0254-6124/2023/43(5)-0833-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Lin, ZHOU Xunxiu, Axikegu, HUANG Daihui, WANG Peihan, CHEN Xuejian. Effects of Thunderstorms Electric Field on the Lateral Distribution of Cosmic Ray Secondary Particles at LHAASO (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 833–839. DOI:10.11728/cjss2023.05.2023-0027

雷暴电场对 LHAASO 观测面宇宙线次级粒子横向分布的影响*

陈 林 周勋秀 阿西克古
黄代绘 王培汉 陈学健

(西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031)

摘 要 在雷暴电场的偏转作用下，宇宙线次级粒子到达探测面的位置将受到影响，其横向分布也将发生变化。本文采用 Monte Carlo 方法，研究雷暴期间 LHAASO 观测面（海拔约 4400 m）宇宙线次级粒子横向分布的变化。结果表明，雷暴期间次级粒子的横向分布将变宽，其变化幅度与电场强度有关，与天顶角、原初能量也有很强的依赖关系。在–1700 V·cm^{-1} 的电场中，次级粒子横向分布的变化幅度在天顶角 0°时为 3.8%，天顶角 50°时为 34%；当原初能量约 180 GeV 时，次级粒子横向分布的变化幅度为 9.9%，原初能量约 560 TeV 时，其变化幅度高达 119%。本文的模拟结果可为理解雷暴电场偏转宇宙线次级粒子的物理机制、雷暴期间 LHAASO 中宇宙线数据的变化规律提供信息。

关键词 雷暴电场，宇宙线，横向分布，Monte Carlo 模拟，LHAASO 实验

中图分类号 P353

Effects of Thunderstorms Electric Field on the Lateral Distribution of Cosmic Ray Secondary Particles at LHAASO

CHEN Lin ZHOU Xunxiu Axikegu
HUANG Daihui WANG Peihan CHEN Xuejian

(*School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031)

Abstract The charged components of cosmic ray secondary particles are deflected by thunderstorm electric fields as they pass through kilometer-scale thunderclouds. As a result, the information on location of secondary particles reaching the observation level will be affected, and the lateral distribution will

* 国家自然科学基金项目资助（U2031101, 11475141）

2023-02-17 收到原稿，2023-04-17 收到修定稿

E-mail：CLin@my.swjtu.edu.cn. 通信作者 周勋秀，E-mail：zhouxx@swjtu.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

also be changed. In this paper, the Monte Carlo method is used to simulate the effects of near-earth thunderstorms electric field on the lateral distribution of secondary particles at LHAASO. A vertical and uniform atmospheric electric field model is used in our simulations. The results show that during thunderstorm the lateral distribution of secondary particles widens, and the variation amplitude is not only associated with the strength of electric field, but also dependent upon the primary energy and zenith angle of cosmic rays. In an electric field of –1000 V·cm^{-1}(below the threshold of the Relatively Runaway Electrons Avalanche, RREA), the variation amplitude of the lateral distribution of secondary particles is about 0.7% for θ=0° and the variation amplitude reaches 4.7% for θ=50°. The primary energy of cosmic rays is about 180 GeV, the increasing amplitude is about 0.6%. When the primary energy is about 560 TeV, the variation can be up to 20.1%. In an electric field of –1700 V·cm^{-1} (above the threshold of the RREA process), the increasing amplitude of the lateral distribution is greater than that in an electric field of –1000 V·cm^{-1}. And the amplitude is 3.8% for θ=0° and 34% for θ=50°, respectively. For the primary energy of about 180 GeV, the increasing amplitude of secondary particles is 9.9%. For the primary energy of about 560 TeV, the variation can be as high as 119%. Our simulation results are helpful to understand the deflection mechanisms of cosmic ray secondary particles generated by the near-earth thunderstorms electric field, as well as the variation of LHAASO data during thunderstorms.

Key words Near Earth thunderstorm electric fields, Cosmic rays, Lateral distribution, Monte Carlo simulations, LHAASO experiment

0 引 言

进入大气层的高能原初宇宙线与空气中的原子核作用，会引发广延大气簇射现象（Extensive Air Shower, EAS）[1,2]，产生数以万计的次级粒子（包括正电子、负电子、光子、μ子等成分）。雷暴期间，雷暴云厚度高达几公里，云中大气电场强度可高达1000 V·cm^{-1}[3,4]。宇宙线次级带电粒子在穿过雷暴云的过程中，不可避免地会受到强电场的作用，到达探测面的粒子数目、能量、位置等信息将发生变化，从而影响地面宇宙线观测实验的测量和溯源。

Gurevich 等[5] 研究发现，当雷暴电场强度超过一定阈值时，次级电子将被加速而逃逸，引发雪崩效应，逃逸电子数目呈指数增长，并提出了相对论逃逸电子雪崩机制（RREA）。RREA 过程中的高能电子通过韧致辐射又产生高能光子。宇宙线次级粒子被雷暴电场加速而产生的高能现象，在实验和理论方面都得到了广泛研究，是宇宙线物理和大气物理交叉学科中的研究热点之一。为了研究雷暴电场加速产生的高能粒子，很多地面和卫星实验投入到了雷暴与宇宙线变化的关联研究中[6–8]。多年来，地面 EAS 阵列实验（例如 GROWTH[9], ARGO-YBJ[10], ASγ[11], ASEC[12] 等）观测到了地面宇宙线在雷暴电场中突然增强（Thunderstorm Ground Enhancement, TGE）的现象。与此同时，卫星实验（例如 CGRO[13], Fermi[14], ASIM[15] 等）探测到来自地球的 γ 射线闪（Terrestrial Gamma Flashes, TGF）现象。这些观测结果都表明了宇宙线次级粒子强度的增强与雷暴天气有关，且与目前广泛接受的 RREA 机理相符合。通过实验中多个 TGE 事件能谱变化的分析，发现雷暴期间新增粒子的能谱可以延伸至几十个 MeV[16,17]。利用 CORSIKA 软件包，模拟发现雷暴电场中次级电子的能谱将变软，且变化幅度与电场强度有关[18,19]。截至目前，雷暴期间宇宙线次级粒子强度和能量变化的观测和理论研究已取得了比较丰富的成就。

在地面宇宙线观测实验中，通过记录广延大气簇射产生的次级粒子密度、到达时间等信息，可间接获取宇宙线的原初信息（例如原初能量、方向等），从而开展宇宙线相关课题的物理研究[20]。雷暴期间宇宙线次级带电粒子会受大气电场的影响，到达探测面的位置分布也必将发生改变，这将影响地面实验对宇宙线事例的探测和重建。目前对宇宙线次级粒子的横向分布在雷暴电场中的变化研究还比较少。

高海拔宇宙线观测站 LHAASO 位于中国四川省

稻城县海子山，海拔约 4400 m，拥有探测能量范围广、灵敏度高、有效面积大、全天候等优势[21]，有助于开展宇宙线物理与大气物理交叉学科的研究[22]。为了理解 LHAASO 实验数据在雷暴期间的变化，本文采用 Monte Carlo 方法，研究雷暴电场对 LHAASO 观测面宇宙线次级粒子横向分布的影响。

1　模拟参数设置

CORSIKA(Cosmic Ray Simulations for Kascade)[23] 能够详细模拟由高能原初宇宙线在大气层中引发的广延大气簇射过程。本文研究使用的版本是 CORSIKA 7.7410，并将软件包中电磁级联 EGS4 的子程序 ELECTR 加入了电场模型。模拟中，选取原初质子的能量范围为 10^2 ～10^8 GeV(能谱指数为 –2.7)。随着天顶角的增大，大气厚度增加，簇射衰减也随之增强，模拟中选取天顶角在 0°～50°范围内的一系列值，在方位角 0°～360°内均匀投点。由于电场对次级带电粒子的影响，电子和光子的截断能量取为 0.05 MeV，这也是 CORSIKA 模拟过程中允许对次级粒子追踪的最低能量。

在模拟工作中，添加了一个电场模型，即在海拔高度为 4400～5400 m(对应大气深度为 524～599 g·cm^{-2})内加入了均匀电场(电场正方向为垂直指向地面)。与真实情况相比，保持电场值不变显然会带来一些偏差，但这样可以更好地理解电场效应。

研究表明，发生逃逸电场的阈值随着海拔升高而减小[24,25]，其表达式为

$$E_{\mathrm{th}} = E_0 \mathrm{e}^{(-Z/8.4)}. \tag{1}$$

其中，E_{th} 为海拔高度 Z 的逃逸电场，E_0 为海平面的逃逸电场，取值为 2800 V·cm^{-1}。

由式(1)可得，在海拔 5.4 km 处的逃逸电场阈值为 1470 V·cm^{-1}，在海拔 4.4 km 处的逃逸电场阈值为 1660 V·cm^{-1}。即要触发 RREA 过程，需要足够强的雷暴电场。实验观测表明，雷暴期间部分大气电场强度会小于逃逸电场阈值。本研究中，分别选取两种典型的雷暴电场强度，即 1000 V·cm^{-1} 和 1700 V·cm^{-1}。

2　模拟结果与讨论

雷暴电场可直接加速和偏转能量较低的宇宙线次级正/负电子，同时正/负电子通过韧致辐射可产生光子，因而雷暴电场对宇宙线次级光子也有间接的影响。考虑到 LHAASO 中的 KM2A 和 WCDA 实验对正/负电子和光子均敏感，所以本文中的宇宙线次级粒子包含正/负电子和光子。

2.1　次级粒子横向分布变化与天顶角的关系

在大气簇射过程中，由于库伦散射使粒子获得横向动力，导致级联以三维的形式展开。图 1 是一个原初质子能量为 10 TeV、天顶角为 0°的簇射事例在 LHAASO 观测面的二维密度分布。从图中可以看出，经广延大气簇射产生的宇宙线次级粒子分布很广，但大部分粒子主要分布在靠近芯位的区域内。

为了研究宇宙线次级粒子的横向扩展，利用如下公式来计算粒子与簇射轴的垂直距离(又称芯距)：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\theta. \tag{2}$$

其中，x 和 y 为次级粒子在 LHAASO 观测面的位置坐标，θ 为原初宇宙线的天顶角。

图 2 给出了不加电场时，原初能量为 10^2～10^8 GeV，天顶角为 0°和 50°的次级粒子密度随芯距的变化(又称横向分布)。由图 2 可知，粒子密度分布对天顶角和芯距都有很强的依赖性。随着芯距的增加，粒子密度都快速下降。天顶角为 0°的粒子密度大于天顶角为 50°的密度，特别是在靠近芯位区域，几乎相差 1 个数量级。

为了直观地比较不同天顶角粒子横向分布的宽窄，对模拟结果进行了归一化处理。图 3(a)为天顶角

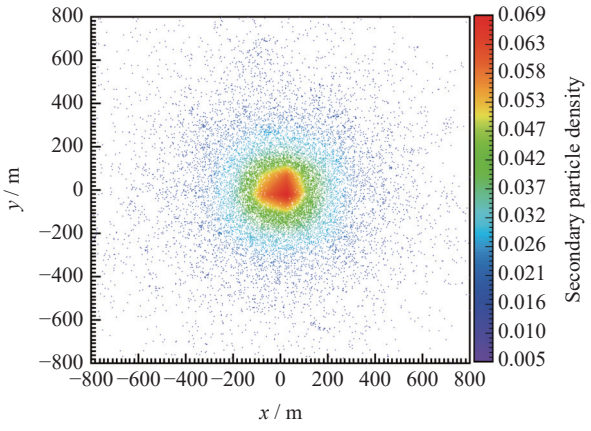


图 1　簇射事例中次级粒子密度在 LHAASO 观测面的位置分布

Fig. 1　Position distribution of secondary particles at LHAASO

为 0°时，次级粒子密度在不同电场(0, –1000 V·cm^{-1}, –1700 V·cm^{-1})中随芯距的变化。由图可知，次级粒子在电场中的横向分布变宽，且电场强度越强，变化幅度越大。图 3(b)为天顶角为 50°的模拟结果，可以看出，次级粒子的横向分布变化趋势与天顶角为 0°的一致，但变化幅度明显增加。

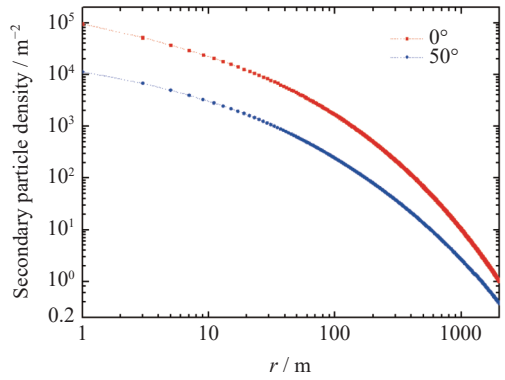


图 2 次级粒子密度随芯距的变化

Fig. 2 Secondary particle density as a function of core distance

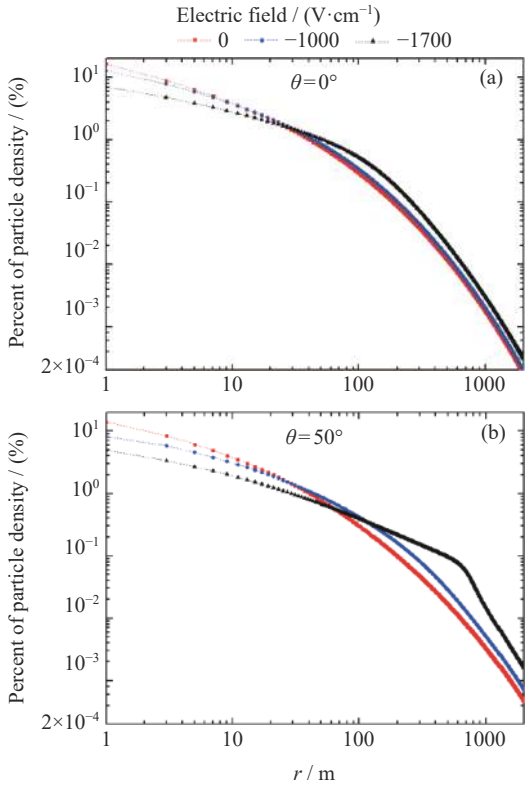


图 3 雷暴电场中归一化后的横向分布

Fig. 3 Normalized particle density as a function of core distance in electric fields

为了得到横向分布的大小，这里引入“平均横向半径”($\bar{r}$)，其表达式如下：

$$\bar{r}=\frac{\sum_{i=1}^{N} r_i}{N}. \tag{3}$$

其中，r_i 为观测面上第 i 个粒子到簇射轴的垂直距离，N 为总粒子数。

利用式(3)计算可得次级粒子平均横向半径与天顶角的关系，结果如图 4 所示。由图 4 可知，在不加电场时，平均横向半径随着天顶角的增加而增大。当天顶角为 0°时，次级粒子的平均横向半径约 397 m；当天顶角为 50°时，平均横向半径增大至 530 m。可见天顶角越大(次级粒子穿过的大气层厚度越长)，横向扩展就越宽[26]。在雷暴电场中，次级粒子平均横向半径的变化幅度随着天顶角的增加而增加，随着电场强度的增大而增大。当电场为–1000 V·cm^{-1} 时，天顶角分别为 0° 和 50° 的次级粒子平均横向半径分别为 400 m(增加约 0.7%)和 555 m(增加约 4.7%)。在 –1700 V·cm^{-1} 电场中，当天顶角为 0°时，次级粒子的平均横向半径为 412 m(增加约 3.8%)；当天顶角为 50°时，平均横向半径为 710 m(增加幅度高达 34.0%)。

综上所述，雷暴期间宇宙线次级粒子的横向分布变宽了，且随着天顶角的增加，横向分布的变化幅度增大。在模拟中，添加了竖直方向的均匀电场。随着天顶角的增加，次级粒子在电场中的偏转效应越明显。因而，次级粒子横向分布变化随天顶角的增加而增大。

2.2 次级粒子横向分布变化与原初能量的关系

图 5 给出了天顶角为 0°～50°，原初能量(E)低于

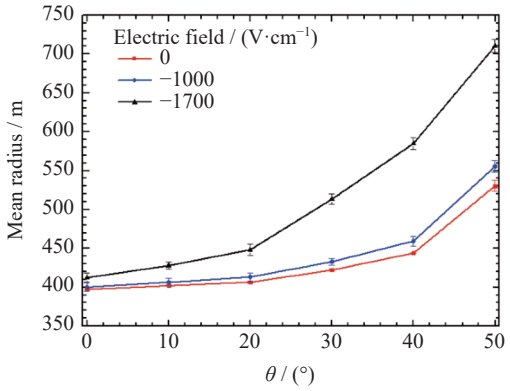


图 4 雷暴电场中次级粒子平均横向半径随天顶角的分布

Fig. 4 Mean lateral radius of secondary particles as a function of zenith angle in electric fields

1 TeV(10^2～10^3 GeV)和高于 1 TeV(1～10^3 TeV)的次级粒子在不同电场中的密度百分比随芯距的变化。从图 5 可以看出,随着芯距的增加,次级粒子的数目迅速减小,且原初能量越大的次级粒子,其横向扩展越小。在雷暴电场中,次级粒子的横向分布变宽,且幅度随着电场强度的增加而增大。同时,原初能量越大,横向分布的变化更加明显。

利用式(3)可得不同电场(0, –1000 , –1700 V·cm^{-1})中次级粒子平均横向半径随原初能量的分布,如图 6 所示。不加电场时,随着原初能量的增加,次级粒子的平均横向半径快速减小。当原初能量约为 180 GeV 时,次级粒子的平均横向半径约为 650 m;原初能量约为 560 TeV 时,次级粒子的平均横向半径降为 130 m。雷暴期间,次级粒子平均横向半径随着原初能量的分布与不加电场时的一致,但幅度出现增加,且依赖于电场强度和天顶角。在–1000 V·cm^{-1} 的电场中,原初能量为 180 GeV 时,次级粒子的平均横向半径约为 654 m;原初能量为 560 TeV 时,平均横向半径约为 157 m。在–1700 V·cm^{-1} 电场中,原初能量约 180 GeV 和 560 TeV 时,次级粒子的平均横向半径分别为 714 m 和 286 m。

在雷暴电场中,次级粒子平均横向半径的变化百分比(即相对于没有雷暴时的变化百分比)随原初能量的变化如图 7 所示。由图可知,在雷暴电场中,随着原初能量的增加,次级粒子的变化幅度也随之增大。此外,次级粒子的平均横向半径变化依赖于电场强度。在–1000 V·cm^{-1} 的电场中,原初能量为 180 GeV 时,次级粒子的平均横向半径增加约 0.6%;原初能量为 560 TeV 时,平均横向半径增加约 20.1%。在–1700 V·cm^{-1} 电场中,原初能量约 180 GeV 和 560

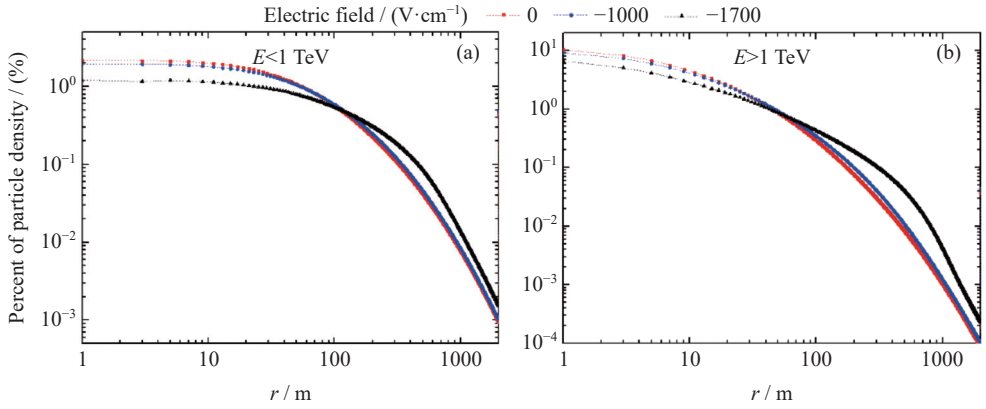


图 5　雷暴电场中归一化后的横向分布

Fig. 5　Normalized particle density as a function of core distance in electric fields

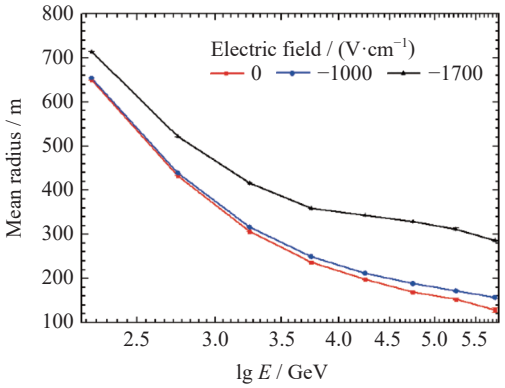


图 6　雷暴期间次级粒子的平均横向半径随原初能量的分布

Fig. 6　Mean lateral radius of secondary particles as a function of primary energy in electric fields

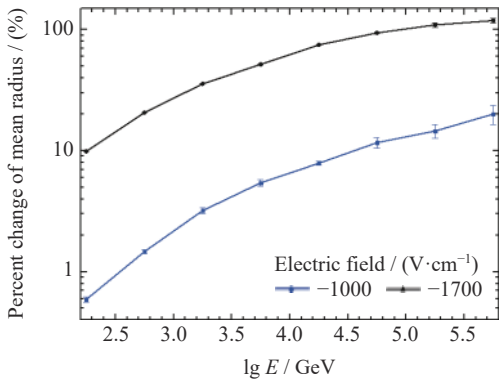


图 7　雷暴电场中次级粒子平均横向半径的变化随原初能量的变化

Fig. 7　Percent change of mean lateral radius as a function of primary energy in different electric fields

TeV 时, 次级粒子的平均横向半径增加分别约 9.9% 和 119.0%。

为了理解雷暴电场中次级粒子横向分布变化幅度与原初能量的关系, 本文模拟研究了次级正/负电子的数目和能量分布。

由于康普顿散射效应, 宇宙线次级粒子中负电子的数目高于正电子数, 负电子的平均能量比正电子的小[27]。LHAASO 观测面次级负电子与正电子的数目比值随芯距的变化如图 8 所示。由图可知, 负电子与正电子的比值随着芯距的增加而增大。靠近芯位区域, 原初能量越大, 负电子与正电子数目的比值越小; 远离芯位(芯距大于 20 m)时, 规律相反, 即原初能量越大, 负电子的数目与正电子的比值越大。

次级粒子(正电子和负电子)的平均能量随芯距的变化如图 9 所示。可以看出, 随着芯距的增加, 次级粒子的平均能量迅速减小。在靠近芯位区域, 原初能量越大对应的次级粒子平均能量也越大; 当芯距大于 20 m 时, 原初能量越大对应的平均能量越小。

结合图 8 和图 9, 很容易理解雷暴期间次级粒子横向分布变化与原初能量的关系。靠近芯位时, 原初能量越大的次级粒子平均能量越大, 负电子与正电子数目的比值越小, 因而电场对次级粒子的影响(加速和偏转效应)也就越小; 远离芯位时, 次级粒子的能量、负电子与正电子的比值刚好跟靠近芯位时的规律相反, 电场对次级粒子的影响变大。故原初能量越大, 次级粒子的平均横向半径变化也越大, 特别是在逃逸电场中, 现象更明显, 如图 5 和图 7 所示。

3 结论

本文利用 CORSIKA 软件包, 在 LHAASO 观测面(海拔高度为 4400 m)到海拔 5400 m 的空间范围内添加均匀电场, 模拟研究了宇宙线次级粒子横向分布变化与电场强度、天顶角、原初能量的关系, 主要结果如下。

雷暴电场中, 次级粒子的横向分布变宽, 其变化幅度随着天顶角的增加而增加, 随着电场强度的增大而增大。天顶角为 0°时, 在–1000 V·cm^{-1} 的电场中, 次级粒子横向分布变化不明显, 在–1700 V·cm^{-1} 的电场中, 横向分布的变化幅度约 3.8%。天顶角为 50°时, 在–1000 V·cm^{-1} 和–1700 V·cm^{-1} 的电场中, 横向分布的变化幅度分别为 4.7% 和 34.0%。

雷暴电场中次级粒子横向分布的变化幅度与原初能量也有很强的依赖关系。随着原初能量的增大, 横向分布的变化幅度也增加。在–1000 V·cm^{-1} 的电场中, 原初能量约 180 GeV 时, 次级粒子的平均横向半径增加幅度为 0.6%; 原初能量约 560 TeV 时, 其增加幅度为 20.1%。在–1700 V·cm^{-1} 的电场中, 原初能量约 180 GeV 和 560 TeV 时, 次级粒子的平均横向半径变化更为明显, 增加幅度分别为 9.9% 和 119.0%。

雷暴期间, 宇宙线次级粒子受大气电场的加速/减速和偏转作用, 使得到达探测面的数目和位置信息发生改变, 从而导致次级粒子的横向分布发生变化。根据本文的模拟结果可知, 雷暴期间由于次级粒子横向分布的变化, 地面实验(例如 LHAASO 实验中的 KM2A 和 WCDA 阵列)观测到的簇射事例率可能会有显著的变化, 簇射事例的重建也将受到影响, 其变

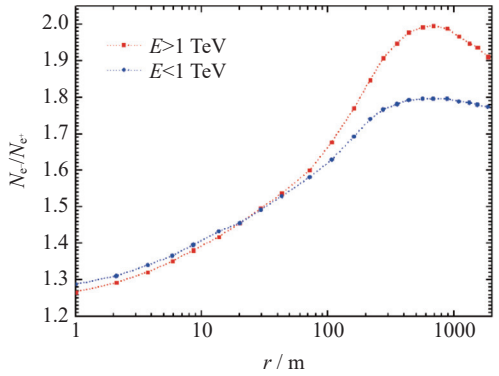


图 8 次级负电子与正电子的数目比值随芯距的变化

Fig. 8 Ratios of Secondary electrons to positrons as a function of core distance

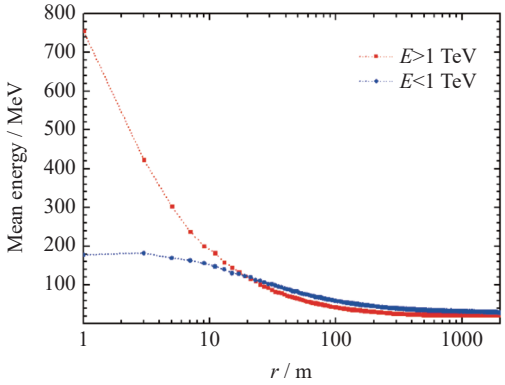


图 9 次级粒子的平均能量随芯距的变化

Fig. 9 Mean energy of secondary particles as a function of core distance

化幅度依赖于大气电场、原初天顶角和原初能量。同时,本文的模拟结果也有助于理解雷暴电场偏转宇宙线次级带电粒子的物理机制。

参考文献

[1] HUANG Zhicheng, ZHOU Xunxiu, HUANG Daihui, *et al*. Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(19): 199301

[2] WANG Kongsen, WANG He, HUANG Xingtao, *et al*. Study on the production characteristics of cosmic ray high energy family events with simulation and experiment[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, **28**(3): 232-238

[3] MARSHALL T C, RUST W D, STOLZENBURG M. Electrical structure and updraft speeds in thunderstorms over the southern Great Plains[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D1): 1001-1015

[4] MARSHALL T C, STOLZENBURG M, MAGGIO C R, *et al*. Observed electric fields associated with lightning initiation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(3): L03813

[5] GUREVICH A V, MILIKH G M, ROUSSEL-DUPRE R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm[J]. *Physics Letters A*, 1992, **165**(5/6): 463-468

[6] ZHOU Xunxiu, WANG Xinjian, HUANG Daihui, *et al*. Simulation study on the correlation between the ground cosmic rays and the near earth thunderstorms electric field at Yangbajing (Tibet China)[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(14): 149202

[7] CHILINGARIAN A, HOVSEPYAN G, ZAZYAN M. Muon tomography of charged structures in the atmospheric electric field[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(17): e2021GL094594

[8] HEUMESSER M, CHANRION O, NEUBERT T, *et al*. Spectral observations of optical emissions associated with terrestrial gamma-ray flashes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(4): 2020GL090700

[9] WADA Y, MATSUMOTO T, ENOTO T, *et al*. Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan[J]. *Physical Review Research*, 2021, **3**(4): 043117

[10] AXIKEGU, BARTOLI B, BERNARDINI P, *et al*. Cosmic ray shower rate variations detected by the ARGO-YBJ experiment during thunderstorms[J]. *Physical Review D*, 2022, **106**(2): 022008

[11] TSUCHIYA H, HIBINO K, KAWATA K, *et al*. Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet[J]. *Physical Review D*, 2012, **85**(9): 092006

[12] CHILINGARIAN A, HOVSEPYAN G, ASLANYAN D, *et al*. Thunderstorm ground enhancements: multivariate analysis of 12 years of observations[J]. *Physical Review D*, 2022, **106**(8): 082004

[13] FISHMAN G J, BHAT P N, MALLOZZI R, *et al*. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin[J]. *Science*, 1994, **264**(5163): 1313-1316

[14] BRIGGS M S, FISHMAN G J, CONNAUGHTON V, *et al*. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi gamma-ray burst monitor[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(A7): A07323

[15] NEUBERT T, ØSTGAARD N, REGLERO V, *et al*. A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning[J]. *Science*, 2020, **367**(6474): 183-186

[16] TSUCHIYA H, ENOTO T, YAMADA S, *et al*. Long-duration γ ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D9): D09113

[17] CHILINGARIAN A, MAILYAN B, VANYAN L. Recovering of the energy spectra of electrons and gamma rays coming from the thunderclouds[J]. *Atmospheric Research*, 2012, **114-115**: 1-16

[18] YAN Ruirui, HUANG Daihui, ZHAO Bing, *et al*. Effects of thunderstorms electric field on energy of cosmic rays at LHAASO[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 65-71

[19] VANYAN L, CHILINGARYAN A. Simulations of the Relativistic Runaway Electron Avalanches (RREA) in the thunderclouds above the Aragats space Environmental center (ASEC)[C]//Proceedings of the 32 nd International Cosmic Ray Conference. Beijing: International Cosmic Ray Conference, 2011: 338-341

[20] MA X H, BI Y J, CAO Z, *et al*. Chapter 1 LHAASO instruments and detector technology[J]. *Chinese Physics C*, 2022, **46**(3): 030001

[21] WANG P H, HUANG D H, ZHOU X X, *et al*. Characteristics of near-earth thunderstorm electric fields at LHAASO observatory[C]//Proceedings of Science. Berlin: Sissa Medialab Srl, 2022: 1-10

[22] JIA H Y, FENG L, RUFFOLO D, *et al*. Chapter 7 solar and heliospheric physics and interdisciplinary research with LHAASO[J]. *Chinese Physics C*, 2022, **46**(3): 030007

[23] HECK D, KNAPP J, CAPDEVIELLE J, *et al*. CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers [EB/OL]. [2023-02-15]. https://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php

[24] DWYER J R. A fundamental limit on electric fields in air[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(20): 2055

[25] SYMBALISTY E M D, ROUSSEL-DUPRE R A, YUKHIMUK V A. Finite volume solution of the relativistic Boltzmann equation for electron avalanche studies[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998, **26**(5): 1575-1582

[26] AXI K G, ZHOU X X, HUANG Z C, *et al*. Intensity variations of showers with different zenith angle ranges during thunderstorms[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2022, **367**(3): 30

[27] ZHOU X X, WANG X J, HUANG D H, *et al*. Effect of near-earth thunderstorms electric field on the intensity of ground cosmic ray positrons/electrons in Tibet[J]. *Astroparticle Physics*, 2016, **84**: 107-114