

闪电引起的天电和红闪现象的模拟研究 *

吴明亮^{1,2}† 徐寄遥¹ 马瑞平¹

1 (空间天气学重点实验室, 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

2 (中国科学院研究生院, 北京 100039)

(2006 年 1 月 23 日收到 2006 年 3 月 14 日收到修改稿)

用二维时变的电磁场模型, 研究了闪电放电产生的天电和红闪现象. 模拟结果表明: 闪电放电产生的电场包括辐射场和准静电场. 辐射场在地面-电离层波导中传播形成大气中的天电. 由准静电场引起的 N_2 分子第一个正波段的光辐射形成红闪现象. 用模拟的方法表明, 在红闪的空间结构发生变化的过程中, 有明显“V”形结构; 在红闪的整体机构中, 中心部分是一个光强度相对较强的核, 周围包着光强度相对较弱的晕.

关键词: 红闪, 天电, 电磁场模型

PACC: 0350D, 8670J, 9260P, 9460S

1. 引言

天电(sferics)和红闪(red sprite)是闪电放电引起的两种现象. 闪电放电产生的电磁波在地面-电离层波导中传播称为大气中的天电现象. 观测表明, 天电主要为甚低频(Very Low Frequency, VLF, 最大功率约在 10 kHz 左右)电磁波^[1]. 闪电放电引起的中间层-低电离层的发光现象称为红闪现象. 大量观测表明, 红闪现象主要出现在 70—80 km, 向上可以达到 85 km, 向下可以延伸到 50 km, 水平直径一般小于 50 km, 表现为胡萝卜形(carrot-sprites)、柱形(C-sprites)和“V”形(V-sprites)等结构^[2].

天电的测量一直是研究闪电放电特性的主要手段. 天电的波形较为复杂多样, 目前利用模拟的方法研究得较少. 然而, 从 1989 年 Franz 等用低光度摄像机第一次捕捉到红闪现象^[3]至今, 在对红闪进行大量观测研究的同时, 数值模拟的方法也成为主要的研究手段之一, 并在短短十几年的时间内取得了快速发展. 1991 年, Inan 等^[4]探讨了由闪电放电产生的强电磁场脉冲(EMP)将引起电离层的电子加热; 1993 年, Tarantenko 等^[5]建立了一个一维的动力学模型, 模拟了闪电放电产生的电磁脉冲引起的大气电

离和光辐射. 1995 年, Rowland 等^[6]建立了一个闪电放电产生的电磁场脉冲和电离层相互作用的二维电磁脉冲模型(EMP model). 1997 年, Pasko 等^[7]在传统的大气热崩机制的理论基础上, 建立了一个二维时变的准静电场模型, 模拟了红闪的时空特征. Cho^[8]和 Veronis^[9]分别运用二维电磁场模式(EM model), 研究了闪电放电产生的电场引起的大气电离和光辐射现象. 以 Pasko 等的模型为框架, 吴明亮和徐寄遥^[10,11]建立了一个改进的二维时变准静电场模型, 探讨了闪电放电产生的静电场在中间层引起的电离和光辐射现象. 研究表明, 电磁脉冲模型无法解释红闪的持续时间; 虽然准静电场模型能较好地解释红闪现象的多方面观测特征, 但不能全面反映闪电放电过程中电荷、电流和电场之间的关系, 也不能完整地给出闪电放电产生的电场(包括准静电场、辐射场和电离层产生的反射场)的空间结构; Cho^[8]和 Veronis^[9]等的电磁场模型有需要改进的地方(在后面要继续讨论). 因此, 建立一个更加普遍适用而且相对精确的时变的电磁场模式对于研究天电、红闪现象的时空变化特征是非常必要的. 本文在麦克斯韦方程组基础之上, 建立了一个二维时变的电磁场模型, 并用建立起来的电磁场模型研究由闪电放电引起的天电和红闪现象.

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 40225011), 国家重点基础研究专项基金(批准号: G2000078407)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-217)资助的课题.

† E-mail: mlwu@spaceweather.ac.cn

2. 数值模型

为了描述闪电引起的电磁场的时空变化, 我们采用如下的麦克斯韦方程组^[12]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} (\nabla \times B) - \frac{J}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E, \quad (2)$$

其中 E, B 分别为电场强度和磁感应强度, ϵ_0, μ_0 分别取为真空的介电常数和磁导率, J 为电流密度, 在闪电放电开始后, 总的电流密度主要包括两部分, 闪电的放电电流密度 J_L 和大气中的传导电流密度 J_I 。我们采用 Veronis 等^[9]采用的函数描述闪电放电电流的变化, 即

$$I(t) = \begin{cases} I_p \times t/\tau_r, & t \leq \tau_r, \\ I_p \exp\{-[(t - \tau_r)/\tau_f]\}, & t > \tau_r. \end{cases} \quad (3)$$

式中 τ_r 和 τ_f 分别为放电电流的上升时间和下降时间, I_p 为闪电放电电流的峰值。美国国家雷电探测网(NLDN)的观测表明, 与红闪现象相关的闪电放电电流峰值通常在 150 kA 左右^[13]。在我们的模型中, 闪电放电参数的选取分别为 $\tau_r = 100 \mu\text{s}$, $\tau_f = 750 \mu\text{s}$, $I_p = 150 \text{ kA}$ 。

大气中的传导电流密度遵守欧姆定律, 即

$$J_I = \sigma E, \quad (4)$$

其中 σ 为大气的电导率。当对流层出现强闪电放电时, 在中间层, 一方面由于瞬时电场对大气电子的加热引起电子迁移率的变化, 另一方面电子和大气分子的碰撞电离以及大气分子对电子的吸附引起电子数密度的变化, 这两个原因导致大气局部电导率自恰的改变。由于红闪现象出现在中间层高度(50—90 km)此高度范围大气的电导率以电子的电导率为主, 所以在模型中我们以电子电导率的作为大气的电导率, 电子的电导率计算公式为

$$\sigma_e = q_e N_e \mu_e, \quad (5)$$

其中 q_e 为电子的电量, μ_e 为电子的迁移率, N_e 为电子的数密度, 电子数密度的初始分布用下面公式给出^[9]:

$$N_e(z) = 1.43 \times 10^7 e^{(-0.15z')} \times e^{[(\beta - 0.15)(z - z')]} \text{ cm}^{-3}. \quad (6)$$

在(6)式中, z 为海拔高度, 单位为 km, $\beta = 0.5 \text{ km}^{-1}$, z' 为参照高度, 模拟结果表明, 当 $z' = 88 \text{ km}$ 时, 模

拟的光辐射高度与观测到的红闪高度比较好地吻合。

闪电放电前雷暴云电荷的积累过程是一个缓变的过程, 在雷暴云电荷的建立阶段, 随着雷暴云源电荷的增加, 在雷暴云上方的大气中将迅速产生诱导电荷, 诱导电荷产生的电场与雷暴云中的源电荷产生的电场方向相反, 对雷暴云源电荷产生的电场起抵消平衡作用, 所以在闪电放电前, 在对流层以上的高度范围内的总电场很小, 相对闪电放电后产生的电场完全可以忽略。在中间层到低电离层高度, 被电场加热的电子与大气分子的碰撞频率远大于电子的回旋频率, 所以地球磁场的影响也可以忽略^[8-10]。因此, 我们以闪电放电开始为模拟的起点, 并假定电磁场的初值为 0。大量观测表明, 雷暴云电荷结构多为层状结构, 有的多达六层^[14], 我们假定雷暴云电荷为简单的双层偶极结构, 上层带正电的雷暴云位置为 10 km($z_+ = 10 \text{ km}$), 下层带负电的雷暴云的位置在 5 km($z_- = 5 \text{ km}$)^[10, 11]。

因为胡萝卜形、柱形和“V”形等红闪结构均可看成轴对称结构, 所以我们采用的计算坐标系为柱坐标系(r, ϕ, z), z 轴表示高度, 模拟的高度范围 0—120 km, 水平范围 $r = 400 \text{ km}$; 水平方向步长 $\Delta r = 2 \text{ km}$, 坚直方向步长 $\Delta z = 1 \text{ km}$, 时间步长 $\Delta t = 10^{-7} \text{ s}$ 。模拟的下边界($z = 0$)设计为理想的反射边界, 上边界($z = 120 \text{ km}$)有两种处理方法, 一种设计为反射边界, 一种设计为开放吸收边界。我们比较了两种方法得到的光辐射强度, 差别很小, 原因是随着高度的增加, 大气的电导率指数增加, 电磁场的能量被有效地衰减, 电磁波很难穿透到上边界($z = 120 \text{ km}$), 两种处理上边界的方法对模拟结果几乎没有影响, 我们将上边界确定为理想反射边界。周围边界同样可处理为理想反射边界和开放吸收边界, 模拟结果表明(未给出), 当电磁场传播到周围边界时, 由于周边的反射边界会产生非物理反射, 所以将周围边界处理成开放吸收边界。

光谱分析表明, 红闪现象主要由 N_2 的第一个正波段辐射跃迁($B^3 \pi_g \rightarrow A^3 \Sigma_u^+$)产生的光辐射^[7], 所以在模型中我们只考虑此波段的激发和辐射。用蛙跳算法解方程组(1)和(2), 电离系数、吸附系数、电子迁移率和光辐射强度的计算公式与吴明亮和徐寄遥在准静电场模型^[10, 11]中采用的公式一样, 大气数密度由中性大气经验模式 MSIS 90 给出。

3. 模拟结果和讨论

3.1. 闪电放电产生的电场的空间分布

图1给出了闪电放电后0.6 ms电场E的空间分布。可见,闪电放电后电场主要分布在两个区域,近场区和远场区,近场区的电场是由雷暴云源电荷和大气中的感应电荷产生的准静电场,其大小⁶和一次放电过程破坏的电矩有关¹⁵;远场区的电场是闪电放电电流产生的辐射场,辐射场以光速($c = 3 \times 10^8$ km/s)向外传播,其空间分布与偶极辐射产生的辐射场的空间分布较为相似,在闪电放电的正上方电场较弱,与放电电流垂直的地面附近的电场较强。辐射场是发生在90 km左右持续时间非常短(< 1 ms)的elves现象的源⁸。由于低电离层对辐射场的反射作用,图中还出现了反射场。这与我们以前建立的准静电场模型计算的闪电放电产生的电场结构不同,因为准静电场模型只能给出准静电场的空间分布,无法给出辐射场和反射场的结构。所以说,建立在麦克斯韦方程组之上的电磁场模型才能较为全面地描述闪电放电过程中电荷、电流和电磁场之间的关系。

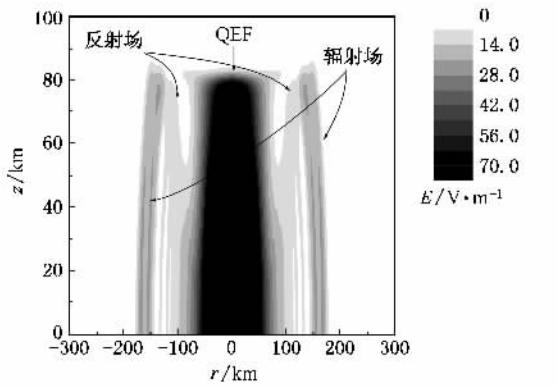


图1 闪电放电后0.6 ms电场的分布

3.2. 模拟的天电的变化特征

图2(a)和(b)分别给出了离闪电放电水平距离为300 km的在地面高度的辐射电场的两个分量 E_r , E_z 的波形。图2(b)中的虚线是假定从地面到电离层之间的波导为真空的情况下,电场强度分量 E_z 的时变。 E_z 的前两个波峰(用1,2标明)分别对应闪电放电电流直接辐射的电场峰值和电离层的反射场的第一个峰值,图2(b)中 E_z 的第3个波峰以及以后

的小峰是由于电离层的多次反射造成的。我们模拟的天电的最大功率的频率约3 kHz,与观测的天电的频谱特征基本一致(最大功率在约10 kHz)¹¹。天电在地面-电离层波导之间可以直接向外传播,也可以经过多次反射向外传播。图2(a)和(b)对比显示,电场的 E_r 分量远远小于电场的 E_z 分量,表明这时天电明显表现为横场的传播特征。图2(b)中实线的两个峰值的时间间隔比虚线的时间间隔短,表明在真实大气情况下,低电离层天电的反射高度低于120 km,说明模拟的上边界($z = 120$ km)设计为反射边界或开放边界对模拟结果的影响不大。实际大气中的电磁场(实线表示)比真空中的电磁场(虚线表示)衰减得更快,这是由于真实大气中低电离层对天电信号的衰减造成的。

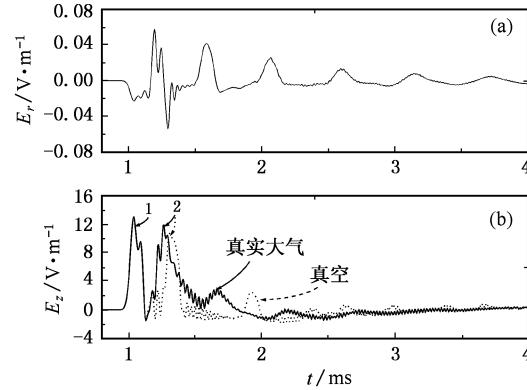


图2 模拟天电的电场波形 (a)电场的水平分量 E_r (b)电场的垂直分量 E_z

3.3. 闪电电场引起的大气击穿和红闪的分布特征

图3给出的是闪电放电后几个不同时刻大气击穿区域的空间分布,击穿的判据是电场大于大气的击穿电场($E \geq E_k$, E_k 是大气击穿电场的阈值, $E_k = 3.2 \times 10^6 N/N_0$ V/m, N 为大气数密度, $N_0 = 2.688 \times 10^{25} / m^3$ ¹⁷)。图中的黑实线表明击穿区域的外轮廓,即 $E/E_k = 1$ 。在0.35 ms时,辐射场已传播到中间层高度,但中间层中并没有发生击穿;在0.4 ms时击穿才发生。击穿区域发生在闪电放电的正上方,说明击穿主要不是由辐射场引起的,而是由准静电场引起的。当击穿发生后,击穿区域向四周扩散,在击穿区域向四周扩散的过程中,击穿区域的电场发生衰减,衰减的时标为 $\tau_r = \epsilon_0 / \sigma$ ¹⁷,即电导率 σ 越大的地方, τ_r 越小,电场 E 衰减得越快。图3中击穿区域随

时间变成“V”的形状,反映击穿区域局部的衰减速度是上面快,下面慢,中间快,四周慢。原因是大气电导率总体趋势为上面大,下面小,击穿区域的局部电导率表现为中间大,四周小。

图4(a)给出了两个不同时刻(2 ms, 7 ms)闪电放电后电子数密度的空间分布,图4(b)为(a)中对称轴上($r=0$)电子数密度的剖面图。由于准静电场导致局部气体击穿,引起大气的电离,在雷暴云的正上方形成一个电子数密度增大的“泡”(bubble),通常也叫闪电引起的电离层扰动。在对称轴上,当 $t=$

2 ms 和 7 ms 两个不同时刻, $z=73$ km 高度的电子数密度分别等于 $2.0 \times 10^8 / \text{m}^3$ 和 $1.7 \times 10^8 / \text{m}^3$, 比闪电放电前电子数密度增大 3 个数量级($t=0, N_e=1.6 \times 10^5 / \text{m}^3$)。因为电子与离子的复合系数较小, 所以电子数密度增大后衰减比较缓慢, 保持的持续时间较长(模拟的电子数密度增大 3 个数量级可持续 20 ms)。这个电子密度增大的“泡”降低了在地面-电离层波导中传播的甚低频信号的反射高度, 增大低电离层对甚低频信号的吸收, 改变甚低频信号的传播特性^[16]。

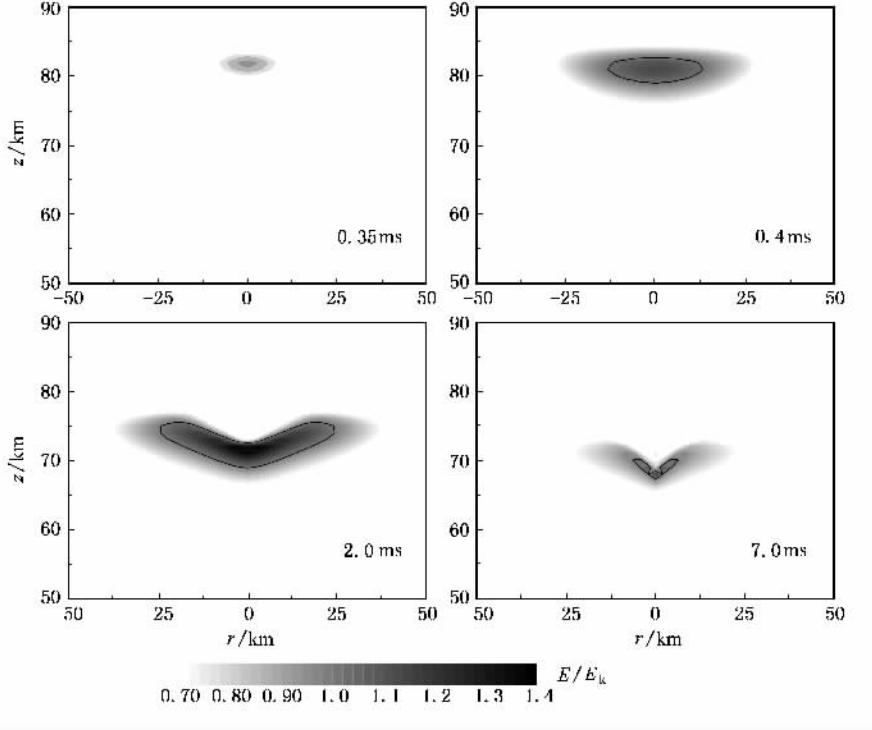


图3 不同时刻击穿区域($E/E_k \geq 1$)的空间分布

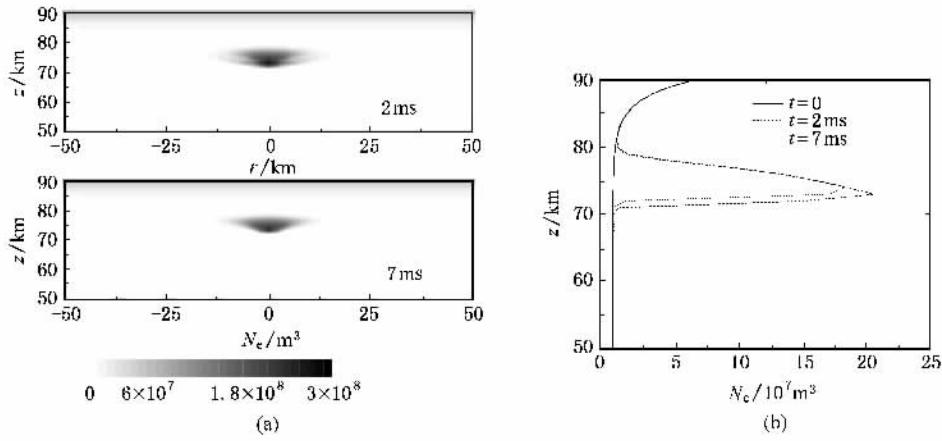


图4 (a)两个不同时刻(上 2 ms; 下 7 ms)电子数密度的空间分布 (b)对称轴上电子数密度的剖面

图 5(a) 为闪电放电后两个不同时刻 ($t = 0.4 \text{ ms}, 2 \text{ ms}$) Σ_u^+ 第一个正波段光辐射 ($B^3 \pi_g \rightarrow A^3$) 的体辐射强度 Φ_v (单位时间单位体积辐射的光子数, $\text{photon}/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 因为给出的两个时刻的体辐射强度相差 3 个量级, 所以图 5(a) 中两个图采用了不同的标度. 为了与观测进行比较, 我们在图 5(b) 给出了模拟的用常速照相机 (60 张像片/s, 时间分辨率 16 ms) 对红闪进行同高度水平拍摄的像片 (单位: Rayleigh, $R_s \text{MR} = 10^6 \text{ R}_s$), 模拟的曝光时间为 16 ms. 图 5(a) 表明, 红闪现象开始在 80 km 左右出现, 然后向下运动, 在向下运动的过程中形状逐渐变成“V”的形状, 形成“V”形红闪, 对应“V”形结构的击穿区域, 它的直径小于 50 km, 空间高度在 70—80 km. 这些特征都与观测很好的符合^[1]. 图 5(b) 表明在总的红闪的结构中存在一个光强度较强的“核”, 周围包着一个光强度相对较弱的“晕”(halo). 在对红闪的观测中, 发现“流注”(current)形式的红闪现象(半径几公里, 光强度较强)经常与“扩散”(diffuse)形式的闪晕现象(sprite halo)(半径几十公里, 光强度较弱)一起出现^[2]. 我们用模拟的方法表明“流注”形式的红闪现象和“扩散”形式的闪晕现象一起出现.

实际上, 在红闪被发现之前, Wilson 很早就提出了“上行闪电”(upward propagating discharge)预言. 在 1925 年, Wilson^[17]认为, 对流层闪电放电产生的强电场, 应该在高层大气中引起“上行闪电”. 1956 年 Wilson 进一步指出^[18], “上行闪电”应当在 80 km 以上高度发生, 而且高度越高越容易出现. 他的理由是闪电放电产生的静电场近似于偶极子产生的静电场, 在放电的正上方, 电场 (E) 的大小与高度 (h) 的关系可近似为 $E \propto \frac{1}{h^3}$, 但大气的数密度随高度指数减小, 因为指数函数减小得比幂函数更快, 所以高度越高越可能产生“上行闪电”. 但实际观测表明, “红闪”现象出现的高度大多数在 80 km 以下, 并且以向下运动为主. 为什么 Wilson 的预言和现有的观测有较大出入呢? 分析 Wilson 预言的理论根据发现, 他考虑了偶极子电场的大小和大气数密度随高度变化, 却没有考虑低电离层的高电子数密度和高电导率对电场的屏蔽作用, 也没有考虑大气被闪电电场击穿后局部电子数密度的突增对击穿区域的扩散运动产生的影响. 可见, 在研究闪电放电产生的电场在中间层-低电离层的耦合作用时, 大气的电导率是一个非常重要的参数.

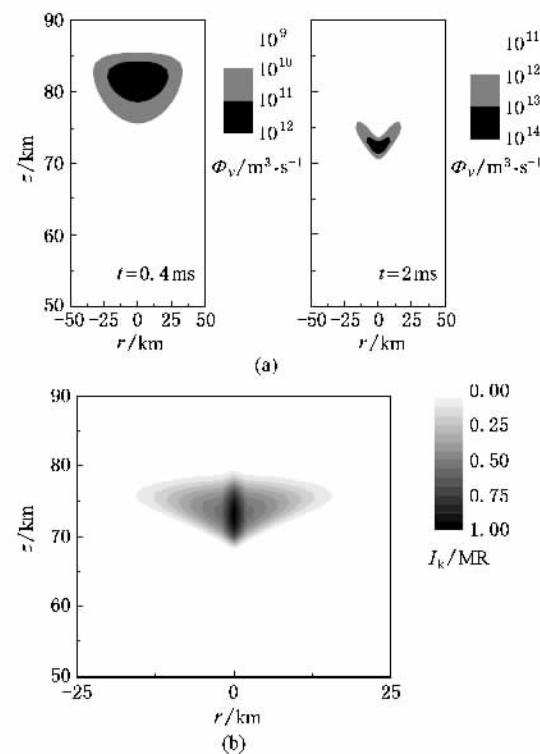


图 5 (a) 两个不同时刻光辐射的体辐射强度 (Φ_v) 的分布 (左 0.4 ms , 右 2 ms), (b) 模拟的红闪的形状

4. 小结

用电磁场模型研究了闪电放电产生的电磁场在中间层-低电离层的耦合过程. 模拟结果表明, 电磁场模型不仅具有准静电场模型的功能, 能给出总电荷(包括雷暴云源电荷和大气中的诱导电荷)产生的准静电场的时空特征^[10, 11], 而且具有电磁脉冲模型具有的功能, 能给出由闪电放电电流脉冲产生的辐射场和低电离层产生的反射场的空间结构. 也就是说, 只有用建立在完整的麦克斯韦方程组之上的电磁场模型, 才能准确全面地描述闪电放电过程中电荷、电流和电场之间的关系.

与 Cho^[8] 和 Veronis^[9] 的电磁场模型一样, 我们的电磁场模型也是建立在经典的麦克斯韦方程组之上, 都是用蛙跳格式解麦克斯韦方程组, 但是, 我们在电磁场的初边值的处理和对不同放电情况的处理上与他们有明显差别. Cho^[8] 在处理持续时间长的放电情况(放电量大, 产生红闪现象的放电情况)时, 实际上采用的是准静电场模型, 求解的是泊松方程. 在处理电磁场初值时, 考虑了晴天电离层电势 ($\Phi = 300 \text{ kV}$) 的影响, 却忽略晴天大气中存在微弱的电荷

密度和电流密度的事实,导致在模拟的前0.2 ms内,雷暴放电产生的电磁场还没传播到低电离层高度(~ 90 km),低电离层却出现了较强的光辐射,他们自己解释为这是模式在计算初期的非物理增长,我们认为这是计算初边值设计不合理造成的.如果初始值考虑了电离层电势,只有同时考虑晴天大气中存在的电荷密度和电流密度,整个初始值和边界才能自洽.在我们的电磁场模型中,忽略地球磁场、晴天大气电场的影响,电磁场的初值设计为0. Veronis 在文献 9 中将周围边界($r = 400$ km)处理为反射边界($E_z = 0$),整个模型的边界处理与 Pasko^[7]的准静电场“罐头”(TIN)模型一样,当电磁场传到周围边界时所有的能量就会被反射回来,向外传播的电磁场和反射回来的电磁场相互叠加,将出现不符合实际的反射和干涉现象.为了避免这种不符合实际的情况出现,在处理强放电脉冲情况(电流峰值大,放电时间短)时,他们将模拟时间限制在小于电磁场传到周围边界所需的时间之内(~ 1 ms).然而,产生红闪的对流层闪电放电的时间总是较长(0.5—3 ms)^[7],大大超出1 ms的界限.我们的模型在周围边界采用开放边界,初边值自洽,具有广泛的适用性.

模拟结果表明,闪电产生的辐射场在地面-电离层波导中传播形成大气中的天电现象.天电主要为甚低频电磁波,可以在地面-电离层波导中经过多次

反射向远处传播,在向外传播的过程中逐渐表现为横场的特征.由于大气的吸收,天电在传播过程中逐渐衰减.

闪电产生的电场使大气电离引起电子数密度发生突变(或叫闪电引起的电离层扰动),在 ~ 73 km高度电子数密度增大可达到3个数量级,形成一个电子数密度增大的“泡”,其效果相当于电离层突然出现沉降,电离层沉降对在地面-电离层波导中传播的甚低频信号产生影响.由于引起电子数密度减少的吸附系数相对较小,电子数密度增大以后衰减较慢,所以这个电子数密度增大的“泡”存在的时间相对较长(相对红闪的持续时间).模拟的电子数密度变化的大小和扰动的持续时间希望有进一步的观测验证.

准静电场引起氮分子第一个正波段的光辐射现象称为红闪现象.我们首次用模拟的方法验证了观测到的“V”形红闪,验证了观测到的红闪的总体结构中,中央部分是直径较小(几公里)的光强度较强的“核”,外面包围着直径较大(几十公里)的光强度较弱的“闪晕”.

红闪现象还有很多问题需要我们去研究,如红闪为什么总是成群出现(sprite cluster),在红闪现象衰减过程中,为什么有时出现持续时间相对较长的“亮珠”(bead)等等,我们将在现有的电磁场模型的基础之上,对这些尚未解决的问题作进一步的研究.

- [1] Rowland H L, Fernsler R F, Huba J D *et al* 1995 *Geophys. Res. Lett.* **22** 361
- [2] Moudry D, Stenbaek-Nielsen H, Sentman D *et al* 2003 *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **65** 509
- [3] Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R 1990 *Science* **249** 48
- [4] Inan U S, Bell T F, Rodriguez J V 1991 *Geophys. Res. Lett.* **18** 705
- [5] Tarangenko Y N, Inan U S, Bell T F 1993 *Geophys. Res. Lett.* **20** 1359
- [6] Rowland R L, Fernsler R F, Huba J D *et al* 1995 *Geophys. Res. Lett.* **22** 361
- [7] Pasko V P, Inan U S, Bell T F *et al* 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 4529
- [8] Cho M, Rycroft M J 1998 *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **60** 871
- [9] Veronis G, Pasko V P, Inan U S 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 12645
- [10] Wu M L, Xu J Y 2005 *Chin. J. Geophys.* **48** 480 (in Chinese)
- [11] Wu M L, Xu J Y 2005 *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese) **25** 510
- [12] Wu M L, Xu J Y 2005 *空间科学学报* **25** 510
- [13] Fu Z F, Hu Y Q 1995 Numerical simulation of space plasma (Hefei: Science & Technology Press of Anhui) (in Chinese) [傅竹风、胡友秋 1995 空间等离子体数值模拟(合肥:安徽科学技术出版社)]
- [14] Inan U S, Barrington-Leigh C P, Hansen S *et al* 1997 *Geophys. Res. Lett.* **24** 583
- [15] Marshall T C, Stolzenburg M, Rust W D *et al* 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 1157
- [16] Gou X Q, Zhang Y J, Dong W S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 957 (in Chinese) [苟学强、张义军、董万胜 2006 物理学报 **55** 957]
- [17] Pasko V P, Inan U S 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 17523
- [18] Wilson C T R 1925 *Proc. Phys. Soc.* **37** 32
- [19] Wilson C T R 1956 *Proc. Phys. Soc.* **236** 297
- [20] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 1998 *Geophys. Res. Lett.* **25** 2073
- [21] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 1999 *Geophys. Res. Lett.* **26** 1873
- [22] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 1873
- [23] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2001 *Geophys. Res. Lett.* **28** 1873
- [24] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 1873
- [25] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 1873
- [26] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** 1873
- [27] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** 1873
- [28] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** 1873
- [29] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** 1873
- [30] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** 1873
- [31] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2009 *Geophys. Res. Lett.* **36** 1873
- [32] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2010 *Geophys. Res. Lett.* **37** 1873
- [33] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2011 *Geophys. Res. Lett.* **38** 1873
- [34] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2012 *Geophys. Res. Lett.* **39** 1873
- [35] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 1873
- [36] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 1873
- [37] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2015 *Geophys. Res. Lett.* **42** 1873
- [38] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2016 *Geophys. Res. Lett.* **43** 1873
- [39] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 1873
- [40] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2018 *Geophys. Res. Lett.* **45** 1873
- [41] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 1873
- [42] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** 1873
- [43] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2021 *Geophys. Res. Lett.* **48** 1873
- [44] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** 1873
- [45] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2023 *Geophys. Res. Lett.* **50** 1873
- [46] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2024 *Geophys. Res. Lett.* **51** 1873
- [47] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2025 *Geophys. Res. Lett.* **52** 1873
- [48] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2026 *Geophys. Res. Lett.* **53** 1873
- [49] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2027 *Geophys. Res. Lett.* **54** 1873
- [50] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2028 *Geophys. Res. Lett.* **55** 1873
- [51] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2029 *Geophys. Res. Lett.* **56** 1873
- [52] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2030 *Geophys. Res. Lett.* **57** 1873
- [53] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2031 *Geophys. Res. Lett.* **58** 1873
- [54] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2032 *Geophys. Res. Lett.* **59** 1873
- [55] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2033 *Geophys. Res. Lett.* **60** 1873
- [56] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2034 *Geophys. Res. Lett.* **61** 1873
- [57] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2035 *Geophys. Res. Lett.* **62** 1873
- [58] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2036 *Geophys. Res. Lett.* **63** 1873
- [59] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2037 *Geophys. Res. Lett.* **64** 1873
- [60] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2038 *Geophys. Res. Lett.* **65** 1873
- [61] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2039 *Geophys. Res. Lett.* **66** 1873
- [62] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2040 *Geophys. Res. Lett.* **67** 1873
- [63] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2041 *Geophys. Res. Lett.* **68** 1873
- [64] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2042 *Geophys. Res. Lett.* **69** 1873
- [65] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2043 *Geophys. Res. Lett.* **70** 1873
- [66] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2044 *Geophys. Res. Lett.* **71** 1873
- [67] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2045 *Geophys. Res. Lett.* **72** 1873
- [68] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2046 *Geophys. Res. Lett.* **73** 1873
- [69] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2047 *Geophys. Res. Lett.* **74** 1873
- [70] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2048 *Geophys. Res. Lett.* **75** 1873
- [71] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2049 *Geophys. Res. Lett.* **76** 1873
- [72] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2050 *Geophys. Res. Lett.* **77** 1873
- [73] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2051 *Geophys. Res. Lett.* **78** 1873
- [74] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2052 *Geophys. Res. Lett.* **79** 1873
- [75] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2053 *Geophys. Res. Lett.* **80** 1873
- [76] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2054 *Geophys. Res. Lett.* **81** 1873
- [77] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2055 *Geophys. Res. Lett.* **82** 1873
- [78] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2056 *Geophys. Res. Lett.* **83** 1873
- [79] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2057 *Geophys. Res. Lett.* **84** 1873
- [80] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2058 *Geophys. Res. Lett.* **85** 1873
- [81] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2059 *Geophys. Res. Lett.* **86** 1873
- [82] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2060 *Geophys. Res. Lett.* **87** 1873
- [83] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2061 *Geophys. Res. Lett.* **88** 1873
- [84] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2062 *Geophys. Res. Lett.* **89** 1873
- [85] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2063 *Geophys. Res. Lett.* **90** 1873
- [86] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2064 *Geophys. Res. Lett.* **91** 1873
- [87] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2065 *Geophys. Res. Lett.* **92** 1873
- [88] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2066 *Geophys. Res. Lett.* **93** 1873
- [89] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2067 *Geophys. Res. Lett.* **94** 1873
- [90] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2068 *Geophys. Res. Lett.* **95** 1873
- [91] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2069 *Geophys. Res. Lett.* **96** 1873
- [92] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2070 *Geophys. Res. Lett.* **97** 1873
- [93] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2071 *Geophys. Res. Lett.* **98** 1873
- [94] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2072 *Geophys. Res. Lett.* **99** 1873
- [95] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2073 *Geophys. Res. Lett.* **100** 1873
- [96] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2074 *Geophys. Res. Lett.* **101** 1873
- [97] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2075 *Geophys. Res. Lett.* **102** 1873
- [98] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2076 *Geophys. Res. Lett.* **103** 1873
- [99] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2077 *Geophys. Res. Lett.* **104** 1873
- [100] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2078 *Geophys. Res. Lett.* **105** 1873
- [101] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2079 *Geophys. Res. Lett.* **106** 1873
- [102] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2080 *Geophys. Res. Lett.* **107** 1873
- [103] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2081 *Geophys. Res. Lett.* **108** 1873
- [104] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2082 *Geophys. Res. Lett.* **109** 1873
- [105] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2083 *Geophys. Res. Lett.* **110** 1873
- [106] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2084 *Geophys. Res. Lett.* **111** 1873
- [107] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2085 *Geophys. Res. Lett.* **112** 1873
- [108] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2086 *Geophys. Res. Lett.* **113** 1873
- [109] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2087 *Geophys. Res. Lett.* **114** 1873
- [110] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2088 *Geophys. Res. Lett.* **115** 1873
- [111] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2089 *Geophys. Res. Lett.* **116** 1873
- [112] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2090 *Geophys. Res. Lett.* **117** 1873
- [113] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2091 *Geophys. Res. Lett.* **118** 1873
- [114] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2092 *Geophys. Res. Lett.* **119** 1873
- [115] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2093 *Geophys. Res. Lett.* **120** 1873
- [116] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2094 *Geophys. Res. Lett.* **121** 1873
- [117] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2095 *Geophys. Res. Lett.* **122** 1873
- [118] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2096 *Geophys. Res. Lett.* **123** 1873
- [119] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2097 *Geophys. Res. Lett.* **124** 1873
- [120] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2098 *Geophys. Res. Lett.* **125** 1873
- [121] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2099 *Geophys. Res. Lett.* **126** 1873
- [122] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2100 *Geophys. Res. Lett.* **127** 1873
- [123] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2101 *Geophys. Res. Lett.* **128** 1873
- [124] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2102 *Geophys. Res. Lett.* **129** 1873
- [125] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2103 *Geophys. Res. Lett.* **130** 1873
- [126] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2104 *Geophys. Res. Lett.* **131** 1873
- [127] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2105 *Geophys. Res. Lett.* **132** 1873
- [128] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2106 *Geophys. Res. Lett.* **133** 1873
- [129] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2107 *Geophys. Res. Lett.* **134** 1873
- [130] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2108 *Geophys. Res. Lett.* **135** 1873
- [131] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2109 *Geophys. Res. Lett.* **136** 1873
- [132] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2110 *Geophys. Res. Lett.* **137** 1873
- [133] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2111 *Geophys. Res. Lett.* **138** 1873
- [134] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2112 *Geophys. Res. Lett.* **139** 1873
- [135] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2113 *Geophys. Res. Lett.* **140** 1873
- [136] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2114 *Geophys. Res. Lett.* **141** 1873
- [137] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2115 *Geophys. Res. Lett.* **142** 1873
- [138] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2116 *Geophys. Res. Lett.* **143** 1873
- [139] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2117 *Geophys. Res. Lett.* **144** 1873
- [140] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2118 *Geophys. Res. Lett.* **145** 1873
- [141] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2119 *Geophys. Res. Lett.* **146** 1873
- [142] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2120 *Geophys. Res. Lett.* **147** 1873
- [143] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2121 *Geophys. Res. Lett.* **148** 1873
- [144] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2122 *Geophys. Res. Lett.* **149** 1873
- [145] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2123 *Geophys. Res. Lett.* **150** 1873
- [146] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2124 *Geophys. Res. Lett.* **151** 1873
- [147] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2125 *Geophys. Res. Lett.* **152** 1873
- [148] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2126 *Geophys. Res. Lett.* **153** 1873
- [149] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2127 *Geophys. Res. Lett.* **154** 1873
- [150] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2128 *Geophys. Res. Lett.* **155** 1873
- [151] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2129 *Geophys. Res. Lett.* **156** 1873
- [152] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2130 *Geophys. Res. Lett.* **157** 1873
- [153] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2131 *Geophys. Res. Lett.* **158** 1873
- [154] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2132 *Geophys. Res. Lett.* **159** 1873
- [155] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2133 *Geophys. Res. Lett.* **160** 1873
- [156] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2134 *Geophys. Res. Lett.* **161** 1873
- [157] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2135 *Geophys. Res. Lett.* **162** 1873
- [158] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2136 *Geophys. Res. Lett.* **163** 1873
- [159] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2137 *Geophys. Res. Lett.* **164** 1873
- [160] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2138 *Geophys. Res. Lett.* **165** 1873
- [161] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2139 *Geophys. Res. Lett.* **166** 1873
- [162] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2140 *Geophys. Res. Lett.* **167** 1873
- [163] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2141 *Geophys. Res. Lett.* **168** 1873
- [164] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2142 *Geophys. Res. Lett.* **169** 1873
- [165] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2143 *Geophys. Res. Lett.* **170** 1873
- [166] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2144 *Geophys. Res. Lett.* **171** 1873
- [167] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2145 *Geophys. Res. Lett.* **172** 1873
- [168] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2146 *Geophys. Res. Lett.* **173** 1873
- [169] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2147 *Geophys. Res. Lett.* **174** 1873
- [170] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2148 *Geophys. Res. Lett.* **175** 1873
- [171] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2149 *Geophys. Res. Lett.* **176** 1873
- [172] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2150 *Geophys. Res. Lett.* **177** 1873
- [173] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2151 *Geophys. Res. Lett.* **178** 1873
- [174] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2152 *Geophys. Res. Lett.* **179** 1873
- [175] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2153 *Geophys. Res. Lett.* **180** 1873
- [176] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2154 *Geophys. Res. Lett.* **181** 1873
- [177] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2155 *Geophys. Res. Lett.* **182** 1873
- [178] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2156 *Geophys. Res. Lett.* **183** 1873
- [179] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2157 *Geophys. Res. Lett.* **184** 1873
- [180] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2158 *Geophys. Res. Lett.* **185** 1873
- [181] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2159 *Geophys. Res. Lett.* **186** 1873
- [182] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2160 *Geophys. Res. Lett.* **187** 1873
- [183] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2161 *Geophys. Res. Lett.* **188** 1873
- [184] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2162 *Geophys. Res. Lett.* **189** 1873
- [185] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2163 *Geophys. Res. Lett.* **190** 1873
- [186] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2164 *Geophys. Res. Lett.* **191** 1873
- [187] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2165 *Geophys. Res. Lett.* **192** 1873
- [188] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2166 *Geophys. Res. Lett.* **193** 1873
- [189] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2167 *Geophys. Res. Lett.* **194** 1873
- [190] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2168 *Geophys. Res. Lett.* **195** 1873
- [191] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2169 *Geophys. Res. Lett.* **196** 1873
- [192] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2170 *Geophys. Res. Lett.* **197** 1873
- [193] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2171 *Geophys. Res. Lett.* **198** 1873
- [194] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2172 *Geophys. Res. Lett.* **199** 1873
- [195] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2173 *Geophys. Res. Lett.* **200** 1873
- [196] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2174 *Geophys. Res. Lett.* **201** 1873
- [197] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2175 *Geophys. Res. Lett.* **202** 1873
- [198] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2176 *Geophys. Res. Lett.* **203** 1873
- [199] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2177 *Geophys. Res. Lett.* **204** 1873
- [200] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2178 *Geophys. Res. Lett.* **205** 1873
- [201] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2179 *Geophys. Res. Lett.* **206** 1873
- [202] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2180 *Geophys. Res. Lett.* **207** 1873
- [203] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2181 *Geophys. Res. Lett.* **208** 1873
- [204] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2182 *Geophys. Res. Lett.* **209** 1873
- [205] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2183 *Geophys. Res. Lett.* **210** 1873
- [206] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2184 *Geophys. Res. Lett.* **211** 1873
- [207] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2185 *Geophys. Res. Lett.* **212** 1873
- [208] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2186 *Geophys. Res. Lett.* **213** 1873
- [209] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2187 *Geophys. Res. Lett.* **214** 1873
- [210] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2188 *Geophys. Res. Lett.* **215** 1873
- [211] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2189 *Geophys. Res. Lett.* **216** 1873
- [212] Watanabe T, Yamamoto T, Yamamoto T 2190 *Geophys. Res. Lett.</i*

The simulation study of spherics and red sprite phenomenon produced by lightning^{*}

Wu Ming-Liang^{1,2†} Xu Ji-Yao¹⁾ Ma Rui-Ping¹⁾

1) Lab. for Space weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China

2) Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

(Received 23 January 2006; revised manuscript received 14 March 2006)

Abstract

By using a two-dimensional, time-dependent electromagnetic field model (EM model), the spherics and red sprite phenomenon is studied. The simulation results show that the total electric fields produced by lightning include radiation field and quasi-electrostatic field (QEF). The spherics result from the radiation field, which propagates within the earth-ionosphere waveguide. The optical emissions of the first positive band of N₂ caused by the QEF form the red sprite phenomenon. By means of simulation we have found the red sprite apparently appearing in "V" shape during its evolution and a bright nucleus existing within the structure of the red sprite, while the brightness of the exterior of the red sprite, which is referred to as sprite halo, being relatively weaker.

Keywords : red sprite, spherics, electromagnetic model

PACC : 0350D, 8670J, 9260P, 9460S

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 40225011), the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G2000078407) and the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (Grant No. KZCX3-SW-217).

† E-mail: mnlwu@spaceweather.ac.cn