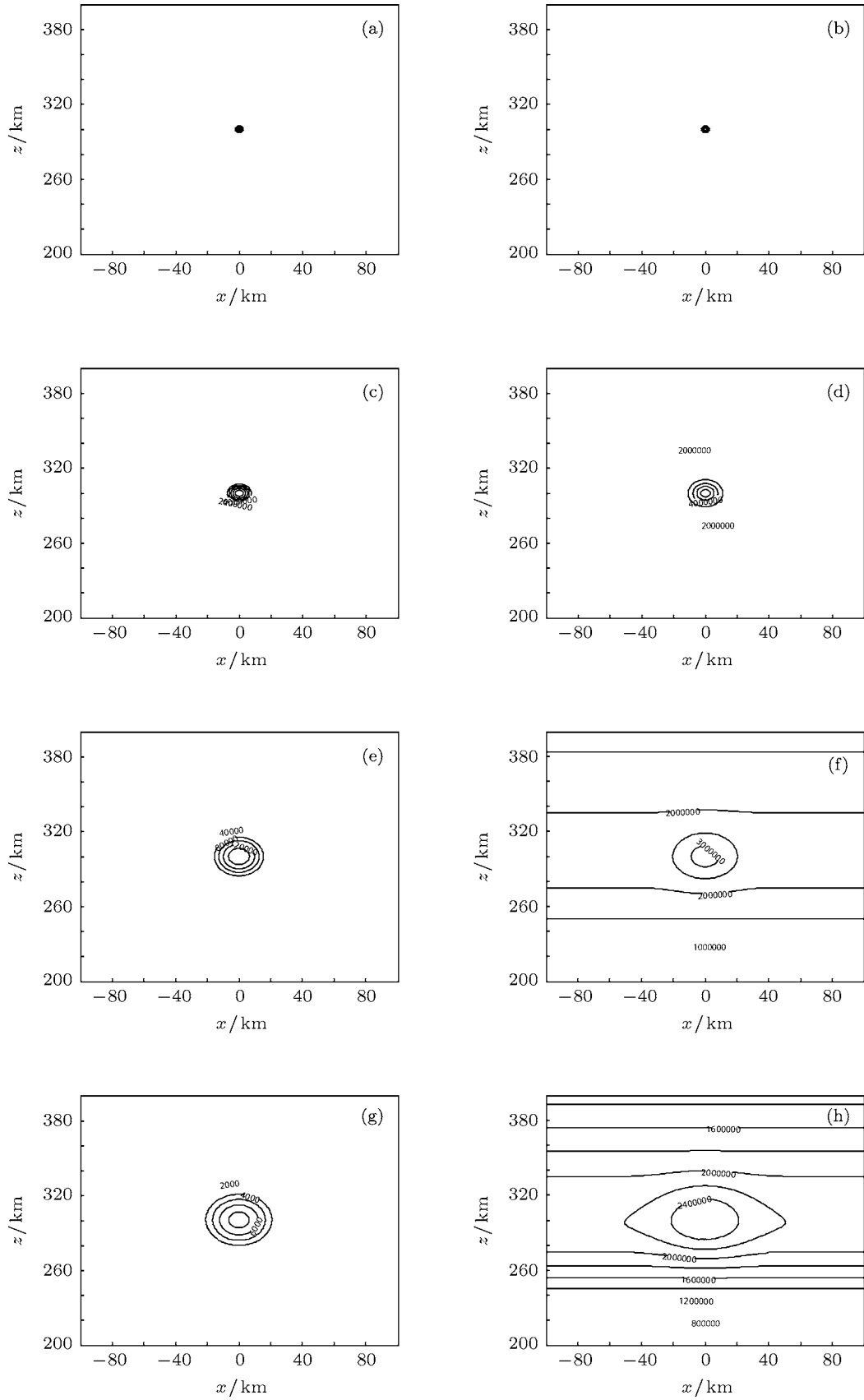


图 12 在 300 km 高度释放 10 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云和电子密度分布 (a) $t = 1$ s, 钡原子密度分布; (b) $t = 1$ s, 电子密度分布; (c) $t = 10$ s, 钡原子密度分布; (d) $t = 10$ s, 电子密度分布; (e) $t = 50$ s, 钡原子密度分布; (f) $t = 50$ s, 电子密度分布; (g) $t = 100$ s, 钡原子密度分布; (h) $t = 100$ s, 电子密度分布

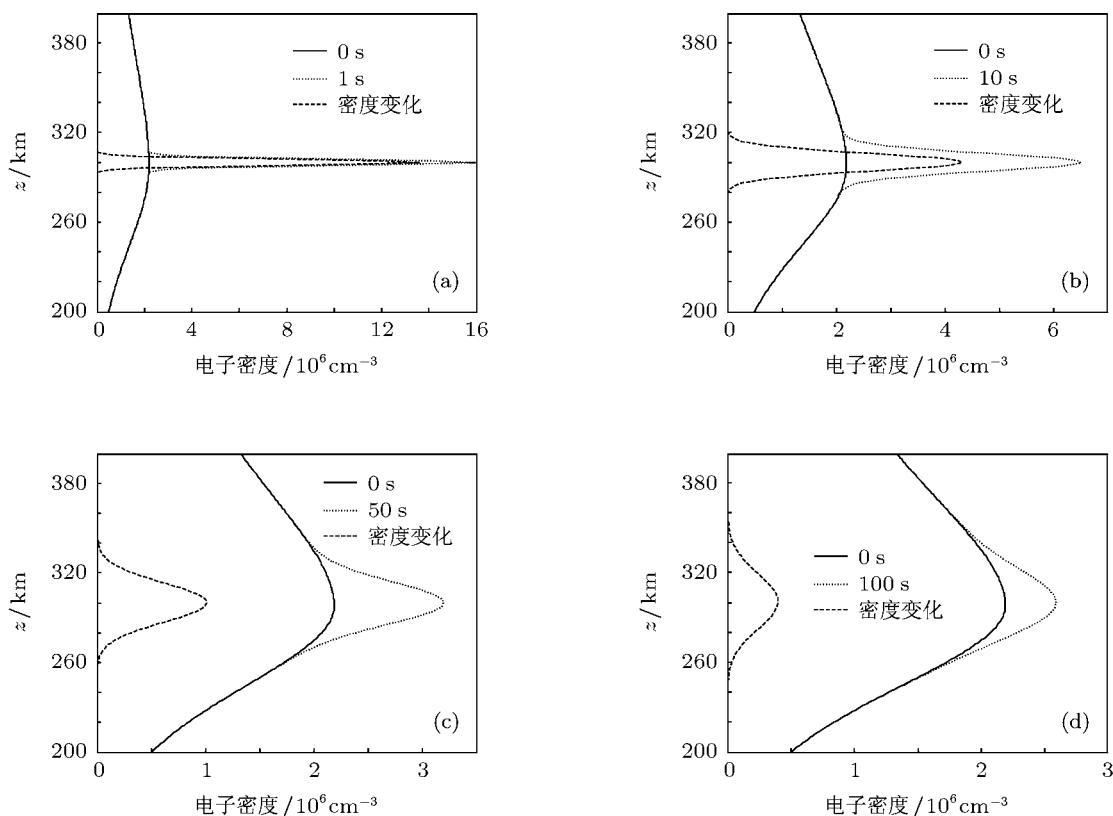


图 13 在 300 km 高度释放 10 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻云团中心处电子密度剖面图 (a) $t = 1$ s, $\delta = 623.2315\%$; (b) $t = 10$ s, $\delta = 197.3463\%$; (c) $t = 50$ s, $\delta = 46.2015\%$; (d) $t = 100$ s, $\delta = 18.1628\%$

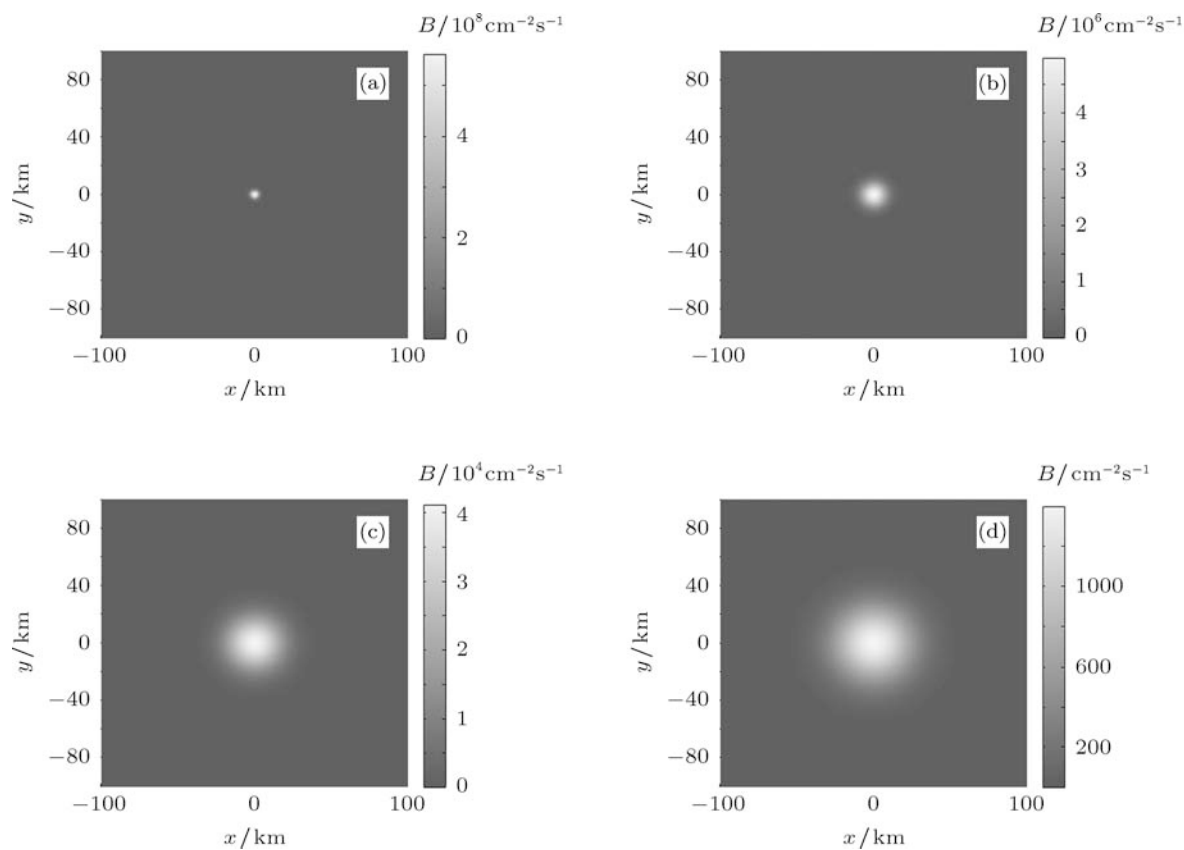


图 14 在 300 km 高度释放 10 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云 x - y 平面的亮度分布 (a) $t = 1$ s; (b) $t = 10$ s; (c) $t = 50$ s; (d) $t = 100$ s

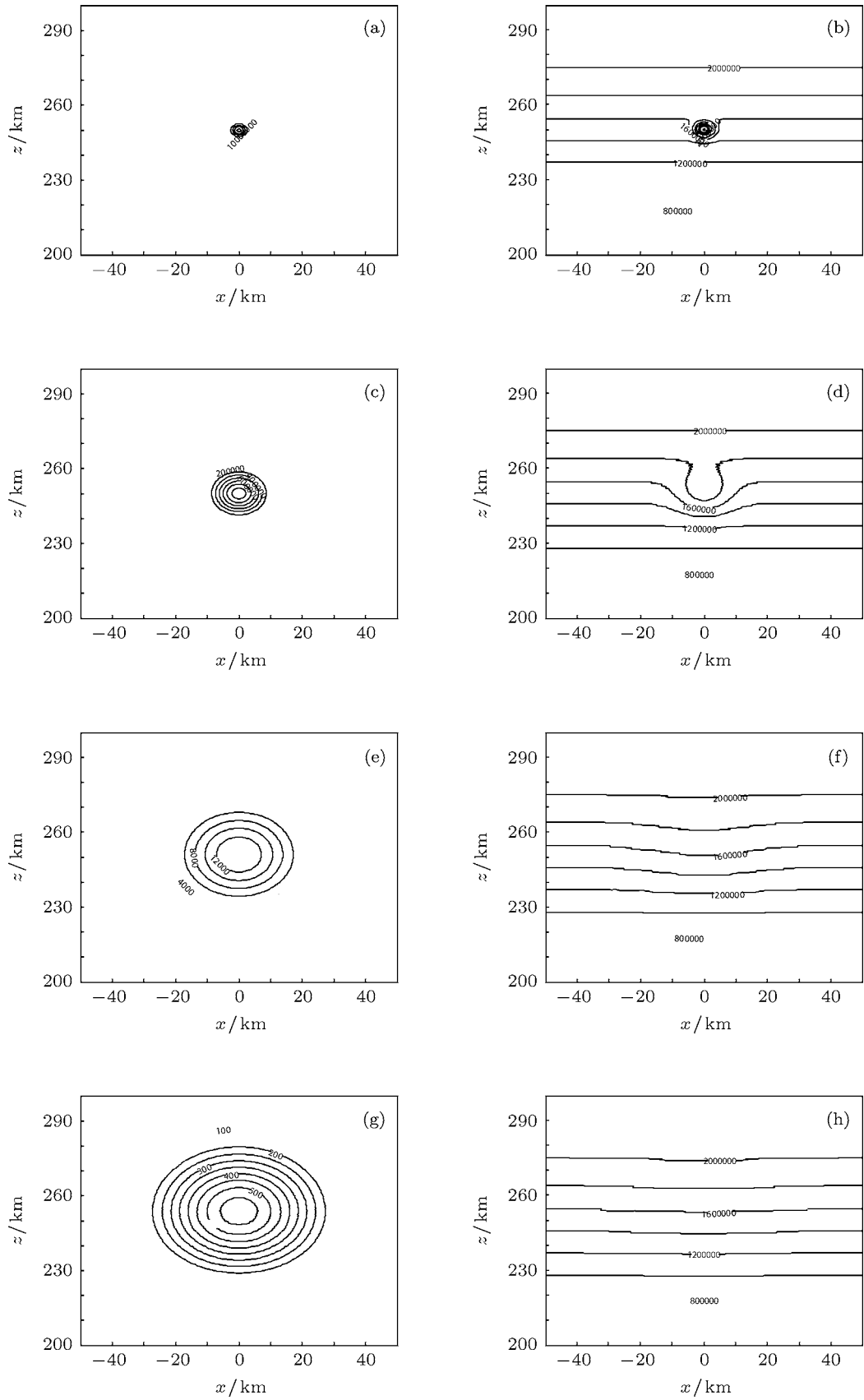


图 15 在 250 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云和电子密度分布 (a) $t = 1$ s, 钡原子密度分布; (b) $t = 1$ s, 电子密度分布; (c) $t = 10$ s, 钡原子密度分布; (d) $t = 10$ s, 电子密度分布; (e) $t = 50$ s, 钡原子密度分布; (f) $t = 50$ s, 电子密度分布; (g) $t = 100$ s, 钡原子密度分布; (h) $t = 100$ s, 电子密度分布

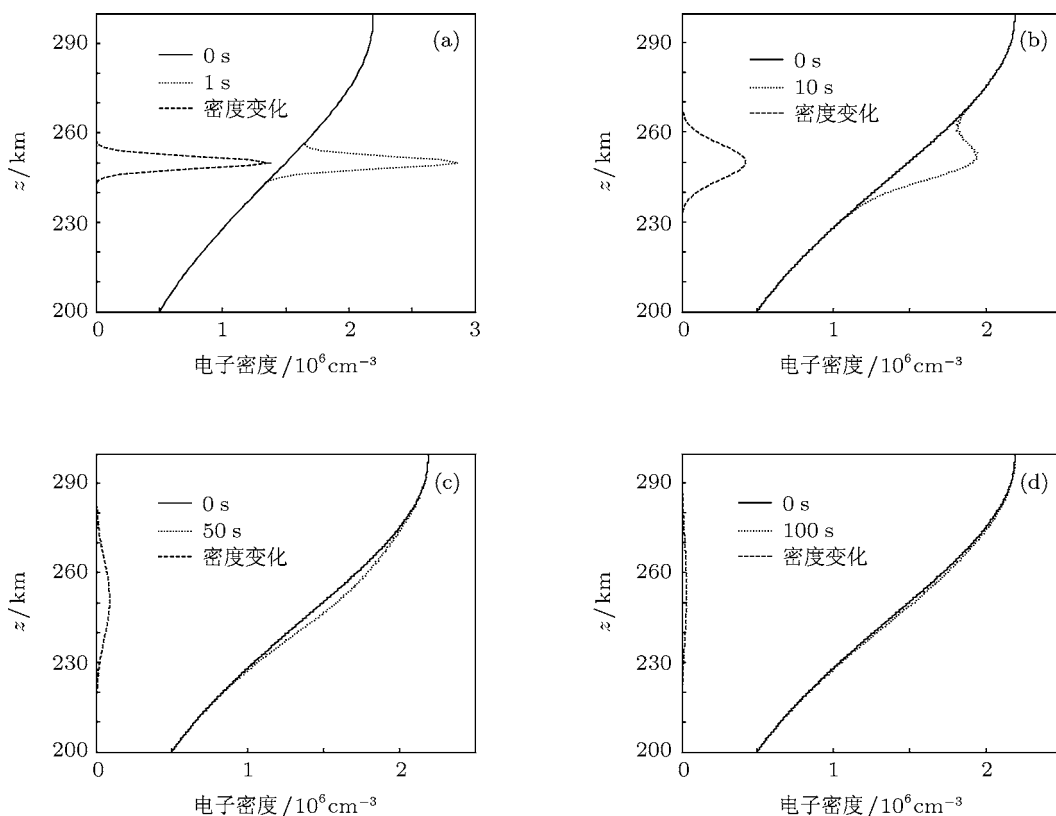


图 16 在 250 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻云团中心处电子密度剖面图 (a) $t = 1 \text{ s}$, $\delta = 90.5503\%$; (b) $t = 10 \text{ s}$, $\delta = 28.286\%$; (c) $t = 50 \text{ s}$, $\delta = 5.9537\%$; (d) $t = 100 \text{ s}$, $\delta = 2.025\%$

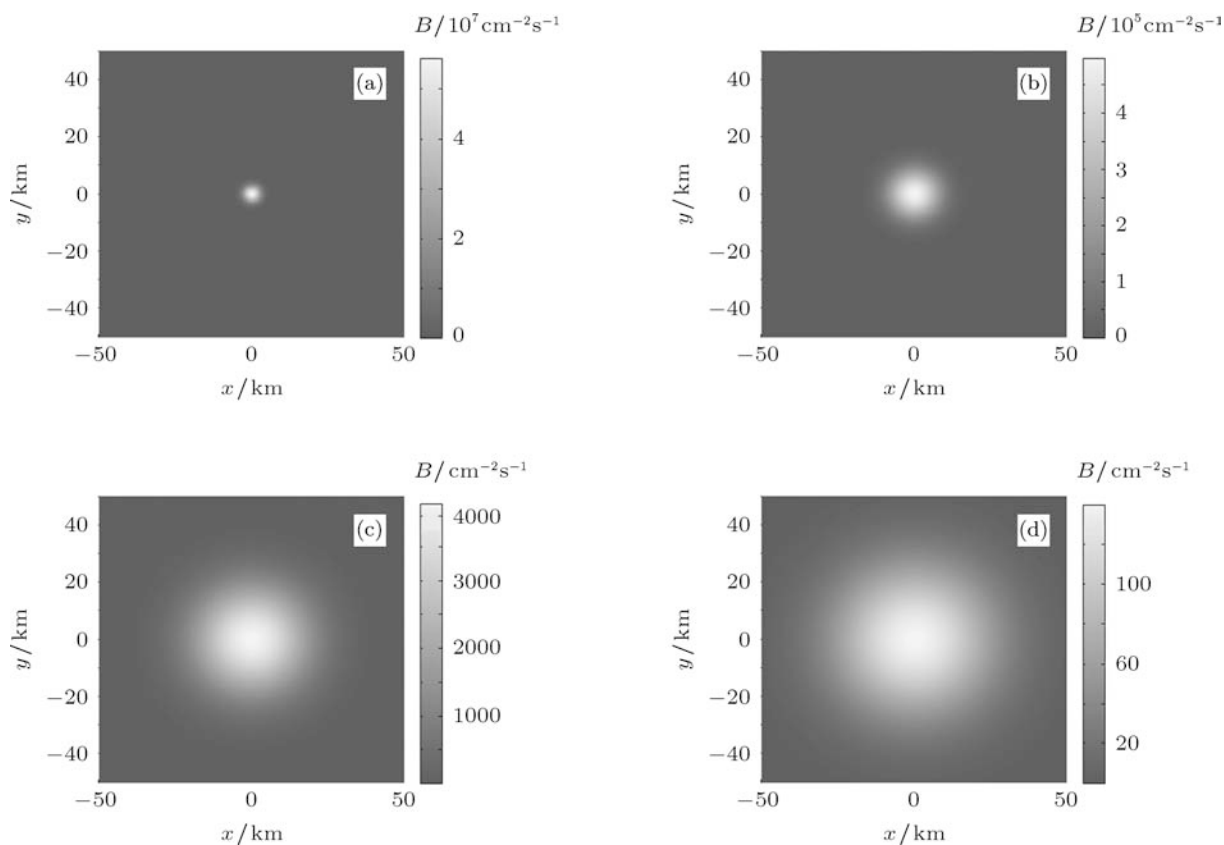


图 17 在 250 km 高度释放 1 kg 钡原子 ($\epsilon = 1$) 后不同时刻中性钡云 x - y 平面的亮度分布 (a) $t = 1 \text{ s}$; (b) $t = 10 \text{ s}$; (c) $t = 50 \text{ s}$; (d) $t = 100 \text{ s}$

图 17 与图 8 对比显示, 不同释放高度之间钡云亮度分布基本一致, 细微的区别与相应中性钡云的形态差异规律相同.

4 结论

本文在中性云团扩散模型的基础上, 讨论了电离层钡云在释放早期演化过程中的一些基本特征, 研究了不同释放条件下中性钡云形态、亮度分布以及释放区域电子密度分布. 基于已有数值模拟结果, 可以得出以下结论:

(1) 钡云释放初始速度仅在有限的时间内对其中性成分在中心位置造成有限的改变, 不影响云团的形态和分布. (2) 钡云形状因子仅对钡云演化初期形态具有显著影响. 随着时间的推移, 其中性云团形态差异逐渐缩小, 都呈近似水平方向拉伸的椭球状分布. (3) 钡云光电离电子同中性云团一起扩散, 在某一空间不具有时间累积性, 无法长时间

维持电子密度稠团状态. (4) 云团中心释放物质在释放之初 10 s 内即剧烈下降 2—3 个数量级, 随着时间的推移, 密度变化逐渐趋缓. 除了云团中心处的密度迅速下降外, 还以云团中心对称向周围空间弥散. 钡云中心点亮度在初期剧烈下降, 该趋势与中心点钡云数密度的迅速下降一致. (5) 不同释放量 (1, 10 kg), 中性钡云遵循类似的演化规律, 但随释放量的增加, 所形成的中性云团和电子云团也更大, 云团亮度更强, 维持时间更长. (6) 不同释放高度 (250, 300 km), 中性钡云的形态基本一致, 但随着高度的降低, 云团在水平方向扩散范围更大, 而垂直方向扩散范围减小, 呈更明显的水平方向拉伸的椭球形态. 不同的释放高度, 电离得到的电子稠团及电子密度剖面有很大区别.

本文仅对电离层钡云释放早期动力学行为进行了数值模拟, 不同释放环境下人工等离子体云团的形成与演化, 有待进行更加系统、深入的研究.

-
- [1] Bernhard P A 1979 *J. Geophys. Res.* **84** 793
- [2] Hu Y G, Zhao Z Y, Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8293 (in Chinese) [胡耀垓, 赵正予, 张援农 2010 物理学报 **59** 8293]
- [3] Hu Y G, Zhao Z Y, Xiang W, Zhang Y N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099402 (in Chinese) [胡耀垓, 赵正予, 项薇, 张援农 2011 物理学报 **60** 099402]
- [4] Lüst R 2002 *The Century of Space Science (Volume I)* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers) p179
- [5] Bernhardt P A, Roussel-Dupre R A, Pongratz M B 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 5777
- [6] Bernhardt P A 1992 *Phys. Fluid B* **4** 2249
- [7] Delamere P A, Stenbaek-Nielsen H C, Hampton D L, Wescott E M 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 17243
- [8] Delamere P A, Swift D W, Stenbaek-Nielsen H C 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 21289
- [9] Gatsonis N A, Hastings D E 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 7623
- [10] Lüst R 1972 *New Sci.* **1** 154
- [11] Ma T Z, Schunk R W 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 5793
- [12] Ma T Z, Schunk R W 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 323
- [13] Reasoner D L 1992 *J. Spacecraft Rockets* **29** 580
- [14] Schunk R W, Szuszczewicz E P 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 12901
- [15] Schunk R W, Szuszczewicz E P 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1337
- [16] Zalesak S T, Drake J F, Huba J D 1988 *Radio Sci.* **23** 591
- [17] Zalesak S T, Drake J F, Huba J D 1990 *Geophys. Res. Lett.* **17** 1597
- [18] Bernhardt P A, Swartz W E, Kelly M C, Sulzer M P, Noble S T 1988 *Astron. Lett. Commun.* **27** 183
- [19] Xu R L, Wu F, Lin D C 1994 *Adv. Space Res.* **15** 139
- [20] Li L, Xu R L 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1214
- [21] Bilitza D, Reinisch B W 2008 *Adv. Space Res.* **42** 599
- [22] Hedin A E 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1159

Numerical simulation on the early dynamics of barium clouds released in the ionosphere*

Hu Yao-Gai[†] Zhao Zheng-Yu Zhang Yuan-Nong

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(Received 16 July 2011; revised manuscript received 1 September 2011)

Abstract

Based on a neutral barium cloud diffusion model, considering the oxidation and ionization loss of barium atoms, the early ($t \leq 100$ s) evolution characteristics, morphologies, brightnesses and electronic density distributions of barium clouds released in the ionosphere are discussed in this paper. The numerical simulation results are presented for the early dynamics of barium clouds with different released masses (1, 10 kg), different release altitudes (250, 300 km), and different initial shape factors (1, 10).

Keywords: chemical releases, barium releases, diffusion model, evolution of neutral barium cloud

PACS: 94.20.Vv, 94.20.dv

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2010AA8093202) and the Fundamental Scientific Research Foundation for the Central Universities of China (Grant No. 3103001).

[†] E-mail: farawayhu@sohu.com