0254-6124/2014/34(6)-837–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Jindong, Li Lei, Tao Ran, Liu Cheng, Liu Yue, Cheng Bingjun, Xie Lianghai. Research on active plasma release experiment in ionosphere (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 837-842, doi:10.11728/cjss2014.06.837

电离层等离子体主动释放试验研究 *

王劲东 李 磊 陶 然 刘 成
刘 跃 程炳钧 谢良海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 等离子体主动释放试验是空间物理研究的一种主动、有效手段. 2013 年 4 月中国科学院空间科学与应用研究中心在海南进行了中国第一次空间等离子体主动释放试验. 探空火箭在 190 km 高度释放了近 1 kg 碱金属钡, 形成一团由钡原子和钡离子组成的云团. 利用地面光学观测手段, 记录了钡云从释放初期到末期的演化全过程, 获取了钡云亮度、粒子密度、成分及扩散范围随时间的变化规律. 通过对钡云漂移的研究, 得到低纬度地区释放点处电离层的中性风场特性, 其分析结果对于研究低纬度地区电离层动力学特性具有一定指导意义.

关键词 探空火箭, 钡, 等离子体

中图分类号 P 354. 4

Research on Active Plasma Release Experiment in Ionosphere

WANG Jindong LI Lei TAO Ran LIU Cheng
LIU Yue CHENG Bingjun XIE Lianghai

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Barium release is one kind of active experiments for space physics research, which can be used to study the near-earth space environment efficiently. In April 2013, the first barium release experiment of China was successfully implemented by Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, in Hainan Province. Nearly 1 kg barium was released by a sounding rocket at 190 km height in this experiment, which produced a spherical cloud including barium atoms and ions. The evolution process of barium cloud was recorded by ground-based optical observatory, obtaining the whole process of barium cloud brightness, particle density, composition and diffusion range variation with time. Through analysis of barium cloud drift, the neutral wind field characteristics of low-latitude regions of the ionosphere at the point of release are obtained. It is useful for further study of dynamics in low-latitude ionosphere region.

Key words Sounding rocket, Barium, Plasma

---

* 国家高技术研究发展计划项目资助 (2012AA7033045)
2014-01-07 收到原稿, 2014-03-27 收到修定稿
E-mail: wjd@nssc.ac.cn

0 引言

空间物理研究通常是通过对自然现象的观测分析来进行的, 但是这些现象不随人们意志而发生, 其时间、地点和能量很难预测. 主动释放实验是通过火箭及卫星将粒子或电磁波人为注入到空间, 采用地面光学、电磁测量和雷达进行观测, 或利用注入位置附近的火箭及卫星进行电磁场和粒子就位探测, 可以在指定时间、地点开展目的比较明确的实验, 是空间物理研究的一种主动、有效手段 [1].

化学物质释放是空间等离子体主动释放实验中最常用的方法之一, 其设备相对简单, 成本低, 搭载在火箭或卫星上均可开展实验. 通常释放的物质有碱金属或碱土金属, 例如 Ba, Cs, Na, Sr, Ca 等, 通过观测其与空间环境的相互作用, 研究等离子体的基本物理问题, 例如等离子体不稳定性及空间等离子体的起源等. 其中最常用的释放物是碱土金属钡 (Ba), 其电离电位低、重量轻. 此外, 钡原子的共振谱线为 553.5 nm (绿), 钡离子为 455.4 nm (蓝)[2], 均在可见光谱段, 便于观测.

无论钡原子还是钡离子, 在太阳光照射下都会产生共振散射, 成为发光云团. 随着钡云的不断扩散、电离, 云的颜色及形态不断变化. 由于钡云所产生的共振辐射处于可见光谱段, 通过常规光学观测手段即可实现钡释放全过程的观测和记录.

在释放量较小、对环境扰动不大的情况下, 通过钡释放试验可以很好地探测电离层结构与性质, 探测高层大气风场, 研究钡离子与背景电离层的相互作用; 在进行大量钡释放后, 可以实现人工改变电离层, 研究钡云对电磁波传播的效应, 并模拟该环境下无线电波的传播问题.

1 钡释放装置

为实现在空间指定区域的等离子体释放, 需要利用高温加热, 将钡金属汽化, 以达到主动试验的目的. 钡释放装置的功能即为在指定空间位置实现钡金属蒸汽的释放.

在空间环境中使释放物加热汽化需要特殊的热源, 由于受空间环境的限制, 本设备采用化学反应提供热量. 释放装置用压力罐作为反应容器, 利用钛和硼自蔓燃反应所放出的热量作为试验中钡的汽化释放热源. 其反应式为

$$\mathrm{Ti} + 2\mathrm{B} = \mathrm{TiB_2} + 66\,\mathrm{kcal}\cdot\mathrm{mol}^{-1}. \quad (1)$$

$$(1\,\mathrm{cal} = 4.184\,\mathrm{J})$$

钛和硼的自蔓燃反应最高燃烧温度可达 2500 K 以上, 比钡的汽化温度高 500 K. 试验装置由电控箱控制, 经过适当延时, 送出点火信号, 引燃反应罐内的装药, 从而在空间释放出钡蒸汽.

钡释放装置由两只反应罐、一台电控箱、两只分离开关以及连接电缆组成 (见图 1). 电控箱内置点火电源, 在分离开关产生分离信号后触发延时电路开始工作, 经过一段延时后控制继电器导通, 通过点火头点火, 引燃内装燃烧剂与释放物, 从而在空间释放出钡蒸汽. 钡释放装置搭载于探空火箭分离舱内, 两只反应罐对称布置 (见图 2). 当仪器舱分离后, 由分离开关发出起动信号, 钡释放装置开始加电工作. 经过适当延时, 由电控箱送出点火信号, 引燃反应罐内的装药, 从而在空间释放出钡蒸汽.

反应罐内部装药在电控箱发出点火信号后被引燃. 反应罐内 Ti 和 B 发生化学反应, 生成 TiB_2 化合物, 同时放出大量热量, 使反应罐内钡金属汽化, 形成钡蒸汽. 随着反应进行, 钡蒸汽产生的压强不断增加, 当 Ti 与 B 燃烧结束时, 钡蒸汽压强达到最大, 此时爆破片被冲开, 钡蒸汽从反应罐内部喷出.

2 钡释放试验

为实现钡释放试验的光学观测, 需要保证释放后形成的钡云处在日光照射下, 同时天空背景为黑色. 因此, 此次试验的发射 T_0 时刻定为 05:45:00 LT, 根

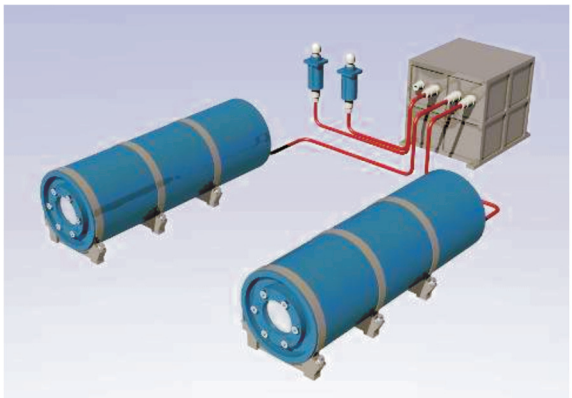

图 1 钡释放装置组成

Fig. 1 Components of barium release device

据设计指标, 钡释放装置在 39.5 s 头体分离后开始加电工作, 经过 191 s 延时后启动电爆管, 再经过 4 s 后, 反应罐达到爆破压强, 完成钡云释放, 即钡云释放于发射后 234.5 s.

2.1 释放高度及位置

由于利用探空火箭作为载体, 钡释放装置采用了时序控制的方法, 对释放高度及位置进行控制. 图 3 为钡释放装置工作时序, 从图 3 可以看出, 探空火箭发射时间与钡释放时刻的关系, 在火箭弹道确定的情况下, 通过时序控制可以完成对释放点位置的控制, 从而便于开展光学观测及跟踪.

根据箭载 GPS 接收机数据, 结合明确的释放时刻, 可以精确得到钡释放所在的空间位置. 表 1 列出了探空火箭钡释放试验的位置参数, 从高度可以看出释放试验位于电离层 F 层中.

2.2 光学景象分析

由于采用了热释放机制, 钡云的释放几乎在一瞬间完成, 释放扩散速度远大于火箭飞行速度, 所以释放出的钡云呈现各向同性, 宏观上表现为球状云团.

在钡云释放后的最初几秒, 形成一团中心为红色, 边缘为绿色的球状发光云团, 如图 4(a) 所示. 产生这种现象的原因为, 加热释放出的钡为热原子态, 其温度超过 2400 K, 所以在冷黑的空间背景下产生

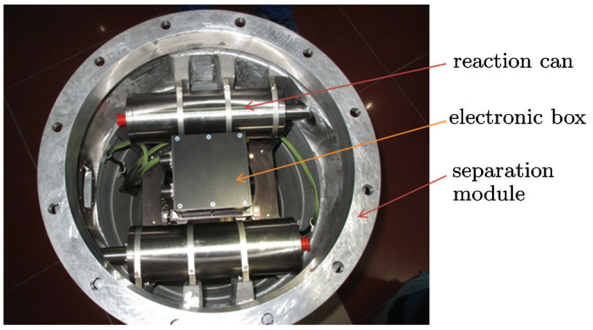

图 2 安装在分离舱内的钡释放装置

Fig. 2 Barium release device, installed in separation module of sounding rocket

表 1 释放位置参数表

Table 1 Position of release experiment

高度/km	经度/(°)E	纬度/(°)N	水平速度/(m·s^{-1})
189.068	108.189 862	19.299 054	475

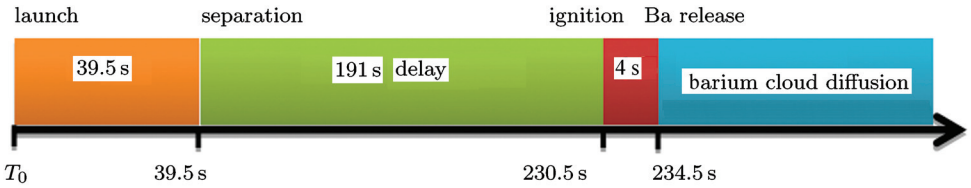

图 3 钡释放装置工作时序

Fig. 3 Timing diagram of barium release device

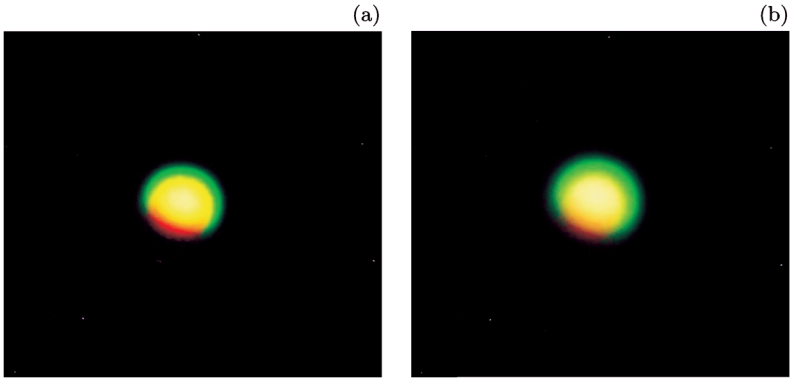

图 4 钡云前期光学图像. (a) 释放后第 12 秒时的观测, (b) 释放后第 27 秒时的观测

Fig. 4 Optical sight of barium cloud at beginning. (a) image of barium cloud 12 seconds after releasing, (b) image of barium cloud 27 seconds after releasing

明显的红色可见光辐射. 钡云边缘的绿色为钡原子在日光照射下产生的共振辐射.

在钡释放后 30 s 左右, 释放出的钡原子已经逐步冷却, 因此钡云中心红色部分已经完全转化为淡黄色, 在日光照射下产生的共振辐射使得外围绿色更为明显, 钡云尺寸扩大至 15 km 左右, 如图 4(b) 所示.

距离最初释放时刻约 47 s 时钡云已经完全冷却, 热辐射消失, 钡云中心部位不再有黄色的发光, 整体呈现出淡绿色光芒, 如图 5(a) 所示. 由于在释放前期钡原子被电离的比例较小, 因此全色拍摄时没有观测到蓝色的钡离子共振辐射. 通过 500 nm 短波通截止滤光片, 可以拍摄得到钡离子云发光的图像, 在第 47 秒时已有较为明显的光学效果, 证明此时已有部分钡原子转变为钡离子, 因而产生了 455.4 nm 的蓝色共振辐射光谱, 如图 5(b) 所示.

距离最初释放时刻约 60 s 左右时, 观测图像上显示出钡云整体颜色开始偏蓝, 由于此时钡原子已有相当一部分被光照电离, 成为钡离子, 因此呈现出钡离子的蓝色特征光谱 (钡原子光电离的特征时间为 28 s). 从观测图像中还可发现球形钡云两端出现了细长的条形结构, 这是由于磁洞破碎导致磁场进入钡云内部, 将钡离子捕获, 形成了长条状的钡离子云, 如图 6(a) 所示.

释放 100 s 后, 钡云的主要成分已转化为离子态, 大量钡离子被磁场捕获, 钡云的形态被拉长, 由球形变为橄榄形, 中心部位亮度大幅降低, 整体颜色也变为蓝紫色, 如图 6(b) 所示.

在释放后约 5 min 左右时, 钡云继续被拉长, 亮度逐步降低, 钡云整体呈现暗蓝紫色, 证明钡原子已基本全部电离. 钡云扩散空间加大至数十公里, 但是

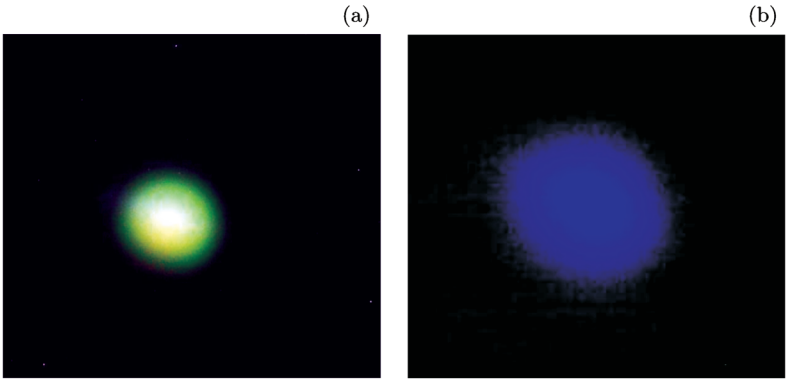

图 5 钡云中期光学图像. (a) 释放后第 47 秒时的观测, (b) 同时期观测到的钡离子云

Fig. 5 Optical sight of barium cloud, interim period. (a) image of barium cloud 47 seconds after releasing, (b) image of barium ion cloud 47 seconds after releasing

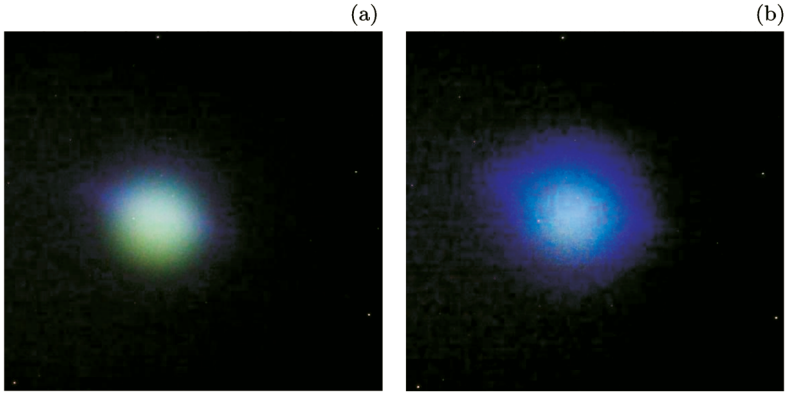

图 6 钡云后期光学图像. (a) 释放后第 64 秒时的观测, (b) 释放后第 100 秒时的观测

Fig. 6 Optical sight of barium cloud, late period. (a) image of barium cloud 64 seconds after releasing, (b) image of barium cloud 100 seconds after releasing

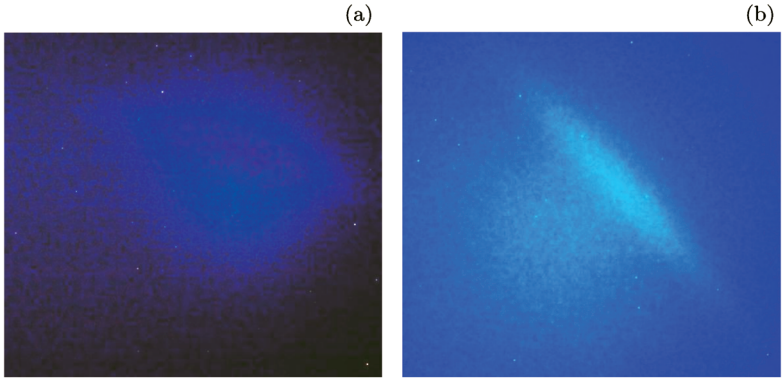

图 7 钡释放试验末期光学图像. (a) 释放后第 5 分钟时的观测, (b) 释放后第 10 分钟时经过增强的观测

Fig. 7 Optical sight of barium cloud, final stage. (a) image of barium cloud 5 minutes after releasing, (b) enhanced image of barium cloud 10 minutes after releasing

在夜空中仍然清晰可辨, 如图 7(a) 所示. 此次试验表明, 在电离层中进行钡释放试验, 所释放的钡原子及离子扩散速度受到电离层背景粒子密度的限制, 使得钡云扩散速度降低, 释放试验产生的钡云存活时间相对较长.

此后一直到钡释放后第 15 分钟时, 钡离子云继续沿磁场方向逐步拉长, 同时密度逐渐降低, 亮度也随之不断下降, 但仍保持原有漂移方向继续运动. 在距离钡云最初释放时刻约 15 分钟后, 由于钡云密度过低, 同时天空背景亮度增加, 钡云最终在释放后 15 分钟左右消失. 图 7(b) 为释放后第 10 分钟时的钡云观测结果, 经过增强处理后的图像清晰表现出了钡离子云的形态, 其长度超过了 50 km.

3 试验结果分析与讨论

3.1 钡云中心亮度及扩散范围

根据光学观测结果, 对钡云中心亮度及钡云扩散范围随时间的变化过程进行了分析. 图 8 为钡云中心亮度相对值以及钡云直径随时间的变化曲线, 通过钡云中心亮度可以反演得到钡云中心钡原子及离子数密度随时间变化的特性.

钡释放瞬间类似一个爆炸过程, 钡云呈辐射状迅速向四周散开, 并在很短时间内 (不到 1 s) 形成一个半径约 3 km 的云团, 接着在自身热压下迅速扩散. 随着钡云体积不断膨胀, 其温度迅速降低, 扩散速度随之降低.

由于整个释放前期钡云亮度主要来自钡原子的

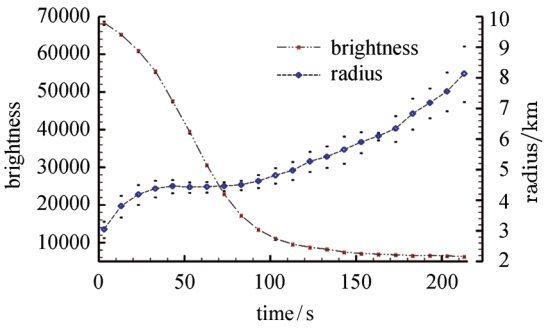

图 8 拟合得到的钡云中心亮度对应灰度值及直径随时间的变化

Fig. 8 Barium cloud central brightness (gray value) and diameter variation with time

贡献, 这里用中性原子云的观测结果来表征钡云亮度及空间尺度随时间的变化; 假设钡云近似为高斯分布, 空间上近似为球形, 可对某个时刻观测图像 G 通道的灰度值 (可以基本消除前期热辐射及后期离子发光对中性钡云灰度值的影响) 进行一维高斯拟合, 有

$$y = a\mathrm{e}^{-(\frac{x-b}{c})^2}. \tag{2}$$

其中, a 表示钡云在这个维度的中心亮度, b 表示钡云中心位置, c 表示特征半径, 这样即可得到该时刻钡云在这个维度上的中心亮度和特征半径. 同样也可得到其他维度和时刻的拟合结果, 从而得到钡云中心亮度及空间尺度随时间的变化.

3.2 钡云漂移轨迹及速度

根据光学观测结果, 依据钡云与背景星空的位置关系, 可以发现钡云在释放后产生了明显漂移, 漂移

方向为东偏北 6°. 由于释放时刻火箭位于弹道顶端附近, 飞行方向指向西偏南 10° 左右, 所以钡云漂移不是由于火箭初速度引起的. 钡云漂移状态如图 9 所示, 红色箭头表示火箭飞行方向, 绿色箭头表示了钡云漂移方向, 两者方向完全不同. 目前初步分析认为是电离层中性风引起了钡原子及离子的运动, 从而导致钡云漂移. 钡释放后在数秒钟内形成直径约 10 km 的球形钡云, 随即向东偏北方向产生明显漂移. 中性钡云在释放初始时刻有一初始速度, 但由于该高度背景粒子数密度较大, 碰撞效应比较明显, 钡云会在较短时间内 (特征时间约 37 s) 被背景粒子带动. 根据光学观测结果反演, 在可观测的 15 分钟内, 钡原子云的中心漂移距离达到约 64 km, 如图 10 所示. 由钡云运动轨迹可知, 钡释放试验区域的中性风风向为西偏南 6°, 而根据空间距离及时间可以初步得到钡云的平均漂移速度约为 71 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 即释放试验区域中性风平均风速达到约 70 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

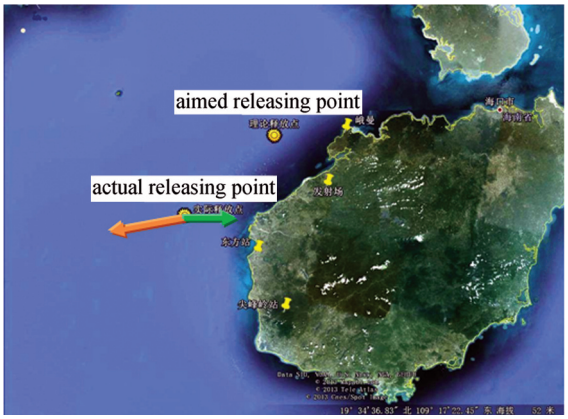

图 9 钡云漂移示意 (红色箭头表示火箭飞行方向, 绿色箭头表示钡云漂移方向)

Fig. 9 Drift of barium cloud (The red arrow indicates the flight direction of the rocket, and the green arrow indicates the drift direction of the barium cloud)

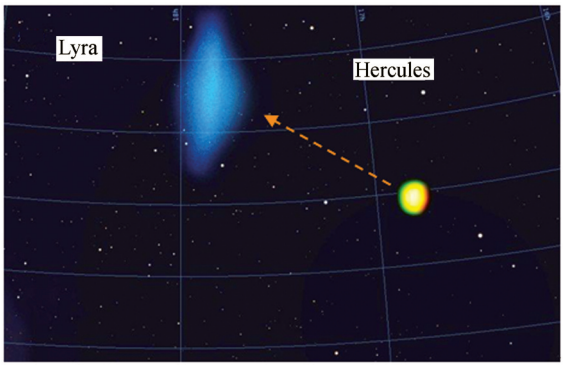

图 10 钡云漂移示意 (背景为武仙座, 垂直方向每格代表 5°, 水平方向每格 15°)

Fig. 10 Drift of barium cloud (Background shows the Hercules, and each cell represents 5° in vertical direction and 15° in horizontal direction)

4 结论

2013 年 4 月中国科学院空间科学与应用研究中心在海南进行了中国第一次空间等离子体主动释放试验. 利用探空火箭, 在电离层约 190 km 高度释放了近 1 kg 碱金属钡, 形成一团由钡原子和钡离子组成的云团. 利用钡在太阳光照射下电离并产生共振散射的特性, 通过地面光学观测手段, 记录了钡云从释放初期到末期的演化全过程, 获得钡云亮度、粒子密度、成分及扩散范围随时间的变化规律.

钡释放试验所形成的钡云与空间电磁场相互作用, 产生各种复杂的效应. 在平行于磁场的方向, 钡云主要是两极扩散、沉积和中性风的拖曳; 在垂直于磁场方向, 对流起主导作用, 最终形成了长条形的钡离子云.

利用钡释放试验, 实现了对中国低纬度地区电离层结构与性质的探测; 通过对钡云的跟踪观测, 完成了对电离层中性风场的就位探测. 探测结果表明在释放区域, 电离层中性风方向为西偏南 6°, 区域内的中性风平均风速达到约 70 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

此次空间等离子体主动试验为研究中国中低纬地区电离层特性, 揭示钡离子与背景电离层的相互作用以及开展等离子体不稳定性研究提供了试验数据.

参考文献

[1] Bernhardt P A, Huba J D, Pongratz M B, Simons D J, Wolcott J H. Plasma irregularities caused by cycloid bunching of the CRRES G-2 barium release [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(A2):1613-1627

[2] Delamere P A, Swift D W, Stenbaek-Nielsen H C. An explanation of the ion cloud morphology in the CRRES plasma injection experiments [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A10):21 289-21 295