

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.03.017

LHAASO 实验中宇宙线次级粒子特性的模拟研究

闫瑞瑞, 赵 兵, 高兰兰, 周勋秀

(西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)位于四川稻城海子山,海拔约 4400 m,该实验采用多种手段,对进入大气层的宇宙线粒子进行精确的复合测量. 高海拔区域,雷暴天气频繁,广延大气簇射中宇宙线次级粒子的数目、方向和能量都会受到雷暴电场的影响. 本文利用 Monte Carlo 方法,模拟了宇宙线原初粒子进入大气层后的广延大气簇射过程,研究了次级粒子中光子、电子、 μ 子的纵向分布、横向分布和能量分布. 结果表明,在 LHAASO 探测面,电子的数目比 μ 子多 2~3 倍、 μ 子横向分布范围比电子宽广、 μ 子的能量比电子大. 若在雷暴期间,大气电场对电子(质量小、数目多)的影响将会更加明显. 本工作对研究雷暴电场加速宇宙线次级带电粒子的物理机制具有重要意义,同时为理解地面实验的观测现象提供有用信息.

关键词: 雷暴电场; 宇宙线; Monte Carlo 模拟; LHAASO

中图分类号: O572.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)03-0481-06

Simulation study on the characteristics of secondary cosmic ray with LHAASO

YAN Rui-Rui, ZHAO Bing, GAO Lan-Lan, ZHOU Xun-Xiu

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

Abstract: The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) is located at Haizi Mountain in Daocheng County (4400 m *a. s. l.*, Sichuan, China). This experiment is realized by using various methods for an accurate duplex measurement on the secondary cosmic rays entering the atmosphere. The thunderstorms occur frequently in high altitude areas, so the number, direction and energy of secondary particles of cosmic rays in the Extensive Air Shower (EAS) will be affected by thunderstorms electric field. In this paper, employing Monte Carlo method, we simulate the process of EAS for the primary particles cosmic rays entering the atmosphere and study the longitudinal distribution, the lateral distribution and the energy distribution of photons, electrons and muons in the secondary particles. The results show that the number of electrons on the LHAASO detector surface is 2 ~ 3 times more than that of the muons; the muons have a wide range of horizontal distribution, while the electrons are of concentrated distribution; the muon's energy is much larger than that of the electron. Considering the influence of the electric field, the effect of the electric field will be more evident on the electrons, which has tiny mass. Our simulation results are significant in studying the acceleration mechanism of secondary charged particles caused by electric field and provide important information to understand the observation of ground experiments during thunderstorms.

Keywords: Thunderstorms electric field; Cosmic rays; Monte Carlo simulations; LHAASO

收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (11475141, 11747311)

作者简介: 闫瑞瑞 (1990—), 女, 河南周口人, 硕士, 主要研究领域为天体物理.

通讯作者: 周勋秀. E-mail: zhouxx@ihep.ac.cn

1 引言

宇宙线是来自外太空的唯一微观物质样品,携带着粒子物理、高能天体物理、宇宙物质组成及宇宙演化的丰富信息. 原初宇宙线粒子进入大气层后,与空气中的原子核发生相互作用,通过强子级联簇射和电磁级联簇射,产生大量次级粒子的过程称为广延大气簇射(Extensive Air Shower, EAS). 在雷暴期间,广延大气簇射中次级带电粒子受雷暴电场的加速/减速作用,其数目、方向和能量等将会受到影响. 目前许多卫星实验已经观测到了来自地球的 γ 射线闪(Terrestrial Gamma Flashes, TGF)现象^[1-2],如 CGRO-BATSE^[3]观测到许多 TGF 现象,发现雷暴期间光子数目在增加;同时,许多地面实验也观测到了雷暴期间地面宇宙线增强(Thunderstorm Ground Enhancement, TGE)现象^[4],如 EAS-TOP^[5]、SEVAN^[6]、Baksan Carpet Array^[7]、ASEC^[8]、AS γ ^[9]观测到了 TGE 现象,即雷暴期间地面宇宙线数目在增加.

高海拔宇宙线观测站(LHAASO)是探测广延大气簇射中次级粒子的高山地面宇宙线探测阵列. 它由三个子阵列组成,其中面积最大的是地面簇射粒子阵列 LHAASO-KM2A,主要探测宇宙线次级粒子中的电子、光子和 μ 子,并且记录粒子数密度和到达时间等信息. 雷暴电场大致分布在海拔 4~12 km 的范围^[10],海拔约 4400 m 的 LHAASO 观测站为研究雷暴电场提供了有利的地理位置条件. 高海拔地区雷雨天气较多,利于研究雷暴电场对宇宙线次级粒子的影响. 宇宙线次级带电粒子的成分和极性不同,受雷暴电场的影响也不尽相同,模拟研究平静天气宇宙线次级粒子的特性,对理解宇宙线次级粒子在雷暴期间特性的变化具有非常重要的意义. 本工作模拟研究了广延大气簇射中光子、正、负电子和正、负 μ 子的分布特性,为后期研究雷暴电场对宇宙线次级粒子的影响奠定基础.

2 LHAASO 实验

LHAASO 实验位于平均海拔 4400 m 的四川稻城海子山,是国家发改委“十二五”规划规划建设的大型科学装置,投资超过 10 亿元,在 2015 年 12 月获批立项. 从云南落雪山宇宙线站为起点到西藏羊八井国际宇宙线观测站的建设,再到即将建成的 LHAASO 实验,宇宙线探测装置的海拔、面积、灵敏度都在不断的增加. 迄今为止 LHAASO 实

验是我国海拔最高、面积最广、探测灵敏度最强的地面宇宙线探测装置.

LHAASO 实验由地面簇射粒子阵列(KM2A)、水切伦科夫探测器阵列(WCDA)、广角切伦科夫望远镜阵列(WFCTA)组成,如图 1 所示. KM2A 占地面积 $1 \times 10^6 \text{ m}^2$,由 μ 子探测器(MD)和电磁粒子探测器(ED)组成,其中 MD(单个面积 36 m^2)有 1171 台,ED(单个面积 1 m^2)有 5195 台. 主要探测宇宙线次级粒子中的 μ 子、电子和光子. 在 10 TeV~20 PeV 能区开展伽马射线天文和宇宙线物理的观测研究,通过对伽马射线源宽范围能谱的精确测量研究来寻找银河宇宙线起源^[11]. WCDA 位于 KM2A 阵列中心,总面积 $7.8 \times 10^3 \text{ m}^2$,由 2 个 $2.25 \times 10^2 \text{ m}^2$ 的水池和一个 $3.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ 的水池组成,观测能区在 300 GeV~20 TeV,并具有搜寻高能伽玛暴的能力,能对甚高能伽马射线源进行全天区观测^[12]. WFCTA 由 12 台多块镜片组成的球面镜望远镜组成. 能够对宇宙射线能量光谱和成分进行精确的测量,并分段段的测量高能宇宙线(100 TeV~100 PeV)在大气簇射中产生的切伦科夫光或大气荧光^[13].

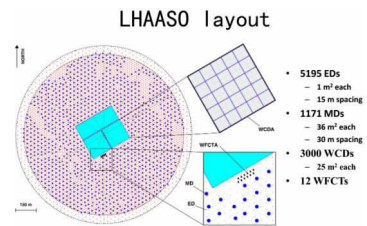


图 1 LHAASO 阵列
Fig. 1 LHAASO array

本工作模拟了原初宇宙线粒子进入大气层后所发生的广延大气簇射过程,并研究了次级粒子(光子、电子和 μ 子)的纵向分布以及到达 LHAASO 探测面的横向分布和能量分布.

3 模拟参数及结果

3.1 模拟参数

CORSIKA(Cosmic Ray Simulations for KAscade)^[14]是一个国际通用的模拟广延大气簇射的软件包,它能够详细模拟出带电原子核、中子和光子等在大气中的发展和衰减过程,同时能够输出广延大气簇射过程中产生的次级粒子类型、能量、方向等信息. 本文采用 CORSIKA75700 软件包进行广延大气簇射的模拟,高能强相互作用模型采用

QGSJETII-04, 低能模型采用 GHEISHA. 以 LHAASO 观测站为参照, 探测面高度为 4400 m. 地磁场的横向分量为 $34.6 \mu\text{T}$, 纵向分量为 $35.9 \mu\text{T}$. 宇宙线原初粒子中大部分是质子, 本文模拟了 340 万个原初质子(能量区间 $300 \sim 3000 \text{ GeV}$ 、能谱指数为 -2.7)所产生的广延大气簇射, 在模拟中电子、光子的截断能量取 1 MeV , μ 子的截断能量取 50 MeV . 通过模拟, 得到了宇宙线次级粒子的纵向分布、横向分布以及能量分布.

3.2 模拟结果

3.2.1 次级粒子的纵向分布 广延大气簇射是高能宇宙线粒子进入大气层后, 与空气中的原子核发生作用, 通过电磁级联簇射和强子级联簇射, 产生数以万计新的次级粒子. 在 EAS 发展过程中, 簇射粒子总数随着穿入大气深度的增加而剧烈增加, 同时每个粒子的平均能量逐渐降低. 因此, 到达大气深度一定值时, 簇射粒子总数达到极大值, 之后粒子数逐渐减少. 图 2 显示了次级粒子(光子、电子和 μ 子)数目随大气深度的变化.

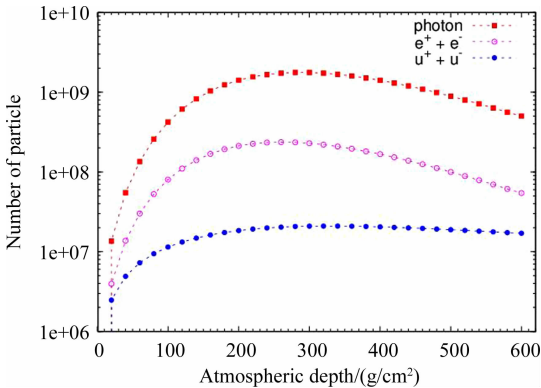


图 2 次级粒子数目随大气深度的变化
Fig. 2 Numbers of secondary particles as a function of atmospheric depth

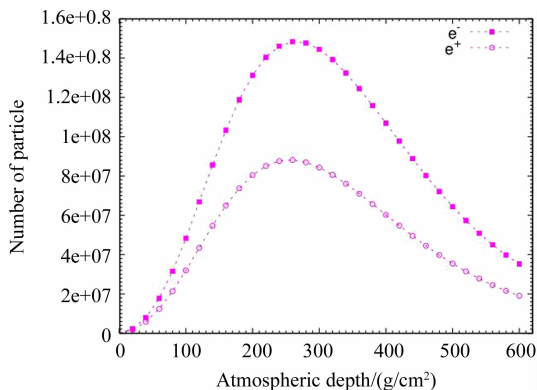


图 3 正、负电子数目随大气深度的变化
Fig. 3 Numbers of positrons and electrons as a function of atmospheric depth

由图 2 可知, 次级粒子中光子数目最多, μ 子数目最少. 光子在大气深度 300 g/cm^2 ($\sim 9.348 \text{ km}$) 时达到极大值; 电子在大气深度 260 g/cm^2 ($\sim 10.285 \text{ km}$) 时达到极大值; μ 子在大气深度 280 g/cm^2 ($\sim 9.803 \text{ km}$) 时达到极大值.

雷暴电场对宇宙线次级粒子的影响与带电粒子的极性有关. 本文模拟研究了次级粒子中正、负电子数目(见图 3 和图 4)和正、负 μ 子数目(见图 5 和图 6)随大气深度的发展情况.

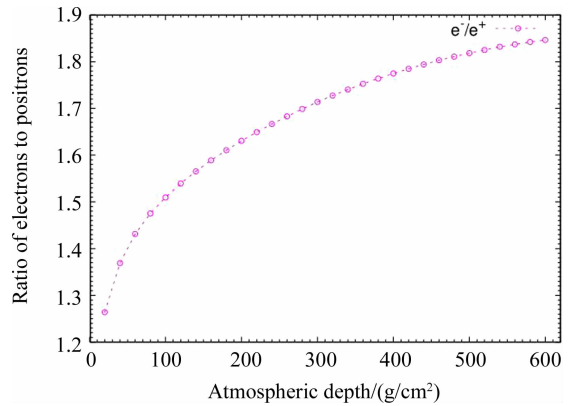


图 4 正、负电子数目比随大气深度的变化
Fig. 4 Ratio of positrons and electrons numbers as a function of atmospheric depth

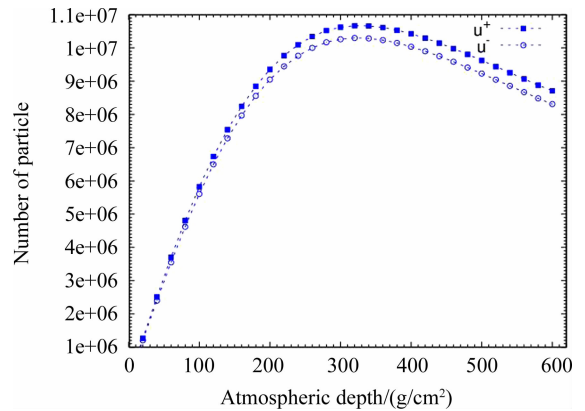


图 5 正、负 μ 子数目随大气深度的变化
Fig. 5 Numbers of muon and antimuon as a function of atmospheric depth

由图 3 和图 4 可知, 在整个广延大气簇射中, 负电子数目大于正电子数目. 随着大气深度的增加, 负电子数目与正电子数目的比值逐渐增加, 在 LHAASO 探测面(大气深度 $\sim 600 \text{ g/cm}^2$), 负电子数目是正电子数目的 1.8 倍. 这主要是由于不对称机制—康普顿散射效应(光子与空气中原子核外的电子发生弹性碰撞产生反冲的负电子)^[15-16] 导致负电子的数目比正电子多. 同时, 随着大气深

度的增加,次级粒子的能量下降,康普顿散射效应更加明显.

图 5、图 6 分别描述了次级粒子中正、负 μ 子数目随大气深度的发展情况.

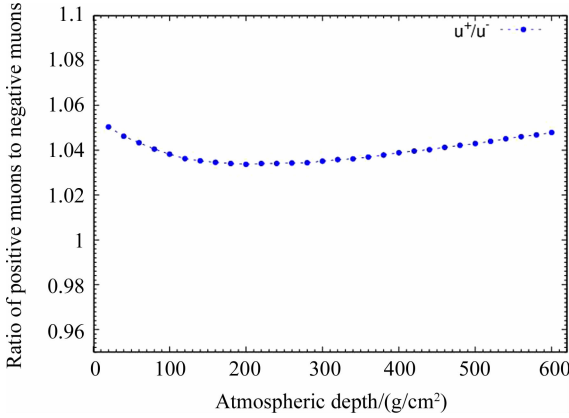


图 6 正、负 μ 子数目比随大气深度的变化

Fig. 6 Ratio of muon and antimuon numbers as a function of atmospheric depth

由图 5 和图 6 可知,正 μ 子数目略大于负 μ 子的数目. 在探测面,正、负 μ 子的比值约为 1.05.

3.2.2 次级粒子的横向分布 广延大气簇射中的次级粒子通过多次散射而横向分开,产生明显的横向分布. 在大气中次级粒子以接近光速传播,越向前推进,横向散开越广阔,最后形成中间粒子密集、边缘稀薄的圆盘状. 图 7 描述了次级粒子密度随半径的变化情况,可见,次级粒子中不同成分的横向分布是不同的.

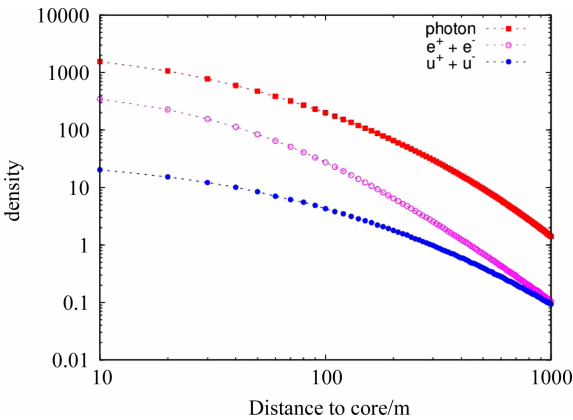


图 7 次级粒子密度随半径的变化

Fig. 7 Densities of secondary particles as a function of radius

由图 7 可知,距轴心位置的距离越大,次级粒子的密度越小. 根据电子、光子、 μ 子的密度变化曲线,可知随着半径的增大,电子密度减小的最快, μ 子密度减小的最慢. 由此得电子的分布密集, μ

子的分布较宽广.

图 8 和图 9 分别描述了正、负电子数目百分比和正、负 μ 子数目百分比随半径的变化关系.

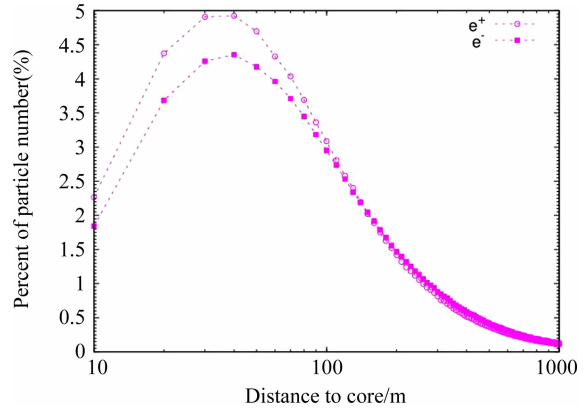


图 8 正、负电子数目百分比随半径的变化

Fig. 8 Percent changes of positrons and electrons numbers as a function of radius

由图 8 可知,在半径小于 100 m 的范围内,探测到正电子的概率比负电子的概率大. 反之,当半径大于 100 m 时,探测到负电子的概率比正电子大,由此得负电子的横向分布比正电子更宽广. 由图 9 可知,正、负 μ 子的横向分布差别不大.

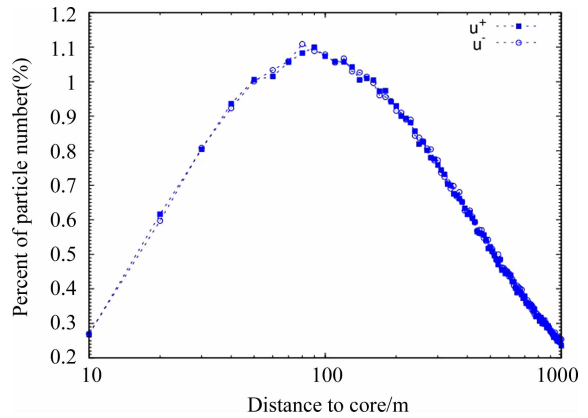


图 9 正、负 μ 子数目百分比随半径的变化

Fig. 9 Percent changes of muon and antimuon numbers as a function of radius

3.2.3 次级粒子的能量分布 图 10 描述了次级粒子数目百分比随次级粒子能量的变化情况.

由图 10 可知,光子和电子主要集中在低能段, μ 子集中在高能段. 当考虑电场的影响时,电场对能量小的带电粒子影响大,即电场对 μ 子的影响小,对电子的影响大.

图 11 和图 12 分别显示了次级带电粒子中正、负电子和正、负 μ 子的能谱分布.

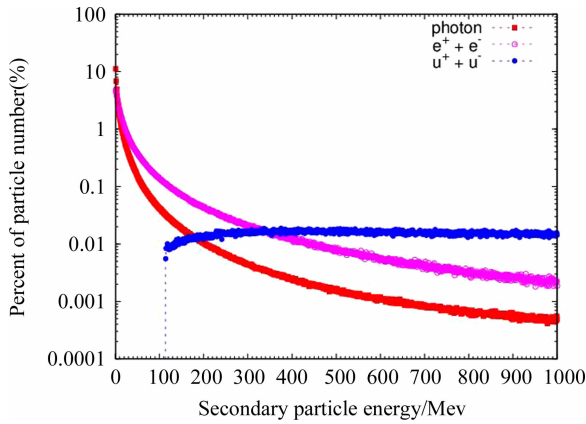


图 10 次级粒子数目百分比随次级粒子能量的变化
Fig. 10 Percent changes of secondary particles numbers as a function of secondary particles energies

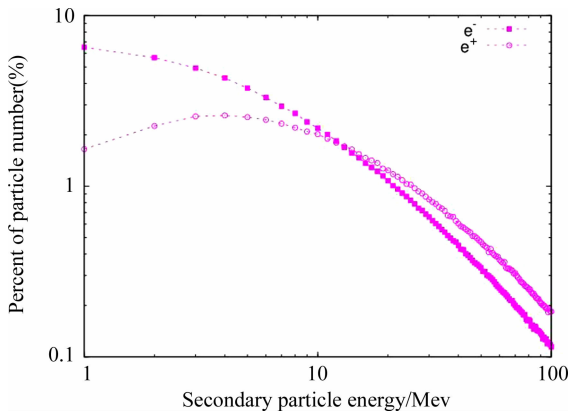


图 11 正、负电子数目百分比随次级粒子能量的变化
Fig. 11 Percent changes of positrons and electrons numbers as a function of secondary particles energies

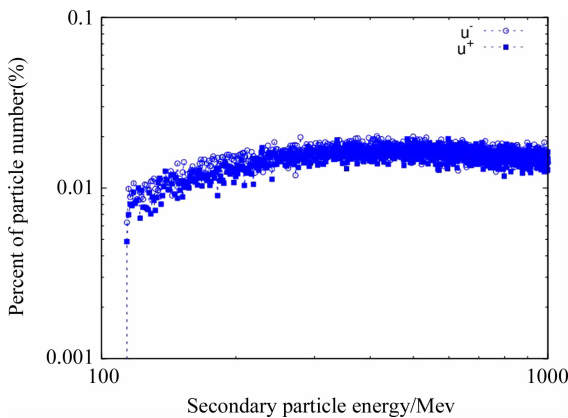


图 12 正、负 μ 子数目百分比随次级粒子能量的变化
Fig. 12 Percent changes of muon and antimuon numbers as a function of secondary particles energies

由图 11 可知,负电子的能谱比正电子软,在低能段 (<13 MeV) 的负电子占总负电子数目的百分比大于正电子所占的百分比;在 高能段 (>13 MeV) 则相反. 这是由于康普顿散射效应在能量低的范围更加明显所导致的. 由图 12 可知,正、负 μ 子的能量差别不大.

由以上研究可知,宇宙线次级粒子中电子的数目比 μ 子多,能量比 μ 子小,则电场对电子的影响将比对 μ 子的大. 负电子的数目比正电子多、能量比正电子小,则电场对负电子的影响将比正电子的大;而正、负 μ 子的数目和能量都差别不大,则电场对正、负 μ 子的影响区别不大.

4 结论

本文通过 Monte Carlo 方法^[17],利用 CORSIKA 软件包,模拟研究了宇宙线次级粒子的纵向分布,以及在 LHAASO 探测面处的横向分布和能量分布,得到以下主要结论.

次级粒子数目随大气深度的变化是先增加后减少,在整个簇射过程中,电子的数目远大于 μ 子的数目. 若考虑电场影响,由于 μ 子数目少,则电场对电子的影响将明显大于对 μ 子的影响. 在次级粒子各成分的横向分布关系中,电子在中心区域密度大,分布密集, μ 子在中心区域密度小,分布较稀疏. 则在相同的探测器面积范围内,探测到电子的概率比 μ 子大. 由能量分布可见,电子主要集中在低能段, μ 子集中在高能段. 若考虑电场影响,由于 μ 子的能量大、数目少,则电场对 μ 子的影响可以忽略.

由于康普顿散射效应导致负电子数目多于正电子数目,在 LHAASO 探测面,负电子与正电子数目比约为 1.8;负电子的能量小于正电子的能量. 则在电场中,负电子所受的影响将比正电子所受的影响大.

迄今为止,许多地面实验观测到雷暴期间宇宙线强度有增加也有下降的现象,利用相对论电子逃逸雪崩机制 (RREA) 无法完整地解释实验现象. 本文的模拟结果有利于深入理解地面宇宙线实验中的观测现象,为研究雷暴期间大气电场对宇宙线次级带电粒子的作用也具有重要意义.

参考文献:

- [1] Fishman G J, Bhat P N, Mallozzi R, *et al.* Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric ori-

- gin [J]. *Science*, 1994, 264: 1313.
- [2] Chilingarian A, Daryan A, Arakelyan K, *et al.* Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons [J]. *Phys Rev D*, 2010, 82: 043009.
- [3] 周勋秀. 用 ARGO 实验寻找 GeV-TeV 能区的 γ 射线暴 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [4] Chilingarian A, Karapetyan T, Melkumyan L. Statistical analysis of the thunderstorm ground enhancements (TGEs) detected on Mt. Aragats [J]. *Adv Space Res*, 2013, 52: 1178.
- [5] Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, *et al.* The cosmic ray primary composition in the “knee” region through the EAS electromagnetic and muon measurements at EAS-TOP [J]. *Astropart Phys*, 2004, 21: 583.
- [6] Zazyan M, Chilingarian A. Calculations of the sensitivity of the particle detectors of ASEC and SEVAN networks to galactic and solar cosmic rays [J]. *Astropart Phys*, 2009, 32: 185.
- [7] Alekseenko V V, Cherniaev A B, Djappuev D D, *et al.* 10–100 TeV cosmic ray anisotropy measured at the Baksan EAS “Carpet” array [J]. *Nucl Phys B*, 2009, 196: 179.
- [8] Chilingarian A, Karapetyan T. Calculation of the barometric coefficients at the start of the 24th solar activity cycle for particle detectors of Aragats Space Environmental Center [J]. *Adv Space Res*, 2011, 47: 1140.
- [9] 周勋秀, 胡红波, 黄庆. 用羊八井 AS γ 实验数据寻找 TeV 能区的 γ 射线暴 [J]. *物理学报*, 2009, 58: 5879.
- [10] 刘冬霞, 郗秀书, 王志超, 等. 爬线系统中的闪电辐射源分布特征及云内电荷结构讨论 [J]. *物理学报*, 2013, 62: 526.
- [11] Cao Z. A future project at tibet: the large high altitude air shower observatory(LHAASO) [J]. *Chinese Phys C*, 2010, 34: 249.
- [12] He H H. LHAASO Project: detector design and prototype [C]. *Proceedings of 31st ICRC*, 2009, 3: 2656.
- [13] Zha M. Status of the large high altitude air shower observatory project [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2012, 692: 77.
- [14] Shirasaki Y, Kakimoto F. Monte Carlo simulation of air shower development for the study of cosmic ray composition [J]. *Astropart Phys*, 2001, 15: 241.
- [15] Alexeenko V V, Khaerdinov N S, Lidvansky A S, *et al.* Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration [J]. *Phys Lett A*, 2002, 301: 299.
- [16] 张月胜, 项林川. 康普顿效应中电子-光子碰撞过程的研究 [J]. *物理与工程*, 2013, 23: 18.
- [17] 王玉杰, 冯明春, 董可秀, 等. 离子检测仪器中离子运动轨迹模拟研究 [J]. *原子与分子物理学报*, 2018, 35: 349.

引用本文格式:

中文: 闫瑞瑞, 赵兵, 高兰兰, 等. LHAASO 实验中宇宙线次级粒子特性的模拟研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 481.

英文: Yan R R, Zhao B, Gao L L, *et al.* Simulation study on the characteristics of secondary cosmic ray with LHAASO [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 481.