

大气重力波引起的突发钠层的模拟研究^{*}

谭 辉 万卫星

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

应用钠原子和中性大气分子的质量连续性方程来模拟突发钠层 (SSL), 垂直风场采用接近实际大气重力波的正弦行波模式, 结果较好地反映了 SSL 的形成过程. SSL 的形成时刻在 5—15 min 之间并可持续到 30 min 之后, 形成高度大约在 90—100 km 之间, 峰宽为 0.5—2 km 之间, 这些都与实际观测 SSL 的特点相符. 同时还进一步地研究了当重力波参数 (主要指垂直波长和周期)、风速以及常态钠层半宽度发生变化时 SSL 的变化趋势.

关键词 大气重力波—突发钠层 (SSL)

1 引言

关于突发钠层 (Sudden Sodium Layer, 简称 SSL) 的成因, 至今尚无定论, 主要观点有流星烧蚀效应, 尘埃释放效应及大气动力学效应. Clemesha^[1] 认为 SSL 的形成与流星的烧蚀效应有关, 流星中含有大量的金属元素, 当流星飞入大气层时摩擦生热使流星燃烧, 就会释放出钠和其他金属原子或离子, 由于风剪切, 使金属离子和钠原子形成堆积, 分别形成 Es 和 SSL, 并且大量的观测结果证实 Es 和 SSL 有很强的相关性. Von Zahn^{[2],[3]} 则认为 SSL 是由钠层上空的尘埃释放的钠原子堆积形成, 与流星相似, 尘埃中也有大量的金属元素, 而导致金属元素释放的动力, 他将其归结为高能极光粒子与尘埃粒子的碰撞作用, 这一理论能较好地解释高纬地区 Es 和 SSL 的相关现象. Von Zahn 对流星烧蚀生成 SSL 的解释持反对态度, 其原因是流星注入的区域不可能太大, 而在多数情况下, SSL 则可以在很大的水平范围内同时观测到. 鉴于 Es 和 SSL 的相关性, 他还提出两种假设. 一是钠原子和金属离子同时从尘埃中分离出来, 然后经大气的运动形成堆积, 引发 SSL 和 Es. 二是金属离子先从尘埃中分离出来, 然后其中的钠离子被中性化后经堆积形成 SSL, 钠离子中性化过程涉及一系列的化学反应, 并非简单地得到电子. Kirkwood^[4] 则提出 SSL 的形成, 其原因主要是大气动力学因素, 例如大气重力波的作用. 他假设了一个正弦变化的垂直风场, 并对突发钠层的形成过程做了数值模拟, 结果表明 SSL 的形成高度, 峰宽和持续时间都与实测数据比较吻合.

综合以往的各种观点, 虽然对 SSL 的具体形成过程难下定论, 但其形成机制可以归纳为两个, 一是外部注入, 二是大气动力学因素. 而在诸多观点中, 除了 Kirkwood 之外, 很少有人将大气动力学因素放在主要位置. 最近龚顺生^[5] 等通过对武汉地区钠荧光激光雷达观测到的几次 SSL 现象的深入分析, 认为大气动力学因素可能是武汉地区 SSL 生成

^{*} 国家自然科学基金项目 49974039, 国家重点基础研究规划项目 G2000078407 资助的课题
2001-06-07 收到原稿, 2002-08-25 收到修定稿

的主要原因. 为了进一步证实这种观点, 本文在改进 Kirkwood 风场模式的基础上, 对重力波场形成 SSL 的过程进行了模拟. 下面首先介绍数值模拟的基本方法, 然后给出模拟结果, 最后给出结论.

2 数值模拟

2.1 基本方程

采用的出发方程是钠原子和中性大气的质量连续性方程. 在模拟过程中假设中性大气和钠原子数密度均为水平分层, 这样就只涉及二者数密度的垂直梯度; 同时钠原子作为一种微量成分, 将跟随中性大气一起运动, 因此二者将具有相同的运动速度. 模拟计算中采用直角坐标系, x 轴正向为东, y 轴正向为北, z 轴正向为垂直向上, 此时中性大气和钠原子的质量连续性方程分别为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -n \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - v_z \frac{\partial n}{\partial z}. \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -m \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - v_z \frac{\partial m}{\partial z}. \quad (2)$$

其中, m 和 n 分别为钠原子数密度及中性大气数密度, v_x 、 v_y 、 v_z 分别为速度的三个分量. 对于中性大气, 假设垂直风对其汇聚和发散的效果完全被水平风所平衡, 则 (1) 式的左项为零. 同时忽略速度的水平梯度, 即 $\partial v_x / \partial x = \partial v_y / \partial y = 0$. 为方便起见, 将 v_z 用 v 代替, z 用 h 代替, 则由 (1) 和 (2) 式得到,

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{mv}{n} \frac{\partial n}{\partial h} - v \frac{\partial m}{\partial h}. \quad (3)$$

假定中性大气数密度随高度指数分布, 即 $n = n_0 \exp(-(h-h_0)/H)$, 其中 h_0 和 n_0 分别为参考高度和参考高度上的中性大气浓度, H 为中性大气标高, 在钠层所在高度 (70—110 km) 上, 取 H 为 6 km. 由此可将 (3) 式化为

$$\frac{1}{m} \frac{\partial m}{\partial t} = -\frac{v}{H} - \frac{v}{m} \frac{\partial m}{\partial h}. \quad (4)$$

由 (4) 式可知 m 无需取其真实大小, 只需用相对值即可.

2.2 初值条件和风场模式

常态钠层设定为高斯分布 $m_0 = A_1 \exp(-(h-\mu_1)^2/2\sigma_1^2)$, 其中心位置一般在 90 km 左右的高度上, 半宽度 $d = 10$ —15 km. A_1 为比例系数, 相当于 $h = 90$ km 时的钠密度. 风场为正弦行波形式的重力波, 其表达式为

$$v = A_2 \exp\left(\frac{h}{2H}\right) \sin\left(\frac{2\pi(h'-h)}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right). \quad (5)$$

其中, λ 和 T 分别为垂直波长和周期, A_2 为比例系数, 而 h' 的选择则与初相位有关. 与 Kirkwood 的风场模式相比, 本文进行了重要的改进: 在 Kirkwood 的风场模式中, 垂直风场是一正弦驻波, 存在有波节点, 在波节点的位置上任何时刻风速都为 0. 并且 Kirkwood 只考虑了波节点以上的风场, 在波节点以下, 简单地将风速定为 0. 驻波是一种特殊形式

的波, 波的能量会在一个有界的区域内来回反射, 但在电离层的范围内这并不是普遍现象. 与 Kirkwood 不同, 本文采用的是正弦行波, 更接近于电离层中符合实际情况的重力波. 此外, 考虑到重力波振幅随高度指数增长, 因而在我们的模式中, 垂直风场振幅也应随高度指数增长.

2.3 数值算法

(4) 式是一阶偏微分方程, 因此在模拟计算中需要运用差分法将微分方程写成差分方程, 然后再采用数值积分. 考虑到数值积分的稳定性, 本文采用了隐格式, 时间步长为 1 s, 空间步长为 10 m. 在给定初值条件 $m(0, h)$ 和风场表达式 $v(t, h)$ 的情况下, 任一时刻的钠密度都可由递推关系完全确定.

3 结论

现假定 $h' = 100$ km, $\lambda = 15$ km, $T = 40$ min, 100 km 高度上的风速极值 (v_m) 为 8 m/s, 常态钠层半宽度 $d = 15$ km, 并由此计算出不同时间序列 (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 min) 钠密度随高度的分布, 如图 1 所示.

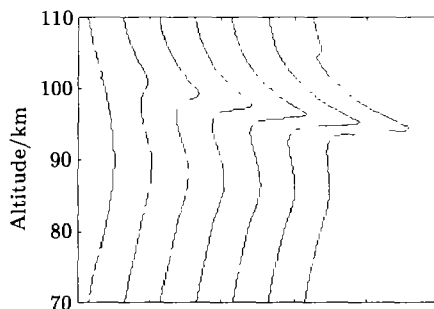


图 1 在重力波参数为: $\lambda = 15$ km, $T = 40$ min, $v_m = 8$ m/s, $d = 15$ km 时模拟得到的钠密度曲线

Fig.1 The altitude profile of number density of sodium when $\lambda = 15$ km, $T = 40$ min, $v_m = 8$ m/s, $d = 15$ km

由图 1 曲线可以看出 SSL 形成的时刻在 5—15 min 之间, 并可持续到 30 min 以后, SSL 形成的高度大约在 90—100 km 之间, 峰宽为 0.5—2 km, 这些都与实际观测 SSL 的特征相符.

为了进一步找出重力波参数对 SSL 的影响, 下面从垂直波长, 周期, 风速以及常态钠层半宽度等 4 个方面出发, 研究当它们改变时, SSL 的变化趋势.

图 2(a), 2(b) 描绘了当风速变化时, SSL 的变化趋势, 图 2(a), 2(b) 分别是 $v_m = 6$ m/s 和 10 m/s 时钠密度随高度的分布曲线. 由图可以看出, 风速对 SSL 的影响是相当明显的, 风速的大小直接关系到 SSL 能否形成的

问题. 当风速增大时, 峰增强; 风速减小时, 峰减弱. 例如当 v_m 减小到 6 m/s 时, 峰值大为减弱, 峰宽也有所增加; 而当 v_m 增大到 10 m/s 时, 峰十分明显. 同时当风速增大时, 峰值高度也会缓缓下移, 接近常态钠层的中心位置. 这里有两个问题值得一提. 首先, 在模拟计算中没有涉及到扩散项的作用, 实际上当风速增大到一定程度时, 可以形成很尖的峰, 这时钠密度具有很大的垂直梯度, 从而扩散项变得不能忽略, 在加入扩散项之后原来的尖峰会有所平滑. 其次, 本文所提及的垂直风速并非背景风场, 实际上背景的垂直风速很小, 而且难以测量, 本文已将其忽略. 同时在很多观测数据中 SSL 可以持续 1—2 h, 本文只模拟了 30 min 的变化趋势, 一般来说由焦耳热所激发的中尺度重力波所能持续的时间也为 1 h 左右, 这与 SSL 的特征也比较相符, 并且当风场逐渐消失时, SSL 仍能持续

一段时间, 然后渐渐地由于扩散作用而消退.

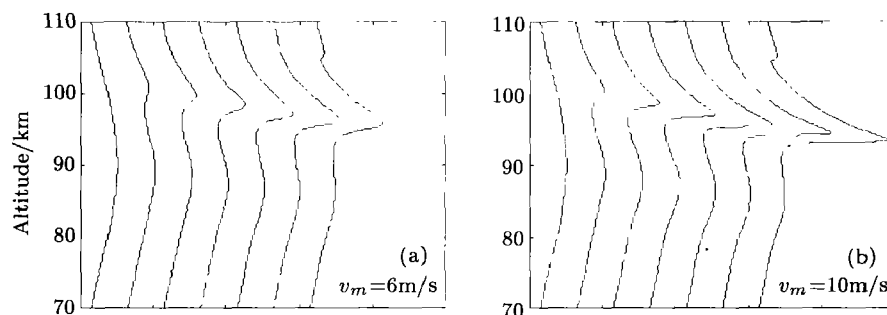


图 2 风速对 SSL 的影响

Fig.2 The influence of wind velocity on SSL

图 3(a), 3(b) 给出了当常态钠层半宽度 d 发生变化时, SSL 的变化趋势. 图 3(a), 3(b) 分别是 $d = 10\text{km}$ 和 20km 时钠密度随高度的分布曲线. 一般来说, d 为 10km 左右, 不会达到 20km , 不过此图主要目的是研究 SSL 随 d 的变化趋势. d 是常态钠层的半宽度, 它的值越大, 可供堆积的钠原子就越多, 峰值自然就会越明显. 因此对图 3 的解释是很明显的, 图 3(a) 并未形成 SSL, 这并不代表 $d = 10\text{km}$ 时不能形成突发钠层, 当适当地加大风速时, 突发钠层还是能够形成的. $d = 20\text{km}$ 时 SSL 则相当明显. d 值越大, SSL 越容易发生.

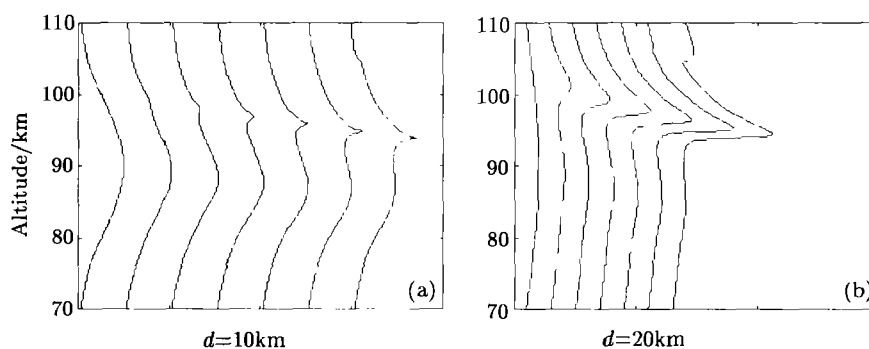


图 3 常态钠层半宽度对 SSL 的影响

Fig.3 The influence of half-width on SSL

图 4(a), 4(b) 给出了当垂直波长 λ 变化时, SSL 的变化趋势. 垂直波长 λ 反映了重力波在垂直方向上的变化情况, 在重力波振幅不变的情况下, λ 越小则重力波在垂直方向上变化越快, 反之则越慢. 重力波形成 SSL 的过程本质上来说是垂直风剪切的效果, 与形成 Es 的水平风剪切有相似之处, 要求风速在垂直方向上有一定的梯度才能有效地形成 SSL. 在重力波振幅不变的情况下, λ 越小, 垂直方向的速度梯度则越大, 自然就更容易形成堆积. 一般说来在 $90\text{--}100\text{km}$ 的高度上, 重力波垂直波长在十几公里左右, 而且变化尺度较小, 在波长的问题上本文并没有同时向两边拓展, 只选取了当 λ 增大时的情况.

况. 由图可以看出, 当 $\lambda = 20 \text{ km}$ 时峰值变小, 峰宽加大, SSL 没有 $\lambda = 15 \text{ km}$ 时那么明显, 只有在加大风速时才能获得相当的速度梯度.

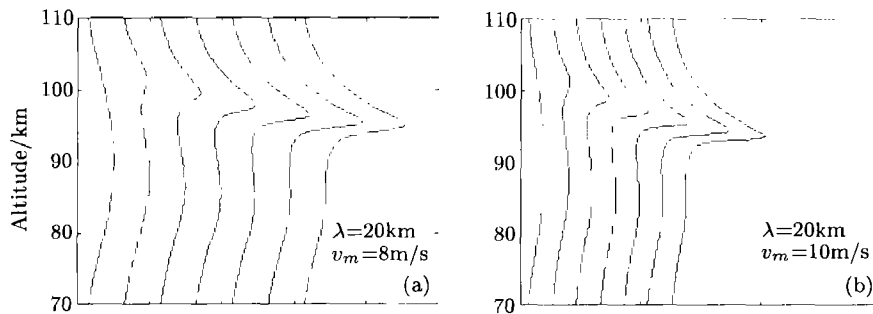


图 4 垂直波长对 SSL 的影响

Fig.4 The influence of vertical wave length on SSL

图 5(a)—5(d) 给出了当周期 T 变化时, SSL 的变化趋势. 图 5(a)—5(d) 分别是 T 为 45, 50, 35, 30 min 时钠密度随高度的分布曲线. SSL 随周期的变化趋势并没有一定的规律, 不过值得一提的是当 $T = 30 \text{ min}$ 时出现了明显的双峰现象, 对于这种现象也有所报道, 其产生的原因尚未弄清.

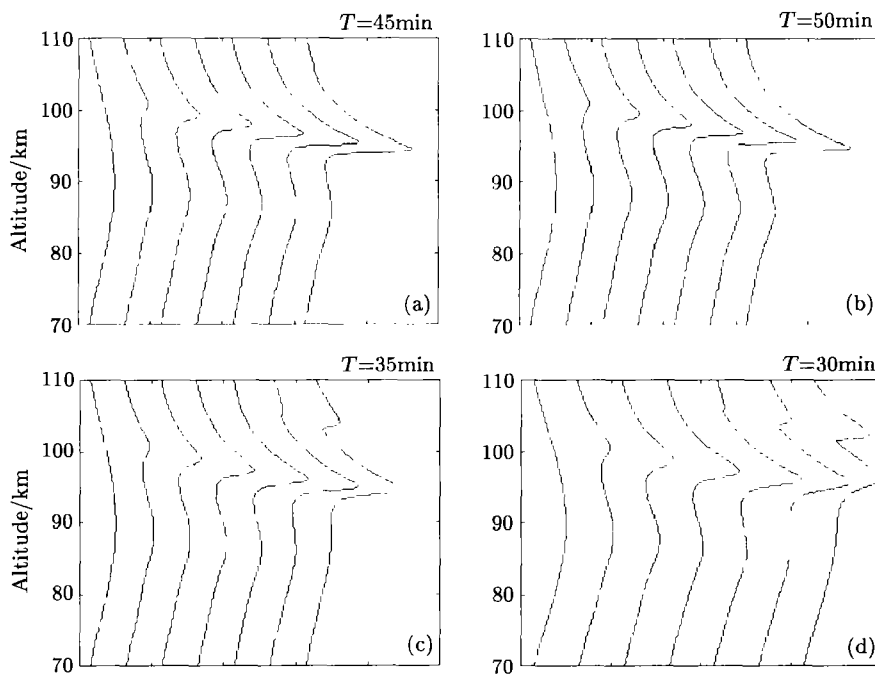


图 5 周期对 SSL 的影响

Fig.5 The influence of wave period on SSL

为了验证模拟方法的效果, 本文抽取了一些实际观测的数据, 这些数据都是武汉地区

激光雷达的实际观测数据. 如图 6 所示, 这是两次观测的结果, 也是每 5 min 取一次数据, 根据光子数当量反演所得到的钠原子密度随高度的分布曲线. 模拟结果同实测数据相比较, 虽然在一些细节上有所出入, 但 SSL 的变化趋势还是被模拟结果反映出来, 因为实际情况当然要复杂得多.

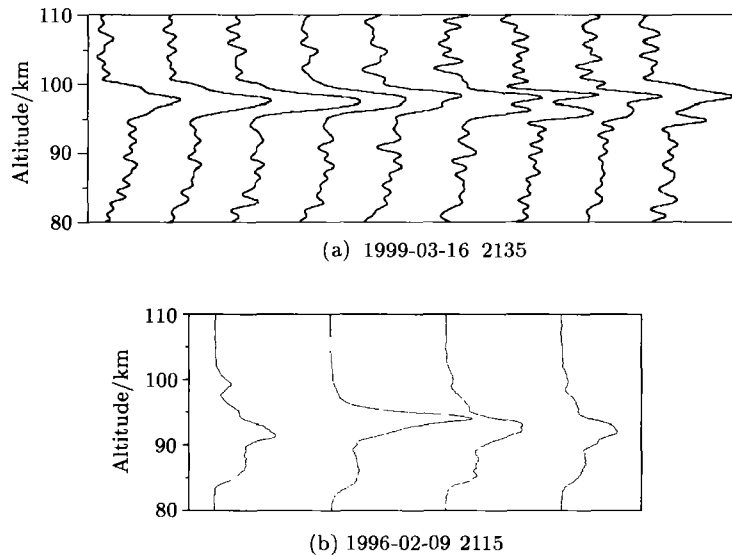


图 6 两次 SSL 事件实测的数据

Fig.6 two SSL events according to observed data

以上讨论了大气重力波对 SSL 形成过程的影响以及重力波参数的作用, 现在做一总结. 首先, 大气重力波是能够有效地产生 SSL 的, 当选择好适当的重力波参数时, 总能得出与实测相近的结果. 主要表现在 SSL 的形成时间, 形成高度以及峰宽都与实测相吻合. 其次, 重力波参数在 SSL 形成过程中起着重要的作用, 参数的选择直接关系到能否得到正确的结果. 重力波机制形成 SSL 的直接原因是要在垂直方向上有一定的速度梯度, 并且要有足够的钠原子可供堆积. 因此风速和常态钠层半宽度是影响 SSL 形成的两个比较重要的因素, 风速大则速度梯度大, 半宽度大则可供堆积的钠原子数目多.

参 考 文 献

- [1] Clemesha B R, Batista P P, Simonich D M. Concerning the origin of enhanced sodium layers. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**:1267—1270
- [2] VonZahn V, Von Der Gathen P, Hansen G. Forced release of sodium from upper atmospheric dust particle. *Geophys. Res. Lett.*, 1987, **14**:76—79
- [3] Von Zahn V, Hansen T L. Sudden neutral sodium layers: a strong link to sporadic E layers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1988, **50**:93—104
- [4] Kirkwood S, Collis P N. Gravity wave generation of simultaneous auroral sporadic-E layers and sudden neutral sodium layers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**:259—269
- [5] Gong S S. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium fluorescence lidar. *Sci. China (A)*, 1997, **40**:11—15

SIMULATION AND RESEARCH OF SUDDEN SODIUM LAYER GUIDED BY GRAVITY WAVES

TAN Hui WAN Weixing

(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract

The causes of formation of sudden sodium layer are not confirmed. The main viewpoints include effects of meteor ablation, dust release and atmosphere dynamics. To research into the influence of atmosphere dynamics to formation of sudden sodium layer, we simulate sudden sodium layer by applying the continuity equations for both atomic sodium and the background neutral atmosphere. As far as vertical winds are concerned, we adopt the model of a sine travelling wave which approaches the real one. The results reflect the process of sudden sodium layer's formation and development. The instant of sudden sodium layer's formation is from 5-minute to 15-minute and sudden sodium layer can last to 30-minute. The altitude of sudden sodium layer is from 90-kilometer to 100-kilometer. The width of sudden sodium layer is from 0.5 kilometers to 2 kilometers. All these are in agreement with the data obtained. And this paper also researches the tendency of sudden sodium layer's development when the parameters of gravity waves alter, including vertical wave length, wave period, velocity of the vertical winds and half-width of normal sodium layer. In all these factors, velocity of the vertical winds and half-width of normal sodium layer influence the formation of sudden sodium layer greatly. To validate the reliability of the simulation, this paper provides two cases of observation. Comparing the result of the simulation with the observation, we find that they are close to each other.

Key words Atmosphere gravity waves, Sudden sodium layer (SSL)

实践五号卫星空间探测与实验成果学术研讨会召开

中国空间科学学会空间探测专业委员会于 2002 年 9 月在福建省武夷山市召开了实践五号卫星空间探测与实验成果学术研讨会, 出席这次会议的有参加指挥、设计和研制卫星应用系统和有效载荷的科技工作者及领导, 到会 55 人, 收到论文 34 篇。

实践五号科学探测卫星的主要任务是: (1) 进行空间单粒子事件及对策研究试验并进行空间高能带电粒子和剂量测量。 (2) 进行未来复杂航天器有效载荷系统与波段高速数传发射机、大容量固态存储器及有效载荷数据管理系统的先期在轨技术实验。 (3) 进行空间流体科学实验。实践五号科学探测卫星在轨运行期间获得了大量科学数据, 顺利地完成了各项实验任务。

与会代表集中对以上三个方面的探测和研究成果进行了深入的交流、总结和研讨。