

观测几何对卫星光学波段闪电辐射信号的影响研究

胡丽琴¹ 赵海英² 马严枝²

(¹ 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)
² 山西省气象台, 山西 太原 030006

摘要 我国新一代静止气象卫星风云四号(FY-4)计划首次搭载闪电成像仪,它将通过光学成像的方式,利用闪电放射能量峰值所在的近红外波段,对由闪电光源发出并经云体辐射到云顶的闪电信号进行实时、连续探测。在预先研究中,仪器的观测几何模式如何定量影响接收到的云顶闪电信号是一项重要而亟待关注的研究内容。利用蒙特卡罗算法,对风云四号卫星闪电成像仪观测到的由闪电引起的云顶辐亮度进行了模拟,着重考察了卫星观测角度、观测像元形变大小以及闪电在像元中的水平相对位置等观测几何因子对观测到的云顶辐亮度的定量影响,得到了云顶辐亮度归一化比值与卫星观测天顶角之间的定量关系,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; 闪电信号; 观测几何; 云顶辐亮度

中图分类号 TP79 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s113001

Impact of Observation Geometry on Lightning Optical Radiance Observed by Satellite

Hu Liqin¹ Zhao Haiying² Ma Yanzhi²

(¹ Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)
² Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract For the next generation of Chinese geostationary meteorological satellites (FY-4) an optical lightning mapping sensor is planned to observe lightning on a real-time, continual basis. The measurement will detect the radiance discharged by lightning and transferred up to the cloud top at a near-infrared band. One important and urgent attention of the pre-study is how the instrument observation geometry quantitatively impact the received signals. A Monte Carlo approach is applied for simulating the transfer of lightning and the lightning radiation signatures which will be obtained by FY-4 lightning mapping sensor. The study focuses on the quantitative relationships between the observed lightning radiance and several key observation geometry parameters, such as satellite observation angle, pixel size and the horizontal location of lightning in the pixel. This will provide extremely valuable informations for the future application of lightning data observed by FY-4 satellite.

Key words atmospheric optics; lightning radiation signatures; observation geometry; cloud top radiance

OCIS codes 010.0010; 010.0280; 010.1310; 010.5620

1 引言

闪电观测在全球观测体系中具有非常重要的科学意义和应用价值,它可以揭示强对流天气系统的关键信息^[1],指征区域气候和全球气候变化^[2-4],为大气化学研究提供关键输入量^[5-6],以及在雷电防护、森林雷击火灾评估等方面发挥重要作用^[7]。目前对闪电的观测手段主要有地基观测和卫星观测两

种。地基观测方式能够准确捕捉到覆盖范围以内的闪电活动^[8-10],但其局限性在于无法获取大尺度范围的闪电特征^[11]。与之相比,卫星观测闪电具有独特的时空覆盖优势。国际上已有光学瞬间探测器(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^[7,12]。近年来,发展地球静止轨道卫星闪电成像仪被认为是最有效的闪

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(41075020)

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

电观测手段,它的优势在于可以在整个可见的地球圆盘范围内对各种闪电进行实时、连续观测^[13]。作为规划中的全球第一批地球静止轨道卫星闪电成像仪之一,我国首个星载光学闪电成像仪计划于2015年前后搭载风云四号(FY-4)卫星上天^[14]。

风云四号卫星闪电成像仪采用 CCD 面阵成像的方式,利用闪电放射能量峰值所在的近红外 777.4 nm 波段^[15],通过捕捉由闪电发出并经过大气和云的传输后到达卫星的上行辐射能量信号,来实现闪电探测。为了能够成功提取闪电信号,需要对由星上下传的初始闪电信号进行阈值判断和虚假信号滤除^[16-17],与闪电阈值相关的一项重要研究内容是通过闪电在大气和云中的辐射传输过程进行理论模拟,来探求未来风云四号卫星的闪电观测将如何受到仪器观测几何参数的影响,从而为闪电阈值的适应性调整提供参考依据。目前为止,适用于闪电辐射传输模拟计算的理论工具不多,其中蒙特卡罗(Monte Carlo)方法是相关研究中较常用的一种方法,它结合构造概率模型和随机模拟技术来对闪电辐射的物理过程进行直接模拟,获取相应的解。国际上,Thomson 等^[18]率先利用 Monte Carlo 方法模拟了可见光及近红外波段由闪电发出的光子在各种理想形状的云体内的传输情况。Light 等^[19]针对搭载于 FORTE 卫星平台的闪电光学传感器,建立了基于 Monte Carlo 方法的模拟工具,用于分析 FORTE 闪电光学波形信号的特征。Dyudina 等^[20]在有关 Galileo 轨道卫星木星闪电观测的研究工作中,也采用了典型的 Monte Carlo 方法。Finke^[13]发展了一个基于 Monte Carlo 方法的闪电辐射传输计算模式,用于开展针对欧洲下一代静止气象卫星[第 3 代气象卫星(MTG)]上闪电成像仪(LI)的闪电辐射传输模拟研究,目的是获取闪电造成的云顶辐射分布形式以及受闪电光源特性及云特性等各种参数的影响情况。近年来,随着我国卫星闪电观测从提上议事日程到逐步发展,一些针对我国未来闪电探测仪器的闪电辐射传输预先研究工作也正逐步开展,已发表的相关工作成果包括闪电探测中的云影响研究^[21]以及针对风云四号卫星闪电成像仪的闪电辐射传输模式建立等^[22]。对于未来风云四号卫星的闪电观测将如何受到仪器观测几何参数的影响,还缺乏较为深入的模拟研究和定量分析结果。

本文在文献[22]工作的基础上,利用建成的基于 Monte Carlo 方法的光学波段闪电辐射传输计算方法,着重考察了卫星观测角度、观测像元形变大小

以及闪电在像元中的水平相对位置等观测几何因子对风云四号卫星闪电成像仪观测到的云顶辐亮度的定量影响。

2 计算方法和步骤

文献[22]中已详细描述了基于 Monte Carlo 方法建立闪电辐射传输算法的基本原理以及计算模式的基本情况,在此仅给出方法概要以及针对风云四号卫星闪电成像仪的闪电辐射传输计算流程。

如文献[22]中所述,由于闪电光源不同于太阳等自然平行光源,而是非稳态、非平行、瞬时且形状不规则的特殊光源,因此,遥感领域许多常用的辐射传输算法并不适用于闪电辐射传输模拟。采用基于“随机模拟”的计算方法-Monte Carlo 方法^[23-24]来求解闪电在云中的辐射传输问题。Monte Carlo 方法本质上是一种采用统计抽样理论来近似求解数学或物理问题的方法,广泛应用于自解现象的模拟、工程实验和数值分析、经济管理问题分析等众多领域。它的核心思路是:建立与待解问题相关联的概率模型(即给出描述物理系统或物理过程的一个或一组概率密度分布函数);对概率模型进行随机模拟和统计抽样,计算所求参数的统计特征,给出问题的近似解。Monte Carlo 方法的解的精确度可用估计值的标准误差来表示。理论上只要模拟的样本数足够多,总可以得到精确的解。

具体到求解光学波段的闪电辐射传输问题, Monte Carlo 方法首先根据闪电在云中传输的物理过程(针对风云四号卫星闪电成像仪的观测波段,闪电在云中发生的物理过程主要是由闪电源发出的光子在雷暴云介质中被多次散射和吸收的过程)构造两个概率分布函数。第一个概率分布函数与光子行进的距离有关。根据比尔定律,光在直接传输的过程中由于介质吸收而发生的衰减符合指数削弱规律。因此,在 Monte Carlo 方法中,光子与介质碰撞之前走了一定距离,设光子传输了 S 距离而与介质没有相互作用的概率为 R_p , R_p 等于经过这段距离(令其间穿越介质的光学厚度为 τ)的消光后的辐射量与之前辐射量的比例,这个比例应符合比尔定律定义的指数削弱规律,具有如下形式:

$$R_p = \exp(-\tau) = \exp(-\beta S), \quad (1)$$

则两次碰撞之间穿越的光学厚度 $\tau = -\ln(R_p)$ 。第二个概率分布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而改变其传输方向,新的传输方向与表示散射辐射空间分布特性的散射相函数

$P(\Theta)$ 有关。其中 Θ 为散射角,是入射辐射方向与散射辐射方向的夹角。散射相函数是考虑光的散射问题的一个基本函数。在散射问题中,由于粒子对光的散射常常在空间是各向异性分布的,因此,引入了相函数的概念。在 Monte Carlo 方法描述的随机过程中,光子在某一个偏离碰撞前进方向的 Θ 方向上受到散射,该方向由与局地相函数有关的概率分布所决定。构造光子在 0 与 Θ 之间被散射的概率为

$$R_p = \frac{\int_0^\Theta P(\cos \Theta') d(\cos \Theta')}{\int_0^\pi P(\cos \Theta') d(\cos \Theta')} = \frac{\int_0^\Theta P(\cos \Theta') d(\cos \Theta')}{2}, \quad (2)$$

散射角 Θ 即可由(2)式确定。

基于上述构建的概率分布函数,开始闪电辐射传输的 Monte Carlo 随机模拟过程。模拟程序从闪电电源处连续地释放出具有初始能量权重的光子,并且在雷暴云介质中逐个地跟踪这些光子的运动路径。由闪电电源发出的光子在雷暴云介质中将被散射和吸收。结合计算机产生的在适当区间上均匀分布的随机数以及构建的概率分布函数,可以确定光子每一次散射后的行进路程和方向。光子若被介质吸收, Monte Carlo 方法根据介质的单次散射吸收比的数值来调整该光子的能量权重值,光子以新的能量权重在新的方向上继续前进。追踪过程一直重复下去,直到所用的光子达到一定数目,符合预期的精度,则结束此次随机模拟过程,统计最终的云顶出射能量分布,并用出射的光子数表示。由于风云四号卫星闪电成像仪光学探测波段的通道带宽非常窄,因此, Monte Carlo 算法中将探测到的闪电辐射近似视为单色辐射,在忽略能量随光谱变化的前提下,在卫星探测器观测方向单位立体角内的光子数可视为与闪电成像仪观测到的云顶辐亮度直接相匹配的量。

建成的 Monte Carlo 闪电辐射传输计算模式需要的输入参数包括:云的几何形态和几何尺度;云的散射参数(云光学厚度、单次散射反照率、不对称因子等);闪电光源的几何结构及其相对于云的位置、闪电光源的发射强度(由闪电光源发射的光子数表示)等。模式的输出参数为云顶每个像元在卫星观测方向单位立体角内的光子数目以及与之相匹配的辐亮度。

图 1 所示为针对风云四号卫星闪电成像仪的闪电辐射传输计算的基本流程。

3 计算结果和分析

采用上述计算方法,对典型对流尺度雷暴云内发生的闪电造成的云顶辐亮度进行了模拟。假定云体为理想的平面平行水云,水平尺度为 72 km,垂直尺度为 10 km,光学厚度为 400,云粒子有效半径为 10 μm 。云顶位于距离地面 1 km 高度处,闪电为点光源,发生于云体内部距云顶 7 km 处。计算中考虑了 9 种卫星观测天顶角的情况(分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° ,基本上涵盖了风云四号卫星闪电成像仪覆盖范围内可能的卫星观测角度范围),像元的空间分辨率分别取 8 km(与风云四号卫星闪电成像仪标称空间分辨率一致)、12 km 和 18 km(考虑到观测面阵边缘像元形变导致的像元尺度增大)。此外,考虑了闪电发生在像元中 6 种水平相对位置的情况,如图 2(a)和(b)所示,这 6 种水平相对位置分别用 A、B、C、D、E、F 标记,其中,图 2(a)为模拟区域中心单个 8 km 空间分辨率像元的示意图,图 2(b)为整个模拟区域的水平示意图。图 2 b 中,由实线(形如“—”)划分的每个像元的空间分辨率是 8 km,由虚线(形如“---”)划分的每个像元的空间分辨率是 12 km,由点线(形如“...”)划分的每个像元的空间分辨率是 18 km;图中标有阴影的三个正方形区域分别指示了这三种尺度的像元空间分辨率的情况。

需要指出的是,在按照图 1 的流程进行的 Monte Carlo 模拟结束时,输出的云顶辐射能量分布是用出射的光子数表示,根据观测辐亮度的物理定义,在卫星探测器观测方向单位立体角内的光子数可视为与闪电成像仪观测到的云顶辐亮度直接相匹配的量。为了使 Monte Carlo 模拟的输出值在数值上更为直观,同时针对考察与闪电阈值相关联的云顶辐亮度随观测几何变化的目的,对 Monte Carlo 模拟的输出值作了如下处理:1) 将国外同类仪器算法中常用的闪电辐射能量密度阈值($4.7 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)作为参考值,假定按 400 μs 闪电脉冲持续时间计算,相应的闪电辐亮度值为 $11.75 \text{ m} \cdot \text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ [17]。在此基础上,定义闪电发生在 8 km 像元中心点,如图 2(a)中的 A 点所示,且观测天顶角为 0° 时该像元的云顶辐亮度为 $11.75 \text{ m} \cdot \text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,并取其相应的出射光子数为基准。以此基准作为参照,其他所有的以出射光子数表示的输出即可转换为实际意义上的卫星观测辐亮度,单位为 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

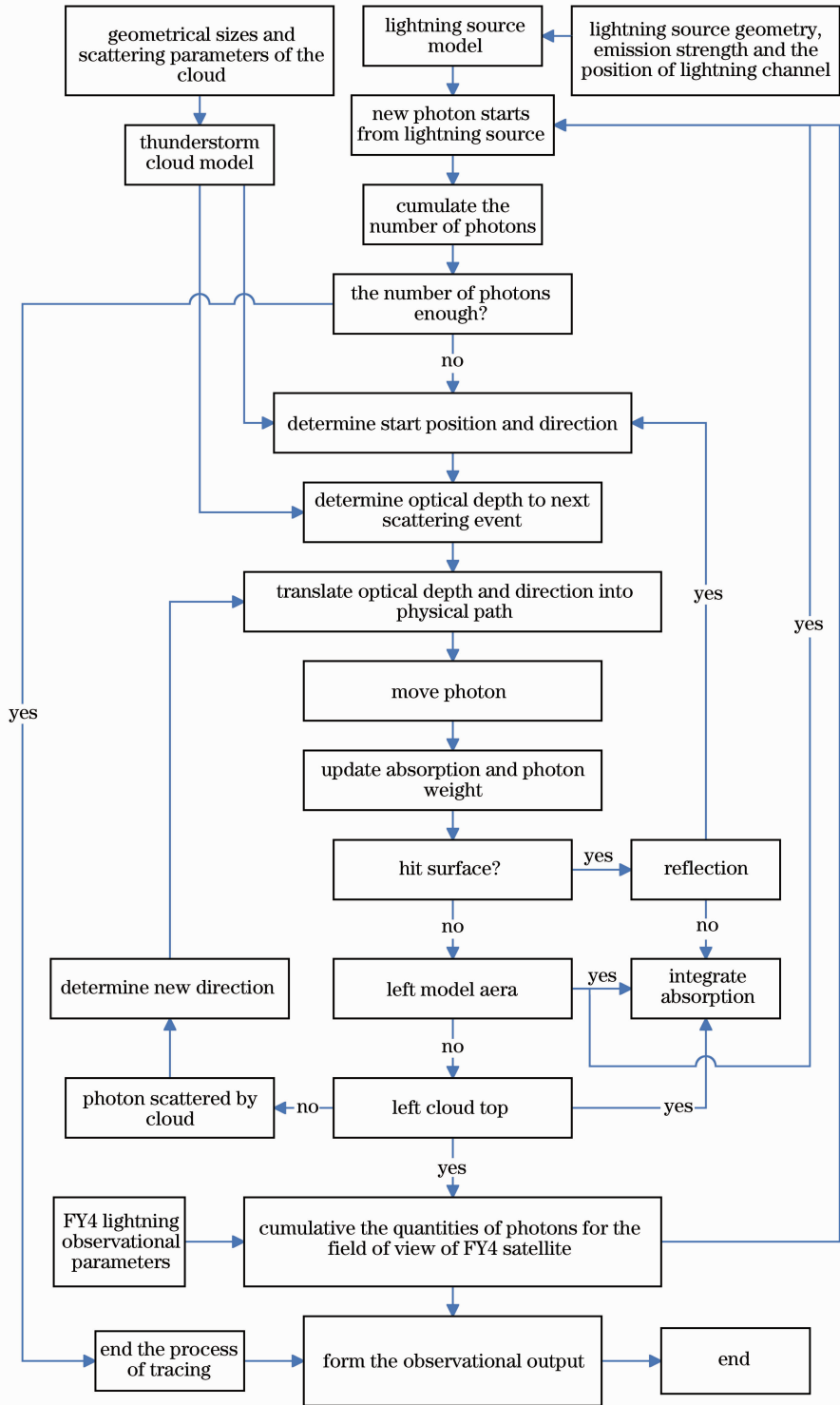


图 1 基于风云四号卫星闪电成像仪观测模式的蒙特卡罗闪电辐射传输算法计算流程

Fig. 1 Flow chart of Monte Carlo simulation for the lightning radiation observed by FY-4 satellite

3.1 观测几何因子对云顶闪电图像的影响

图 3~5 为 Monte Carlo 算法模拟得到的针对不同观测几何因子的三组云顶闪电辐亮度图像。每幅图像中由圆圈标注的是有闪电发生的像元(针对 8 km 空间分辨率的图像)或闪电发生的位置(针对

12 km 和 18 km 空间分辨率的图像),对于 8 km 空间分辨率的图像,闪电光源具体处在由圆圈标注像元的何种水平相对位置[如图 2(a)所示],由后文及图题给出相应描述。

图 3 为 9 种卫星观测天顶角下的闪电图像,像

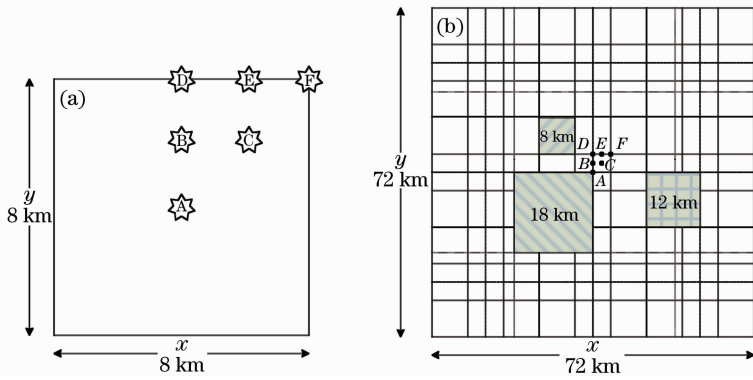


图 2 (a) 闪电发生在像元中 6 种水平相对位置以及 (b) 模拟区域的水平示意图
Fig. 2 (a) Six kinds of position of lightning in one pixel and (b) in whole model area

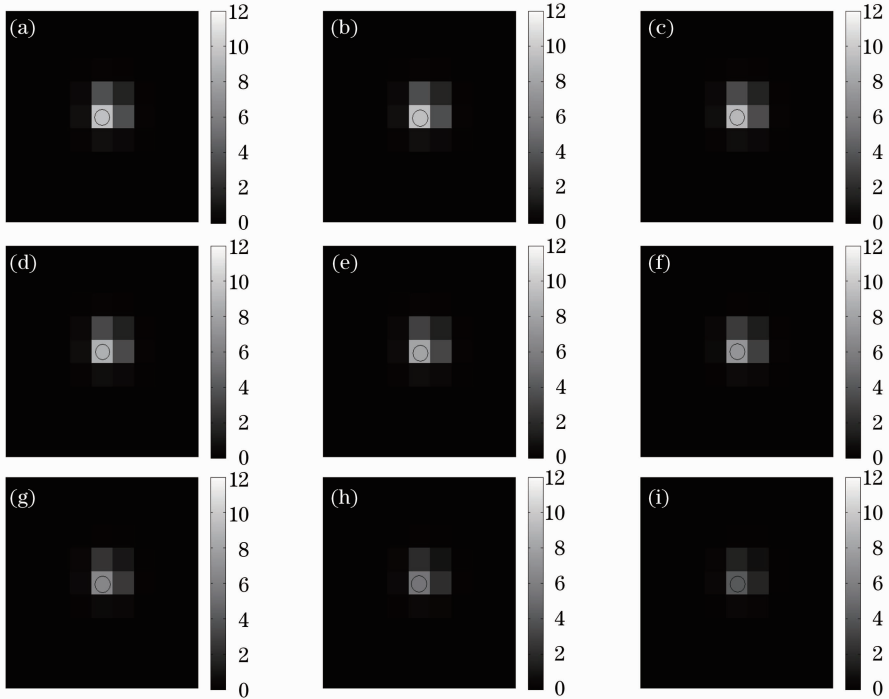


图 3 9 种卫星观测天顶角情况下的云顶闪电图像
Fig. 3 Lightning image on cloud top for nine viewing zenith angles

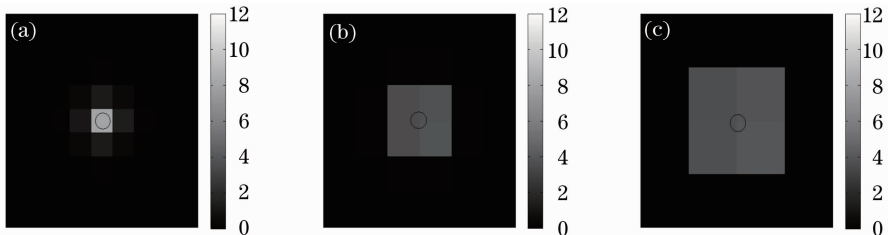


图 4 3 种像元空间分辨率情况下的云顶闪电图像
Fig. 4 Lightning image on cloud top for three kinds of pixel size

元的空间分辨率为 8 km, 闪电发生在由圆圈标注像元的 C 水平相对位置, 如图 2(a) 中的 C 点所示。图 3 中的 (a)~(i) 依次对应观测天顶角为 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70° 和 80° 时的情形。随着观测天顶角由小变大, 被闪电照亮的像元在分布形态上变

化不大, 但在强度上有逐渐减弱的趋势, 并且发生闪电的像元与周围相邻像元的亮度差别也逐渐减小。

图 4 为 3 种像元空间分辨率下的闪电图像, 卫星观测天顶角为 60°, (a)~(c) 依次对应像元空间分辨率为 8、12、18 km 时的情形。闪电发生在图像区

域的中心点,在 8 km 像元空间分辨率图像上,闪电具体发生在由圆圈标注像元的 A 水平相对位置,如图 2(a)中的 A 点所示。由图可见,随着像元尺度由标称的 8 km 增至 12 km 和 18 km,云顶由闪电照亮的范围增大,但亮度显著减弱,同时 12 km 像元分辨率与 18 km 像元分辨率的情形相比,二者的分布形态及亮度差别上区别不大。

图 5 为 6 种水平相对位置下的闪电图像,像元的空间分辨率为 8 km,卫星观测天顶角为 0°。图中的(a)~(f)依次对应闪电发生在由圆圈标注像元中

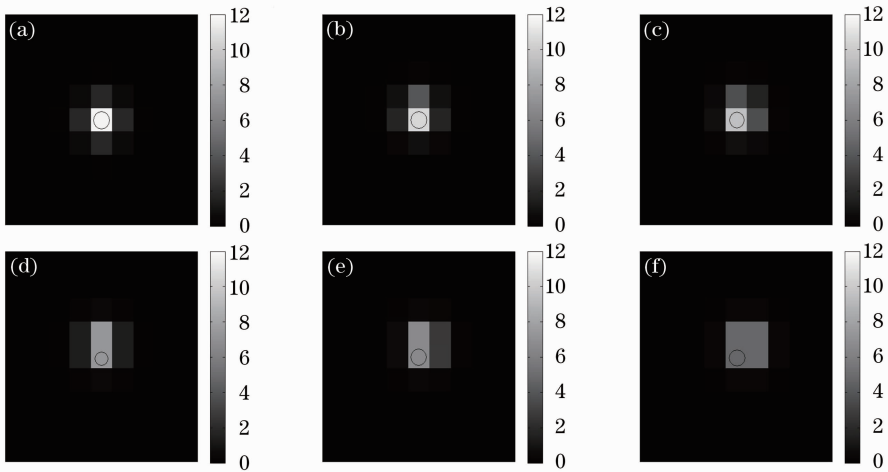


图 5 6 种闪电在像元中的水平相对位置情况下的云顶闪电图像

Fig. 5 Lightning image on cloud top for six kinds of horizontal position

3.2 观测几何因子对云顶闪电辐亮度的定量影响

根据 Monte Carlo 算法模拟结果,着重分析了有闪电发生的像元(即闪电光源所在像元)的云顶辐亮度受观测几何因子的定量影响,这对未来从风云四号卫星闪电观测资料中正确提取和分析闪电辐射信息至关重要。

图 6 为在 9 种观测天顶角以及 3 种像元空间分

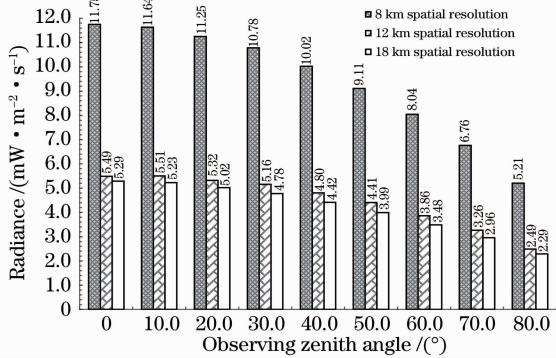


图 6 闪电光源所在像元的云顶辐亮度随像元空间分辨率及卫星观测天顶角的变化

Fig. 6 Variation of lightning radiance on cloud top with pixel size and viewing zenith angle

A、B、C、D、E、F, 6 种水平相对位置的情况,如图 2(a)所示。由图可见,在风云四号卫星标称的 8 km 空间分辨率的情形下,云顶闪电辐亮度的分布形态及强度受闪电发生点在视场中的水平相对位置的影响非常显著。闪电越靠近视场中心,观测到的云顶辐亮度就越强,并且闪电所在的像元与周围未发生闪电像元的亮度差异就越明显。相反,远离视场中心的闪电,其引发的云顶辐亮度会弱一些,并且与周围未发生闪电像元的亮度差异变小,导致直观上从图像上看到的闪电发生的地点和范围变得模糊。

分辨率时,闪电光源所在像元的云顶辐亮度在数值上的对比情况。一个明显的特征是:不同观测角度下,8 km 分辨率时的辐亮度总体要超出 12 km 和 18 km 分辨率时辐亮度的 1 倍以上,后两者在数值上比较接近。另外,随着观测天顶角的增大,3 种像元空间分辨率对应的云顶辐亮度值均呈现出平滑递减的趋势和规律。

图 7 为 6 种水平相对位置下[如图 2(a)所示]

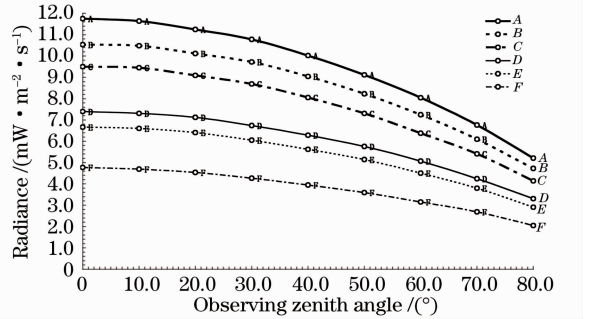


图 7 闪电光源所在像元的云顶辐亮度随闪电发生点在像元中的水平相对位置及卫星观测天顶角的变化

Fig. 7 Variation of lightning radiance on cloud top with horizontal position and viewing zenith angle

闪电光源所在像元的云顶辐亮度随卫星观测天顶角的变化情况,像元的空间分辨率为 8 km。图中标注有“A”、“B”、“C”、“D”、“E”、“F”的曲线依次对应图 2(a)中的 A、B、C、D、E、F 这 6 种水平相对位置时的情形。闪电发生的位置由 A 变化到 F,离视场中心的距离也依次增大,导致相应的云顶辐亮度值逐渐减弱。其中水平位置 F 与水平位置 A 相比,其对应的辐亮度在各观测角度下均减少了一半以上。同时,和图 6 中相似,随着观测天顶角的增大,6 种水平相对位置对应的云顶辐亮度值也都呈现出平滑递减的趋势和规律。这就产生一种思路:能否在适用的范围内将云顶辐亮度随观测角度平滑变化的这种规律用回归拟合的方法定量提取出来。

根据这种思路,将不同观测天顶角下的辐亮度数值归一化到相对应的观测天顶角为 0°时的辐亮度值,形成一个归一化比值,用百分数表示。这个归一化的辐亮度比值代表的是当前辐亮度观测值占观测角为 0°时的辐亮度值的百分比。图 8 所示为与图 7 中完全对应的云顶辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角的变化情况,像元的空间分辨率为 8 km,图中标注有“A”、“B”、“C”、“D”、“E”、“F”的曲线仍然依次对应图 2(a)中的 A、B、C、D、E、F 这 6 种水平相对位置时的情形。与图 7 中的辐亮度值相比,图 8 中的辐亮度归一化比值散点在分布上要聚合得多,有利于提取更为适用的回归拟合关系。

用同样的方法,对像元的空间分辨率为 12 km 和 18 km 时的云顶辐亮度作了归一化处理,如图 9 所示,其中图 9(a)为像元的空间分辨率为 12 km 时云顶辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角的变化情况,图 9(b)为像元的空间分辨率为 18 km 时云顶

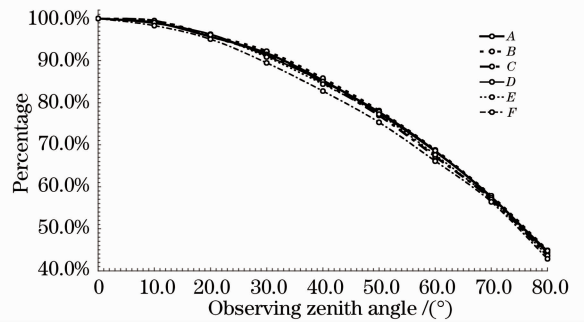


图 8 闪电光源所在像元的云顶辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角的变化(8 km 像元空间分辨率)

Fig. 8 Variation of normalized lightning radiance on cloud top with viewing zenith angle(8 km spatial resolution)

辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角的变化情况,图中的 8 条曲线分别对应 8 个有闪电发生的像元的辐亮度结果,此时,闪电发生的水平位置在图 2(b)中 A 点所示。需要说明的是,在 12 km 或 18 km 分辨率下,图 2(b)中 A 点位于模式区域中心 4 个像元的中心,因此在观测视场上,这 4 个像元均为有闪电发生的像元。为了增加模拟样本,取两种闪电所在的垂直位置,一个是距云底 7 km 处,另一个是距云底 1 km 处,这两种闪电所在的垂直位置对应的有闪电发生的像元分别对应图中“1”、“2”、“3”、“4”和“5”、“6”、“7”、“8”所标志的情形。图 9(a)和(b)中,由于闪电发生的水平相对位置一致,因此图 9(a)和图 9(b)中的散点分布结果非常接近。由图 9 可以看出,随着像元空间分辨率增大至 12 km 和 18 km,辐亮度归一化比值散点在分布上的聚合程度要低于 8 km 空间分辨率时的结果,但仍然表现出较明显的曲线分布特征。

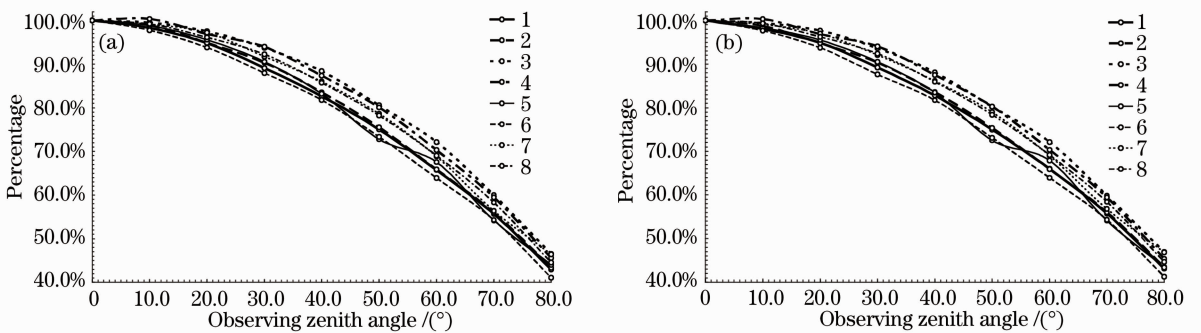


图 9 闪电光源所在像元的云顶辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角的变化。(a) 12 km 像元空间分辨率; (b) 18 km 像元空间分辨率

Fig. 9 Variation of normalized lightning radiance on cloud top with viewing zenith angle. (a) 12 km spatial resolution; (b) 18 km spatial resolution

综合上述获取的云顶辐亮度归一化比值样本数据,采用多项式形式以及线性形式对其进行了回归拟合,取得了较为理想的拟合效果(如图 10)。其中图 10(a)是云顶辐亮度归一化比值针对卫星观测天顶角(单位为度)的多项式拟合结果,拟合关系式为 $y = -8 \times 10^{-5} x^2 - 6 \times 10^{-4} x + 1.0016$;图 10(b)是

云顶辐亮度归一化比值针对卫星观测天顶角余弦的线性拟合结果,拟合关系式为 $y = 0.6631x + 0.3384$ 。通过这些定量关系,可以为未来风云四号卫星闪电观测资料的处理和应用提供有价值的角度订正参考信息。

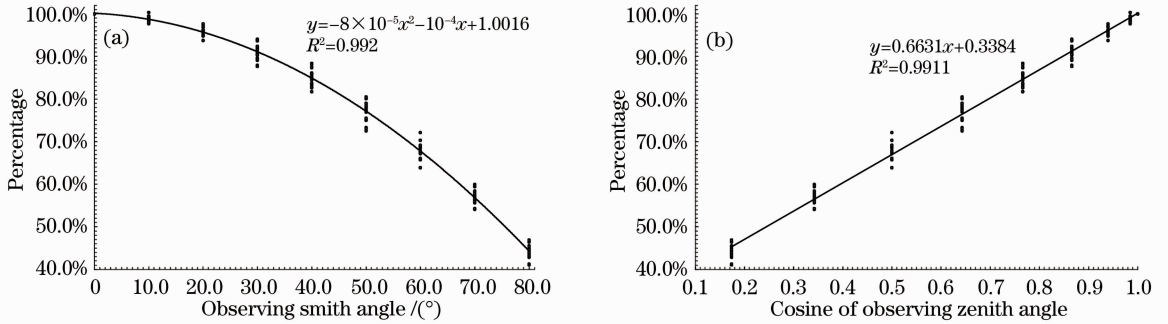


图 10 闪电光源所在像元的云顶辐亮度归一化比值随卫星观测天顶角变化的拟合结果。(a) 多项式拟合结果;(b)线性拟合结果

Fig. 10 Fitting results for normalized lightning radiance with viewing zenith angles. (a) Polynomial fitting results; (b) linear fitting results

4 结 论

我国新一代静止气象卫星风云四号上计划首次搭载的闪电成像仪将通过光学成像的方式,利用闪电放射能量峰值所在的近红外波段,对由闪电光源发出并经云体辐射到云顶的闪电信号进行实时、连续探测。利用基于 Monte Carlo 方法的光学波段闪电辐射传输计算方法,对风云四号卫星闪电成像仪观测到的由闪电引起的云顶辐亮度进行了模拟,着重考察了卫星观测角度、观测像元形变大小以及闪电在像元中的水平相对位置等观测几何因子对观测到的云顶辐亮度的定量影响,得到了云顶辐亮度归一化比值与卫星观测天顶角之间的定量关系,为未来星载闪电资料的处理和应用提供非常有价值的信息。

参 考 文 献

- 1 Price C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather[J]. *Sensors*, 2008, 8(1): 157-170.
- 2 Williams E R. Lightning and climate; a review[J]. *Atmos Res*, 2005, 76(1): 272-287.
- 3 Wallace J M, P V Hobbs. *Atmospheric Science; an Introductory Survey*[M]. New York: Academic Press, 2006.
- 4 Price C. *Global Thunderstorm Activity*[M]. Springer, 2006. 85-99.
- 5 Schumann U, Huntrieser H. The global lightning-induced nitrogen oxides source[J]. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 3823-3907.
- 6 Wu S, Mickley L J, Jacob D J, *et al.*. Why are there large differences between models in global budgets of tropospheric ozone? [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D5): D05302.

- 7 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.
- 8 X M Shao, M Stanley, A Regan, *et al.*. Total-lightning observations with the new and improved los alamos sferic array (LASA)[J]. *J Atmosph & Oceanic Technol*, 2006, 23(10): 1273-1288.
- 9 Thomas R J, P R Krehbiel, W Rison, *et al.*. Accuracy of the lightning mapping array[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109(D14): D14207.
- 10 Ma Ming. *Some Studies on the Relationship between Lighting and Climatic Changes* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004.
- 马明. *雷电与气候变化相互关系的一些研究*[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.
- 11 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.
- 12 H J Christian, R J Blakeslec, S T Goodman. *Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System* [Z]. NASA Technical Memorandum, 1992. 4350.
- 13 Finke U. *Characterising the Lightning Source for the MTG Lightning Imager Mission*[R]. Universität Hannover, 2006. 1-46.
- 14 Huang Fuxiang. The mission and challenge of the FY-4 lightning imager[J]. *Meteorological Technology*, 2007, 35(1): 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(1): 35-42.
- 15 Orville R E, Henderson RW. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm[J]. *J Atmos Sci*, 1984, 41(21): 3180-3187.
- 16 H J Christian, R J Blakeslee, S J Goo, *et al.*. Algorithm

- Theoretical Basis Document (ATBD) for the Lightning Imaging Sensor (LIS)[Z]. NASA Technical Memorandum, 2000.
- 17 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.
- 18 Thomason L W, Krider E P. The effects of clouds on the light produced by lightning[J]. *J Atmos Sci*, 1982, 39(9): 2051-2065.
- 19 Light T E, Suszcynsky D M, Kirkland M W, *et al.*. Simulations of lightning optical waveforms as seen through clouds by satellites [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D1): 17103-17114.
- 20 Dyudina U A, Ingersoll A P, Vasavada A R, *et al.*. Monte Carlo radiative transfer modeling of lightning observed in galileo images of jupiter[J]. *Icarus*, 2002, 160(2): 336-349.
- 21 Chen Shengbo, Yang Ying, Cui Tengfei. Study of the cloud effect on lightning detection by geostationary satellite [J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(3): 797-803.
陈圣波, 杨莹, 崔腾飞. 静止卫星闪电探测中云影响研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 797-803.
- 22 Hu Liqin, Huang Fuxiang. Monte Carlo radiative transfer modeling of optical lightning signals observed by satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101001.
胡丽琴, 黄富祥. 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101001.
- 23 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.
- 24 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.

栏目编辑: 何卓铭