

# 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟

胡丽琴 黄富祥

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要** 我国下一代静止气象卫星风云四号将首次搭载光学闪电成像仪上天,对闪电和与之相联系的强对流天气进行实时、连续观测。对未来风云四号卫星闪电观测资料的特性进行预先研究,一个重要的途径就是建立光学波段的闪电辐射传输模拟算法,对闪电辐射的物理过程及卫星观测到的闪电辐射光学特征进行模拟研究。结合风云四号卫星闪电成像仪观测的几何和波长参数,在构建简化的闪电光源模型和雷暴云模型的基础上,利用蒙特卡罗随机模拟和光子追踪方法,模拟得到了风云四号卫星闪电成像仪观测到的云顶闪电信号,并对其辐射特征进行了初步研究。结果表明,基于蒙特卡罗方法的闪电辐射传输模拟,可以从理论上揭示卫星光学波段闪电辐射观测与最重要影响参数之间的联系,这将为未来星载闪电资料的应用提供非常有价值的信息。

**关键词** 大气光学;星基闪电观测;闪电辐射传输;蒙特卡罗方法

**中图分类号**           **文献标识码** A           **doi:** 10.3788/AOS201232.1101001

## Monte Carlo Radiative Transfer Modeling of Optical Lightning Signals Observed by Satellite

Hu Liqin Huang Fuxiang

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,

China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081 China)

**Abstract** For the next generation of Chinese geostationary meteorological satellites (FY-4), an optical lightning mapping sensor is planned to observe lightning and storms on a real-time, continual basis. In order to fully benefit from FY-4 lightning observations, it is desirable to establish optical-band radiative transfer simulation algorithm of lightning, and investigate the properties of lightning radiative transfer and the cloud top radiation signals observed by satellite. Combined observational parameters of FY-4 lightning imager, based on the simplified lightning source and thunderstorm models, a Monte Carlo approach is applied for simulating the transfer of lightning produced photons in thunderclouds, and the outputs are designed to address the lightning radiation signatures obtained by FY-4 lightning mapping sensor. The simulated results show that lightning radiative transfer simulation based on Monte Carlo method can theoretically reveal links between satellite optical-band lightning radiation observation and the most important parameters, and provide extremely valuable information for the future application of lightning data observed by satellite.

**Key words** atmospheric optics; satellite based lightning observation; lightning radiative transfer; Monte Carlo approach

**OCIS codes** 010.0280; 010.1310; 010.5620

## 1 引言

自然界中的闪电活动和暴雨、台风、冰雹等强对流天气系统关系密切<sup>[1]</sup>。这些强对流天气具有强度大、破坏力强、水平尺度小、生命史短等特点,长期以来,对强对流天气的监测和预警一直是气象预报中的难点<sup>[2]</sup>。强对流天气事件往往都伴随有强烈而密

集的闪电发生,因而闪电也被人们称作是强对流天气的“示踪器”。鉴于闪电对强对流天气的这种独特的指示作用,以及静止卫星观测平台突出的时空覆盖优势,近年来,发展地球静止轨道卫星闪电成像仪,以实现闪电和强对流天气的实时、连续观测,成为国际上闪电探测的一个重要发展方向<sup>[3~5]</sup>。到

收稿日期: 2012-05-02; 收到修改稿日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(41075020)资助课题。

作者简介: 胡丽琴(1972—),女,博士,副研究员,主要从事短波辐射卫星遥感方面的研究。E-mail: hulq@cma.gov.cn

目前为止,全球还没有静止轨道卫星闪电成像仪发射上天的先例,但已有光学瞬态探测器(OTD)和闪电成像传感器(LIS)等光学闪电成像仪在低轨道卫星平台上成功运行。相比于低轨道卫星闪电成像仪,地球静止轨道卫星闪电成像仪可以在整个可见的地球圆盘范围内对闪电和与之相关的雷暴云进行连续观测,因此被认为是最有效的闪电观测手段<sup>[6,7]</sup>。目前,除了美国和欧洲计划在其下一代静止气象卫星(分别为 GOES-R 卫星和 MTG 卫星)上搭载闪电成像仪外,我国正在研制的新一代地球静止轨道气象卫星风云四号(FY-4 卫星),也计划于 2015 年前后携带闪电成像仪发射上天,成为计划中的全球第一批地球静止轨道卫星闪电成像仪之一<sup>[8]</sup>。

和 LIS 等光学闪电成像仪的仪器设计和观测原理类似,风云四号卫星闪电成像仪采用光学成像的方式,利用闪电放射能量峰值所在的近红外 777.4 nm 波段,通过捕捉由云体散射的上行辐射信号,来实现闪电探测<sup>[9]</sup>。在未来风云四号卫星上天后,如何更好地解释和应用闪电观测资料,强烈依赖于人们对闪电在大气和云中的辐射传输过程以及闪电成像仪观测到的云顶闪电信号辐射特征的认识。为此,需要建立光学波段闪电辐射传输计算方法,使之能够模拟计算风云四号卫星闪电成像仪观测到的闪电辐射被云粒子散射照亮的云顶辐射信号,并根据模拟结果,研究在不同闪电光源和雷暴云特性下由闪电光源引起的云顶辐射分布和变化特征,从而为未来风云四号闪电观测资料的分析和应用提供理论依据。

由于闪电光源不同于太阳等自然平行光源,是非稳态光源,具有瞬时、形状不规则等特点。因此,在大气科学领域,诸多针对太阳和地球辐射在云中的辐射传输问题的求解方法,并不适用于闪电辐射传输的理论研究。目前,只有蒙特卡罗(Monte Carlo)方法<sup>[5,10~12]</sup>和类似核扩散技术的扩散模型<sup>[13]</sup>等较少的理论工具可用于云中的闪电辐射传输研究。其中 Monte Carlo 方法是一种随机模拟方法,其涉及到的应用领域非常广泛<sup>[14~19]</sup>。在应用到光在介质中的辐射传输问题时, Monte Carlo 方法并不求解辐射传输方程,而是在构造概率模型的基础上对辐射传输的实际过程进行直接模拟<sup>[20~22]</sup>。国际上已有的一些涉及闪电辐射传输的研究工作大多采用 Monte Carlo 方法作为理论模拟工具。Thomson 等<sup>[10]</sup>在 1982 年率先利用 Monte Carlo 方法来模拟类似闪电这样的瞬时光源发出的光子在各

种理想形状云(包括立方体云、球状云和圆柱体云)中的传输情况。这之后,随着卫星闪电观测的出现和发展,以 Monte Carlo 方法为主的闪电辐射传输理论技术进一步得到应用,一些针对不同卫星平台和闪电探测仪器的闪电辐射传输研究工作得到开展。例如,Light 等<sup>[11]</sup>将 Monte Carlo 三维辐射传输模拟应用到了对 FORTE 卫星观测的闪电光学波形信号的分析中,其 Monte Carlo 模式的输出量被设计为可以直接和 FORTE 的闪电观测数据相比较的量。Dyudina 等<sup>[12]</sup>也采用最基本的 Monte Carlo 方法,对由 Galileo 轨道卫星观测到的木星上的闪电进行了模拟。较近的一项工作是 Finke 等<sup>[5]</sup>在针对欧洲下一代静止气象卫星 MTG 上的光学闪电成像观测(仪器名称为 Lightning Imaging,简称 LI)所做的闪电辐射传输模拟研究工作。Finke 等<sup>[5]</sup>同样采用 Monte Carlo 方法,对闪电在云中的散射过程进行模拟,目的是获取闪电造成的云顶辐射分布形式。除了 Monte Carlo 方法之外,另一种用于闪电辐射传输研究的理论工具是 Koshak 等<sup>[13]</sup>提出来的扩散模型,它基于玻尔兹曼传输理论和扩散近似方法,模拟闪电产生的光子在光密雷暴云介质中的传输。这个模型从概念上来说,就是将雷暴云视为核反应堆,将闪电发出的光子视为中子,采用针对瞬态核反应堆的分析方法和中子传输的理论技术,来处理闪电在雷暴云中的传输问题,得到由闪电引起的能量密度分布情况以及闪电脉冲随时间的变化情况。利用该扩散模型,Koshak 等<sup>[13]</sup>研究了闪电在近红外(0.7774  $\mu\text{m}$ )波段引起的云顶脉冲特征。就国内的相关领域而言,目前鲜见有星载闪电观测信号的辐射传输模拟与分析结果发表出来。目前国内与卫星闪电探测有关的研究工作,主要是利用 OTD 和 LIS 观测资料考察不同区域闪电的分布、活动特征<sup>[23~26]</sup>及其对天气要素、天气系统和气候变化的响应<sup>[27~32]</sup>等方面的应用研究。此外,也有较少的一些工作从 LIS 观测资料和雷暴云起电放电模式入手,对星载闪电成像仪所获取的闪电光辐射能分布特征进行了分析<sup>[33]</sup>。这些工作的研究成果对未来风云四号卫星闪电观测资料的分析和应用非常具有参考意义。但从闪电辐射传输的物理机制出发,对其辐射过程进行理论模拟,并结合星载闪电探测仪器的特性获取卫星观测到的由闪电造成的云顶辐射信息,这方面的研究工作在国内尚属空白。因此,在风云四号卫星发射上天之前,发展和建立闪电辐射传输计算方法,以便对未来闪电成像仪观测信号的辐射特性

进行预先研究,是一项十分紧迫且极具科学和实践意义的工作。同时,建立闪电辐射传输算法,研究闪电光源和雷暴云特性与闪电引起的云顶辐射特征之间的关系,为未来风云四号闪电观测资料的分析和应用提供理论依据。这也是本文工作的出发点。

基于 Monte Carlo 方法,在构建简化的闪电光源模型和雷暴云模型的基础上,结合风云四号卫星闪电成像仪观测的几何和波长特征,建立了光学波段闪电辐射传输计算方法,使之能够模拟计算风云四号卫星闪电成像仪观测到的闪电辐射被云粒子散射照亮的云顶辐射信号。根据模拟结果,对由闪电光源引起的云顶辐射信号进行了研究和分析。

## 2 计算方法

### 2.1 算法原理简介

借鉴以太阳光作为平行稳态自然光源的三维 Monte Carlo 辐射传输算法,来形成对非稳态闪电光源发出的光子在雷暴云中的多次散射过程的基本追踪算法,并以此为核心,发展了一套计算程序,模拟闪电在光学波段的辐射传输过程,并输出卫星观测到的云顶闪电辐射能量。

Monte Carlo 方法本质上是一种采用统计抽样理论近似地求解物理或数学问题的方法。它的基本思想是:首先建立与待解问题相似或相关联的概率模型,利用这种相似性把概率模型的某些特征量与待求解问题的解联系起来;然后对概率模型进行随机模拟或统计抽样,用所得样本得到这些特征量的估计值,也即给出问题的近似解,而解的精确度可用估计值的标准误差来表示。

在应用 Monte Carlo 方法模拟闪电的辐射传输过程时,模拟程序从闪电源处连续地释放光子,并且在雷暴云介质中逐个跟踪这些光子的运动。由闪电源发出的光子被赋予初始能量权重值 1,它在雷暴云介质中将被散射和吸收。Monte Carlo 方法将光子的散射过程看成是光子与雷暴云介质的碰撞过程,并根据散射过程构造了两个几率函数。第一个几率函数与光子行进的距离有关。光子与介质碰撞之前走了一定距离,设光子传输了这段距离而与介质没有产生相互作用的几率,等于经过这段距离并消光后的光子能量与之前能量之比。第二个几率函数与光子行进的方向有关。光子与介质碰撞后将发生散射改变传输方向。该方向由与散射相函数有关的几率分布所决定。两次碰撞之间光子在雷暴云中的传输距离与云滴衰减系数有关。在碰撞点上,光

子可能被散射或被吸收。如果被吸收, Monte Carlo 方法根据单次散射反照率调整该光子的能量权重值,然后继续跟踪这同一光子;如果被散射,光子将改变传输方向,新的传输方向由雷暴云粒子的散射相函数确定。总之,离开碰撞点之后,光子在新的方向上以新的能量权重继续前进。过程一直重复下去,直到光子的能量权重减小到无意义,或者它完全离开所考虑的区域,或者它到达探测器为止。当光子到达探测器时,根据其出射的方向,统计出射能量。由此结束对该光子行为的跟踪,并从闪电源位置发射一个新的光子,重复同样的跟踪过程。当所用的光子达到一定数目,达到预期输出点(这里指卫星闪电成像仪探测器的观测方向)的光子能量满足事先设定的精度时,结束此次随机模拟过程,并统计最终的云顶出射能量分布。根据上述过程,可以模拟得到卫星闪电成像仪观测到的由闪电光源发出并经雷暴云的多次散射后到达云顶的光学辐射信号。

### 2.2 算法的输入输出参数

#### 2.2.1 输入参数

建成的闪电辐射传输计算模式需要定义以下输入参数:

##### 1) 云的几何形态和几何尺度

模式可以在三维格点单元的形式下定义任意形状和尺度的云。在计算中,为简单起见,假定云为理想的平面平行云,其水平尺度为 72 km,垂直尺度为 10 km,符合常见的雷暴云在水平和垂直方向的伸展尺度。为考察风云四号卫星闪电成像仪观测模式下的闪电辐射信号,计算中格点单元的水平格距取为 8 km,与风云四号卫星闪电成像仪观测像素的空间分辨率一致。

##### 2) 云的散射参数

包括云的光学厚度、单次散射反照率和不对称因子。在计算中,假定云粒子为均质球状水滴,其散射参数在云体内分布均匀,取云总光学厚度为 200,云粒子有效半径为 10  $\mu\text{m}$ 。在此条件下,结合云的几何尺度得到云的容积减弱系数;同时结合风云四号闪电成像仪的观测波长,由米散射理论计算得到云滴的单次散射反照率和不对称因子,进而得到 Henyey-Greenstein 形式的散射相函数,其表达式为

$$p(\cos \Theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \Theta)^{3/2}}, \quad (1)$$

式中  $\Theta$  为散射角,  $g$  为不对称因子。

##### 3) 闪电光源的几何结构及其相对于云的位置

实际闪电通常具有复杂的枝状几何结构,很难

用解析函数去表示。但对于对流发展深厚、光学厚度足够大的雷暴云来说,闪电辐射经过在云中的多次散射到达云顶时,其呈现的辐射分布形态将会模糊闪电源在几何结构上的细节情况。因此,模式中对闪电光源的几何结构特征作了简化处理,采用点光源表示最简化的闪电形式,或以若干点光源的组合来近似表示实际闪电通常具有的线状或枝状几何结构。闪电光源相对于云的位置决定了光子在被云粒子多次散射后到达探测器所要经过的时间和距离,因而也是模式中的一个重要输入参数。模式通过定义组成闪电光源的单个点光源或系列点光源的位置,来确定整个闪电光源相对于云的位置,同时确定在系列点光源情形下的闪电通道长度。在计算实例中,考虑闪电光源为雷暴云内距离云顶不同深度的点光源以及由这些点光源组成的组合光源(垂直线光源)。

4) 闪电光源的发射强度及其随时间的变化特征

模式把在云顶收集到的探测器观测方向的光子数视为与卫星闪电成像仪观测到的云顶闪电辐射强度直接相匹配的量,于是,相应的闪电光源发射出的光子总数即可表示闪电光源的发射强度(在考虑闪电光源为若干点光源的组合时,其发射强度即为各点光源发射的光子数的总和)。同时,由于 Monte Carlo 算法的模拟精度与所用的光子数目有关,因此,模式中闪电光源发射的光子数以及探测器观测方向收集到的光子数需满足事先设定的精度要求。

实际闪电以脉冲的形式进行能量释放,因此,来自闪电光源的发射能量是随时间变化的。模式中可以通过定义闪电光源发射强度随时间的变化函数来描述这一点。在计算中,只关注闪电能量全部传播到云顶时的辐射分布特性,所以假定闪电源为各向同性发射的瞬态光源,其初始能量以类似  $\delta$  函数的形式瞬间释放。

### 2.2.2 输出参数

模式可以在计算区域的任意位置针对任意角度方向收集被雷暴云粒子散射后的光子数(在考虑闪电光源为若干点光源的组合时,收集的光子数为各点光源传输到所关注位置和方向的光子数的总和),作为表征局地闪电辐射能量的输出参量。由于本文目的在于考察风云四号卫星闪电成像仪观测模式下的闪电辐射信号,因此,模式中将输出参量设置为云顶每个像素在卫星观测方向单位立体角内的光子数目(且归一化到闪电光源发射的光子总数),以便直

接与卫星闪电成像仪观测到的辐亮度数据匹配。

### 2.3 模拟结果的精度确定

由于 Monte Carlo 算法的模拟结果具有统计性质,因此其误差可以事先被估计出来。简单的统计理论表明, Monte Carlo 计算结果的相对标准偏差可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_0 - N_c}{N_0 N_c}}, \quad (2)$$

式中  $N_0$  为由模式发射的光子总数,  $N_c$  为输出点收集到的光子总数。在  $N_c \leq N_0$  的情况下, Monte Carlo 计算结果的相对标准偏差可表示为

$$\sigma = 1/\sqrt{N_c}. \quad (3)$$

因此,可以根据预期的精度来设置模式需发射的光子数目。由于 Monte Carlo 计算结果的误差与统计次数(收集到的光子数目)的平方根成反比,通常情况下,为了获得可靠的结果,需要对大量光子的随机过程进行计算,整个模拟需要很长的时间。

## 3 模拟结果

利用建成的计算模式,初步考察了风云四号卫星闪电成像仪观测到的由闪电光源发出并经雷暴云多次散射后到达云顶的辐射能量分布特征。计算中,考虑闪电光源为位于雷暴云中不同深度的点状闪电光源(点源距云顶的距离分别为 9、7、5、3、1 km)以及由这些点源组成的组合光源(包括垂直线状闪电光源)。其中,垂直线状闪电光源的通道长度取为 4 km,中心位置分别位于距离云顶 7、5、3 km 处。同时,为了探求闪电成像仪覆盖范围内的卫星观测角度对云顶闪电辐射观测值的影响,在计算中选取了三种代表性的观测天顶角度( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ ),分别对应星下点、中等观测角度和较边缘的观测角度的情况。模式的输出结果以归一化到闪电光源发射强度的云顶闪电辐射强度表示。

### 3.1 云顶辐射强度的水平分布

图 1 为模拟得到的风云四号卫星闪电成像仪观测到的云顶闪电辐射图像[图 1(a)]与 LIS/热带降雨测量卫星(TRMM)实际观测到的云顶闪电辐射图像[图 1(b)]的对比情况。其中图 1(a)为 Monte Carlo 计算结果的灰度图像显示,空间分辨率为 8 km;图中圆圈标注的是相应的点状闪电光源位置。图 1(b)是 LIS 观测到的两个单独闪电的图像,空间分辨率为 3~6 km,并经过投影处理(将云顶辐射亮度分布投影到地球水平面上)。可以看出,利用 Monte Carlo 方法对典型的点状闪电光源进行模

拟,可以得到与实际观测非常类似的云顶辐射强度分布形式,即云顶辐射强度以闪电光源所在水平位置为中心向周围迅速衰减,表现出闪电光源所在像素被明显照亮,与之直接相邻的像素的亮度较弱,而

附近其他像素被照亮的程度更要微弱得多。由于风云四号卫星闪电成像仪的空间分辨率要明显低于LIS的空间分辨率,因此,与图1(b)相比,图1(a)中闪电光源强度向周围衰减的幅度要更大一些。

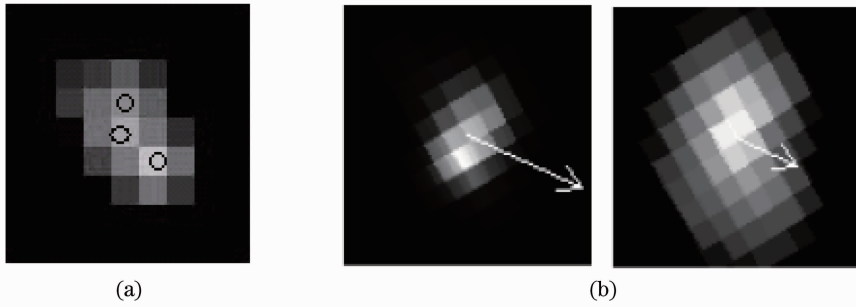


图1 (a) Monte Carlo 模拟得到的风云四号卫星闪电成像仪云顶闪电辐射图像; (b) LIS/TRMM 实际观测到的云顶闪电辐射图像

Fig. 1 (a) Radiation image of Monte Carlo simulation for FY-4 lightning radiation signal on the top surface of the cloud; (b) individual flashes observed by LIS/TRMM

为了考察闪电光源强度向周围的衰减在数量级上的变化,计算了与闪电光源直接相邻的像素的云顶辐射强度均值( $\bar{I}_{ns}$ ),并进而求取这个均值与闪电光源所在像素的云顶辐射强度值( $I_s$ )的比值( $\bar{I}_{ns}/I_s$ )。表1给出了简单的点状闪电光源和垂直线状闪电光源情况下在观测天顶角为 $0^\circ$ 时的 $\bar{I}_{ns}/I_s$ 计算结果。表中的 $D$ 表示点状闪电光源或垂直线状闪电光源中心距离云顶的距离,单位为km。可以看出,发生闪电的像素与周围直接相邻的像素相比,其辐射强度值平均相差两个量级以上。当闪电光源中心的垂直位置越接近云顶时,这种差别越大,如对于距云顶1 km的点状闪电光源和中心距云顶3 km的垂直线状闪电光源来说,发生闪电的像素和周围与之直接相邻的像素的辐射强度差别已达到4个量级。当观测天顶角增大到 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,相应的 $\bar{I}_{ns}/I_s$ 计算结果也与表1中数据的数量级相当。

光源和垂直线状闪电光源情况下的几组云顶闪电辐射强度分布图像。图2(a)、(b)、(c)三组图像分别对应点状闪电光源情况下观测天顶角为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 的情况,图2(d)、(e)、(f)三组图像分别对应垂直线状闪电光源情况下观测天顶角为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 的情况。每组图像从左至右依次对应闪电光源中心距离云顶由远到近(对于点状闪电光源,闪电光源中心距云顶的距离依次为9、7、5、3、1 km;对于垂直线状闪电光源,闪电光源中心距云顶的距离依次为7、5、3 km)时的云顶辐射强度结果。图像中每个像素的水平尺度为8 km,与风云四号卫星闪电成像仪的空间分辨率一致。为了更好地显示闪电光源附近像素相对微弱的辐射强度,对图像作了对数增强处理,因此图中色标表示的灰度值对应云顶闪电辐射强度(已归一化到闪电光源发射强度)的常用对数值。从图2反映的云顶辐射强度的分布情况可以看出,对于不同的观测角度和闪电光源形状,卫星观测到的云顶辐射强度的水平分布形式基本类似,但云顶被闪电照亮的像素亮度与闪电光源离云顶的垂直距离密切相关。因此,通过模拟结果来发掘和建立云顶辐射强度与闪电光源距云顶距离之间的量化关系,为从卫星闪电观测资料中分析和提取闪电光源的发生位置提供了可能。

表1 点状闪电光源和垂直线状闪电光源情况下的 $\bar{I}_{ns}/I_s$  计算结果

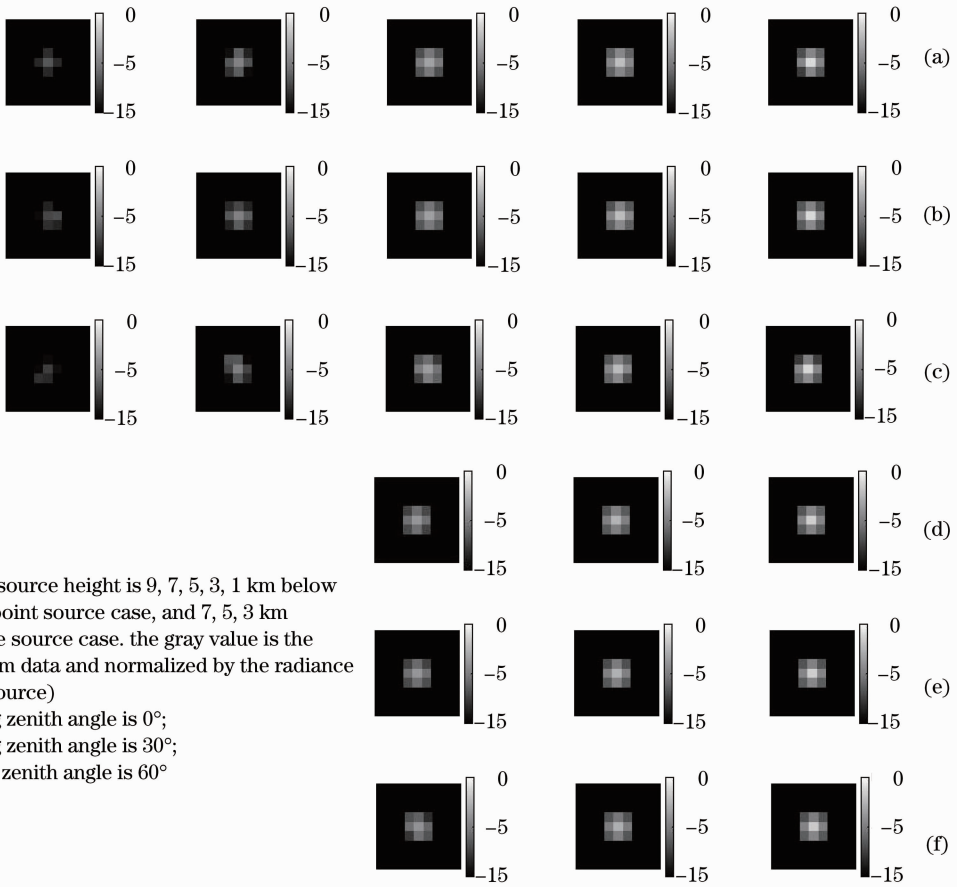
Table 1 Calculation results of  $\bar{I}_{ns}/I_s$  in the case of point source and the vertical line source

$D$ /km	$\bar{I}_{ns}/I_s$ (point source)	$\bar{I}_{ns}/I_s$ (vertical line source)
9	$2.048 \times 10^{-2}$	
7	$2.214 \times 10^{-2}$	$1.459 \times 10^{-2}$
5	$1.431 \times 10^{-2}$	$4.472 \times 10^{-3}$
3	$3.856 \times 10^{-3}$	$6.184 \times 10^{-4}$
1	$2.902 \times 10^{-4}$	

### 3.2 闪电光源在云中的位置对云顶辐射强度的影响

图2为 Monte Carlo 算法模拟得到的点状闪电

据此,重点分析了闪电光源所在像素的云顶辐射强度随闪电光源在云中位置的变化情况(见图3)。图3中,横坐标为点状闪电光源或垂直线状闪电光源中心到云顶的距离;纵坐标为闪电光源所在像素的云顶辐射强度的对数值(归一化到闪电光



(left to right: the source height is 9, 7, 5, 3, 1 km below cloud top in the point source case, and 7, 5, 3 km in the vertical line source case. the gray value is the common logarithm data and normalized by the radiance of the lightning source)  
 (a), (d) observing zenith angle is 0°;  
 (b), (e) observing zenith angle is 30°;  
 (c), (f) observing zenith angle is 60°

图 2 Monte Carlo 模拟得到的(a), (b), (c)点状闪电光源和(d), (e), (f)垂直线状闪电光源情况下的云顶闪电辐射强度  
 Fig. 2 Radiation intensity of Monte Carlo simulation for lightning source on the top surface of the cloud in the case of (a), (b), (c) point source and (d), (e), (f) the vertical line source

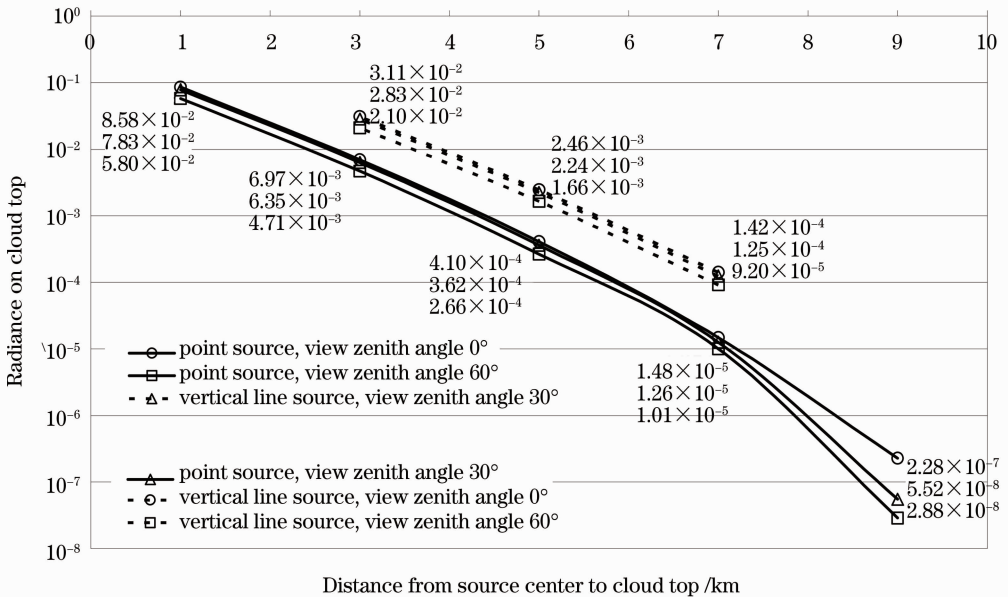


图 3 闪电光源所在像素的云顶辐射强度(归一化到闪电光源的发射强度)

Fig. 3 Radiation intensity of the pixel where the lightning source locates (normalized to the emission strength of the source)

源的发射强度);实线和虚线分别对应点状和线状闪电光源的情况;每一组实线或虚线中,圆圈、三角和方形标志分别代表观测天顶角为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 时的情况,标志旁标注的数字为相应的辐射强度值。可以看出,对于点状闪电光源,随着闪电光源距云顶的距离由1 km增至7 km,闪电光源所在像素的云顶辐射强度在对数坐标下呈线性衰减的趋势;当闪电光源距云顶更远时,衰减的速率明显增大,尤其是观测天顶角较大时。对于垂直线状闪电光源,目前的计算结果限于闪电光源中心距云顶3~7 km的情况,但也可以发现闪电光源中心位置与闪电光源所在像素的云顶辐射强度在对数坐标下近似的线性对应。

### 3.3 观测角度对云顶辐射强度的影响

在此,同样重点关注有闪电发生的像素的辐射强度受观测角度的影响。对比图3中不同圆点对应的标注数据,可以看出闪电光源所在像素的云顶辐射强度随观测天顶角的变化情况。总的来说,对于同样发射强度的闪电光源,其辐射到云顶的能量强度会随着观测天顶角的增大而减小,且这种变化幅度在闪电光源中心距云顶较远时更为显著。以点状闪电光源的情形为例,如果将观测天顶角为 $0^\circ$ 时的辐射强度值作为参照值,那么,随着观测天顶角增大到 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ ,对于距云顶1 km的点状闪电光源来说,其云顶辐射强度值分别减少了9%和32%;对于距云顶5 km的点状闪电光源,其云顶辐射强度值分别减少了12%和35%;对于距云顶9 km的点状闪电光源,其云顶辐射强度值分别减少了76%和87%。需要指出的是,目前计算结果尚未考虑与观测角度相关联的像素的形变程度,因此,上述分析数据仅表明在忽略像素形变情况下单纯由观测角度引起的辐射强度变化。

## 4 结 论

基于Monte Carlo随机模拟和光子追踪技术,结合风云四号卫星闪电成像仪的观测几何和波长特征,构建了一个光学波段闪电辐射传输计算方法,能够模拟计算风云四号卫星闪电成像仪观测到的闪电辐射被云粒子散射照亮的云顶辐射信号。这对未来风云四号闪电观测资料的分析和应用极具科学意义。

在建成的闪电辐射传输计算模式的基础上,针对理想化的平面平行雷暴云,模拟得到了由距离云顶不同深度的点状闪电光源和垂直线状闪电光源造成的云顶闪电辐射强度信号。计算结果表明,基于

风云四号卫星闪电成像仪的像素水平分辨率,在典型的点状闪电光源和垂直线状闪电光源的情况下,云顶仅有少数像素被闪电辐射照亮,照亮的范围及强度与闪电光源在云中的垂直位置密切相关,且随着闪电光源中心距云顶的距离由近及远,闪电光源所在像素的云顶辐射强度在对数坐标下呈线性衰减的趋势;发生闪电的像素与周围直接相邻的像素相比,其辐射强度值平均相差两个量级以上;对于同样发射强度的闪电光源,其辐射到云顶的能量强度会随着观测天顶角的增大而减小,且这种变化幅度在闪电光源中心距云顶较远时更为显著。尽管上述分析结果是基于简化的闪电光源模型和雷暴云模型,但仍可以反映出影响云顶闪电辐射的最重要的参数。

建成的闪电辐射传输模式并不限于计算严重简化了的闪电光源和雷暴云的情况,还可以针对具有一定几何结构(以若干点光源的组合来表示)以及发射强度随时间变化的电光源,和具有非均匀几何和微物理特性分布的雷暴云场进行闪电辐射传输计算模拟。在今后的工作中,需要考虑更细致的闪电光源和雷暴云的分布情况以及风云四号卫星闪电成像仪观测像素的形变情况,以使得模拟结果更符合实际的物理过程。在此基础上,通过研究电光源和雷暴云的不同特征对观测到的闪电辐射的影响,为星载闪电资料在强对流天气分析方面的应用提供理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Hongbin, Lü Daren. Observations of lightning from space: a review [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **59**(3): 377~383  
陈洪滨, 吕达仁. 从空间探测闪电的综述 [J]. *气象学报*, 2001, **59**(3): 377~383
- 2 J. M. Medlin, P. J. Croft. A preliminary investigation and diagnosis of weak shear summertime convective initiation for extreme southwest Alabama [J]. *Wea. Forecasting*, 1998, **13**(3): 717~728
- 3 H. J. Christian, R. J. Blakeslec, S. T. Goodman. The detection of lightning from geostationary orbit [J]. *J. Geo. Res.*, 1989, **94**(D11): 13329~13337
- 4 Goddard Space Flight Center. Geostationary Lightning Mapper (GLM) Performance and Operational Requirements Document [R]. NASA-GSFC, 2005, Document Number 417-R-GLMPORD-0057
- 5 U. Finke. Characterising the Lightning Source for the MTG Lightning Imager Mission-Final Report [R]. Universität Hannover, 2006. 1~46
- 6 Gao Song. Lightning detect on satellite [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, **7**(9): 2032~2036  
高松. 基于静止气象卫星平台的闪电探测 [J]. *科学技术与工程*, 2007, **7**(9): 2032~2036
- 7 Han Xinzhi. Discussion on design features of lightning mapper for geostationary satellite [J]. *Infrared*, 2011, **32**(3): 4~9

- 韩心志. 静止卫星闪电测绘仪设计特点研讨 [J]. 红外, 2011, **32**(3): 4~9
- 8 National Satellite Meteorological Center. The Pre-Research Report of Application Requirements for FY-4 Geostationary Meteorological Satellites [R]. The Technique Report of National Satellite Meteorological Center, 2003  
国家卫星气象中心. 风云四号静止气象卫星应用需求预研报告 [R]. 国家卫星气象中心技术报告, 2003
- 9 Huang Fuxiang. The mission and challenge of the FY-4 lightning imager [J]. *Meteorological Technology*, 2007, **35**(Z1): 35~42  
黄富祥. FY-4 卫星闪电成像仪的使命和挑战 [J]. 气象科技, 2007, **35**(Z1): 35~42
- 10 L. W. Thomson, E. P. Krider. The effects of clouds on the light produced by lightning [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**(9): 2051~2065
- 11 T. E. Light, D. M. Suszcynsky, M. W. Kirkland *et al.*. Simulations of lightning optical waveforms as seen through clouds by satellites [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D15): 17103~17114
- 12 U. A. Dyudina, A. P. Ingersoll, A. R. Vasavada *et al.*. Monte Carlo radiative transfer modeling of lightning observed in galileo images of jupiter [J]. *J. Icarus*, 2002, **160**(2): 336~349
- 13 W. J. Koshak, R. J. Solakiewicz, D. D. Phanord *et al.*. Diffusion model for lightning radiative transfer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D7): 14361~14371
- 14 Zhang Lin, Li Xiaoxia, Qi Shengwen. Monte Carlo simulation of the focused beam propagation in a semi-infinite bio-tissue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0417002  
张琳, 李晓霞, 祁胜文. 聚焦光束在半无限大生物组织内传播的 Monte Carlo 模拟 [J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0417002
- 15 Hong Mingjian, Wen Quan, Wen Zhiyu. New near infrared wavelength selection algorithm based on Monte-Carlo method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3637~3642  
洪明坚, 温泉, 温志渝. 一种基于蒙特卡罗方法的近红外波长选择算法 [J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3637~3642
- 16 Xia Hui, Lin Xu, Xiao Yuanyuan *et al.*. Monte-Carlo simulation of photon's transport properties in highly scattering media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3019~3024  
夏辉, 林旭, 肖元元等. 光子在高散射介质中传输特性的蒙特卡罗模拟 [J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3019~3024
- 17 Ye Jingzhai, Chen Hui. Time-resolved Monte Carlo simulation for optical properties of tissues [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071701  
叶静斋, 陈辉. 组织光学特性的时间分辨蒙特卡罗仿真研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 071701
- 18 Huang Chao, Wang Zhiqiang, Zhang Bin *et al.*. Monte Carlo simulation of the point spread function of CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2703~2709  
黄超, 王治强, 张斌等. 电荷耦合器件点扩展函数的蒙特卡罗模拟 [J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2703~2709
- 19 Weiwei Cai, Lin Ma. Improved Monte Carlo model for multiple scattering calculations [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(1): 012901
- 20 G. Marchuk, G. Mkhailov, M. Nazaraliev *et al.*. The Monte Carlo Methods in Atmospheric Optics [M]. London: Springer-Verlag, 1980
- 21 Liu Changsheng, Liu Wenbao. The Atmospheric Radiation [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1990  
刘长盛, 刘文保. 大气辐射学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1990
- 22 Shi Guangyu. The Atmospheric Radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007  
石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 23 Qie Xiushu, R. Toumi. Lightning activities on Qinghai-Xizang plateau as observed by satellite-based lightning imaging sensor [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(3): 289~295  
郗秀书, Ralf Toumi. 卫星观测到的青藏高原雷电活动特征 [J]. 高原气象, 2003, **22**(3): 289~295
- 24 Qie Xiushu, Zhou Yunjun, Yuan Tie. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2003, **46**(6): 743~750  
郗秀书, 周筠珺, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异 [J]. 地球物理学报, 2003, **46**(6): 743~750
- 25 Qie Xiushu, Yuan Tie, Xie Yiran *et al.*. Spatial and temporal distribution of lightning activities over the Tibetan plateau [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2004, **47**(6): 997~1002  
郗秀书, 袁铁, 谢屹然等. 青藏高原闪电活动的时空分布特征 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(6): 997~1002
- 26 Wang Yigeng, Chen Weimin, Liu Jie. Temporal and spatial distributions of lightning activity in South of China from TRMM satellite observation [J]. *J. Tropical Meteorology*, 2009, **25**(2): 227~233  
王义耕, 陈渭民, 刘洁. TRMM 卫星观测到的华南地区的闪电时空分布特征 [J]. 热带气象学报, 2009, **25**(2): 227~233
- 27 Zheng Yuanyuan, Fu Yunfei, Liu Yong *et al.*. Heavy rainfall and lightning activities in a cold-front cyclone happened in Huai River derived from TRMM and LIS observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **62**(6): 790~802  
郑媛媛, 傅云飞, 刘勇等. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究 [J]. 气象学报, 2004, **62**(6): 790~802
- 28 Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie *et al.*. Study on the characteristics of lightning activity and its relationship with precipitation structure in a hailstorm [J]. *Science in China Series D*, 2007, **37**(1): 123~132  
冯桂力, 郗秀书, 袁铁等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究 [J]. 中国科学 D 辑, 2007, **37**(1): 123~132
- 29 Pan Lunxiang, Qie Xiushu. Lightning activity in super typhoon Sepat (0709) [J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2010, **34**(6): 1088~1098  
潘伦湘, 郗秀书. 0709 号超强台风圣帕 (Sepat) 的闪电活动特征 [J]. 大气科学, 2010, **34**(6): 1088~1098
- 30 Yuan Tie, Qie Xiushu. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2010, **34**(1): 58~70  
袁铁, 郗秀书. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. 大气科学, 2010, **34**(1): 58~70
- 31 Yuan Tie, Qie Xiushu. Seasonal variation of lightning activities and related meteorological factors over the central Qinghai-Xizang plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **63**(1): 123~127  
袁铁, 郗秀书. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析 [J]. 气象学报, 2005, **63**(1): 123~127
- 32 Yuan Tie, Tao Shanchang, Zhu Baoyou *et al.*. Global lightning activities in response to temperature change [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2005, **50**(15): 1643~1647  
马明, 陶善昌, 祝宝友等. 全球闪电活动对气温变化的响应 [J]. 科学通报, 2005, **50**(15): 1643~1647
- 33 Qie Xiushu, Xie Yiran, R. Toumi. Frequency distribution of flash optical radiance [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(4): 476~480  
郗秀书, 谢屹然, Ralf Toumi. 闪电的光辐射能分布特征 [J]. 高原气象, 2004, **23**(4): 476~480