

雷暴电场对宇宙射线次级粒子 μ 子的影响研究*王俊芳¹⁾³⁾ 郝秀书^{1)†} 卢红²⁾ 张吉龙²⁾ 于晓霞²⁾ 石峰²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2) (中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

3) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011年10月24日收到; 2012年1月10日收到修改稿)

西藏羊八井宇宙射线观测站的中子监测器主要探测宇宙射线次级粒子中能量在 500 MeV—20 GeV 的核子成分和少量的负 μ 子成分. 本文分析了 2008—2010 年观测站附近发生的 62 次雷暴期间中子监测器和大气平均电场仪的同步观测资料, 发现 27 次雷暴期间中子监测器计数率发生明显变化, 显著性 $S > 5\sigma$, 其中 13 次变化显著, 显著性 $S > 10\sigma$. 显著性 $S > 10\sigma$ 的 13 次个例信号变化百分比与地面电场场强幅值之间存在大体一致的变化趋势, 而显著性在 $5\sigma < S < 10\sigma$ 之间的 14 次个例信号变化百分比与地面电场场强幅值之间不存在相似的变化趋势. 较强雷暴当顶时中子监测器计数率变化一般不明显, 而中子监测器计数率变化明显的个例则多发生于雷暴云不当顶, 但探测器仍处于雷暴云下部正电荷层的控制范围之内时, 或者当顶雷暴处于形成或消散阶段. Dorman 等把雷暴期间中子监测器计数率的变化归因于雷暴云内电场对宇宙射线次级粒子 μ 子的作用, 并建立了雷暴期间中子监测器计数率变化与雷暴地面电场相关联的理论. 本文分析发现雷暴期间羊八井中子监测器计数率变化与地面电场场强之间相关性较小或者没有相关性, 不支持 Dorman 的理论.

关键词: 雷暴, 地面电场, 中子监测器, 宇宙线

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

1 引言

雷暴常伴随强烈的起电和雷电活动, 雷电作为一种重要的天气灾害也受到广泛的关注, 并已有许多研究结果^[1-5]. 雷暴云内的电场可以超过 200 kV/m^[6-8], 1924 年 Wilson^[9] 指出雷暴云电场可以把宇宙射线次级粒子中质量很小的电子加速到相对论能量, 并认为电子的加速可能会造成雷暴期间电子数及电子韧致辐射产生的光子数的增加. 之后很多学者开展了雷暴云电场与高能电子或高能光子的同步观测, 但早期的观测结果自相矛盾, 不能明确地支持 Wilson 的猜测. 从 1980 年开始 Parks, Eack 等利用飞机和气球开展的穿云探测确定地发现了与雷暴和闪电有关的高能辐射现

象^[10-13]. 近年来, Brunetti, Yoshida, Tsuchiya, Torri 等在地面的观测中也发现了雷暴期间电子或高能光子计数率的变化^[14-17], 这些观测结果进一步证实雷暴云电场确实能够对宇宙射线中质量较小的电子产生可观测的影响.

1971 年 Attolini 等^[18] 发现雷暴期间宇宙射线次级粒子 μ 子的计数率发生变化, 之后 Dorman 等^[19] 和 Muraki 等^[20] 也观测到了类似的结果. Alexeenko 等^[21] 经过仔细研究后指出这一变化利用温度、压强等气象因素无法解释, Dorman 等^[19] 认为是雷暴云电场对 μ 子的加速或者减速造成了 μ 子计数率的变化, 并建立了雷暴期间地面电场与 μ 子计数率变化相关联的理论. Dorman 的工作拓展了 Wilson 的猜测: 雷暴电场可能对宇宙射线次级粒子中质量较大的 μ 子具有可观测的影响.

* 国家自然科学基金 (批准号: 40774083, 40930949) 资助的课题.

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

羊八井 (90°53'E, 30°13'N) 位于青藏高原东南部, 海拔 4300 m, 相应的大气深度 603 g/cm^2 (海平面大气深度为 1033 g/cm^2), 垂直截止刚度 14.1 GV, 这里地势平坦, 视野开阔, 冬无积雪, 非常适合宇宙射线的观测 [22]. 1990 年羊八井国际宇宙射线观测站建立, 1998 年羊八井中子监测器投入运行 [23]. 受印度洋暖湿气流和高原上众多高大山脉的影响, 青藏高原中南部地区夏季雷暴和闪电活动较多 [24,25]. 为了研究青藏高原雷暴和闪电特征, 特别是雷暴对高能粒子的可能影响, 2008 年中科院大气物理研究所与中科院高能物理研究所合作, 在羊八井宇宙射线观测站安装了大气平均电场仪, 闪电快、慢电场变化仪等观测设备, 共同开展了宇宙射线和雷暴电场、闪电电场变化 [26] 和短基线时间差闪电定位 [27] 的联合观测, 发现中子监测器计数率在雷暴

期间有明显变化.

2 实验装置

羊八井中子监测器由 28 只 NM-64 型中子计数管组成, 主要探测宇宙射线次级粒子中能量在 $500 \text{ MeV}—20 \text{ GeV}$ 的核子成分和少量的负 μ 子成分, 时间分辨率 1 s, 用 GPS 时钟记录时间. 羊八井中子监测器计数率达到 $10^5/\text{min}$ 量级, 在全球所有正在运行的大约 60 个中子监测器中, 羊八井中子监测器是海拔高度最高、每分钟计数最高的中子监测器, 是世界公认的最重要的中子监测器之一. 图 1 是 2010 年 5 月 1 日羊八井中子监测器 1 min 和 5 min 的累积计数率, 均经过气压修正, 从图 1 可以发现中子监测器计数率具有很大的涨落.

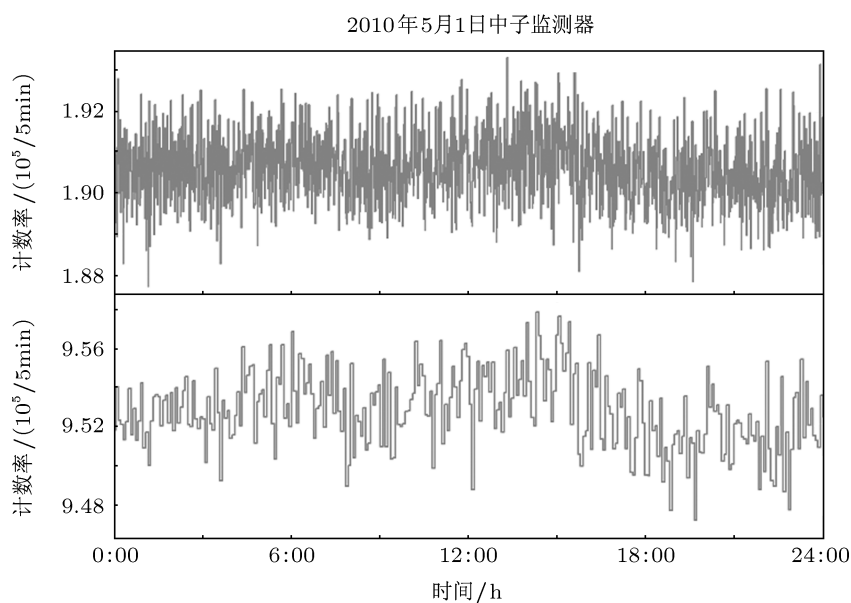


图 1 2010 年 5 月 1 日羊八井中子监测器累积计数率变化 (a) 1 min 累积计数率; (b) 5 min 累积计数率

大气平均电场仪用来监测地面附近的平均电场强度和极性, 仪器设计有两个量程, 10 kV/m 用于观测晴天电场, 100 kV/m 用于观测雷暴电场, 响应时间 0.1 s, 利用高时间精度的 GPS 时钟与中子监测器进行时间同步. 羊八井地区晴天地面附近的垂直电场值一般不到 100 V/m , 当雷暴云经过时由于雷暴云中电荷和闪电的作用, 地面电场可以达到 60 kV/m 甚至更高. 图 2 是 2010 年 5 月 9 日电场仪记录的一次过顶雷暴的电场,

设定晴天电场方向为正, 即头顶正电荷在地面产生正极性电场. 这次雷暴持续时间约 1 h, 电场演变曲线上脉冲式电场变化由闪电引起, 闪电之间的电场最大值达到 $+60 \text{ kV/m}$, 从电场的发展变化可以大概推测出这次雷暴具有典型的三极性电荷结构 [1,28,29], 下部正电荷层较强, 因此雷暴当顶时, 地面电场主要由下部正电荷区控制, 云闪主要发生在中间正电荷层和下部负电荷层之间 [29].

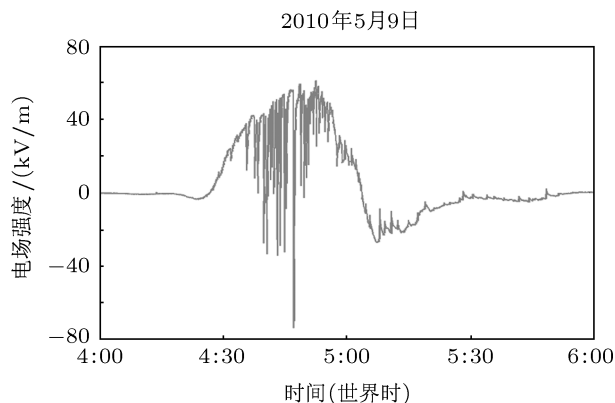


图2 2010年5月9日经过羊八井测站的一次雷暴地面电场

3 分析方法介绍

中子监测器探测宇宙射线次级粒子中能量在 500 MeV—20 GeV 的核子成分和少量的负 μ 子成分. 中子监测器和大气气体成分中原子核的放射性衰变以及宇宙线其他成分其他能量部分的粒子构成观测结果的本底, 而宇宙射线次级粒子中能量在 500 MeV—20 GeV 的核子成分和少量的负 μ 子成分的计数率与本底计数率相比流强较弱. 很高的本底计数和相对较少的宇宙线信号计数使得对信号的分辨和分析十分困难. 分析观测结果时, 必须小心地扣除掉这些本底以及观测过程中的其他系统误差因素, 否则会造成不正确的甚至虚假的分析结果. 对于信号, 即在连续本底上形成的计数率变化的峰和谷必须进行显著性分析, 以估计其可靠性和显著性. 宇宙线信号显著性分析的方法有很多, 有的由于没有完全考虑或正确考虑影响观测结果的各种统计因素而高估或低估了信号的显著性, 有的方法缺乏数理统计学的依据^[30]. 迄今为止, 分析宇宙线信号显著性的方法中, Li-Ma 公式是较为常用的经验公式, 下面对 Li-Ma 公式做简单介绍^[30]:

设中子监测器在 t_{off} 时间内本底计数为 N_{off} , 在 t_{on} 时间内本底计数和信号计数的总和为 N_{on} , 则信号计数的估计值为

$$N_s = N_{\text{on}} - \alpha N_{\text{off}}, \quad (1)$$

其中, $\alpha = t_{\text{on}}/t_{\text{off}}$.

所以信号计数的标准误差估计值为

$$\hat{\sigma}(N_s) = \sqrt{N_{\text{on}} + \alpha^2 N_{\text{off}}}. \quad (2)$$

信号的显著性公式为

$$S = \frac{N_s}{\hat{\sigma}(N_s)} = \frac{N_{\text{on}} - \alpha N_{\text{off}}}{\sqrt{N_{\text{on}} + \alpha^2 N_{\text{off}}}}. \quad (3)$$

假定不存在宇宙线信号, 中子监测器测到的只有本底, N_{on} 和 N_{off} 都只有本底计数. 设在 t_{on} 时间内本底计数的平均值为 $\langle N_B \rangle$, 则宇宙射线事件发生时中子监测器的计数 (t_{on} 内实际测到的粒子数) N_{on} 应服从平均值和方差为 $\langle N_B \rangle$ 的泊松分布, 本底计数 N_{off} 应服从平均值和方差为 $\langle N_B \rangle / \alpha$ 的泊松分布. 所以, 事件的标准误差为

$$\hat{\sigma}(N_s) = \sqrt{(1 + \alpha)\langle N_B \rangle}. \quad (4)$$

对本底做出更精确的估计, 即事件发生时间 t_{on} 内本底粒子计数 $\langle N_B \rangle$ 的估计值应为

$$\begin{aligned} \langle N_B \rangle &= \frac{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} t_{\text{on}} \\ &= \frac{\alpha}{1 + \alpha} (N_{\text{on}} + N_{\text{off}}). \end{aligned} \quad (5)$$

所以, 测得的事件显著性为

$$S = \frac{N_s}{\hat{\sigma}(N_s)} = \frac{N_{\text{on}} - \alpha N_{\text{off}}}{\sqrt{\alpha(N_{\text{on}} + N_{\text{off}})}}. \quad (6)$$

(6) 式就是 Li-Ma 公式, 表示信号计数是信号计数标准差 (σ) 的 S 倍, S 即显著性, S 等于多少表示多少倍的 σ . S 越大表示信号越明显, 一般规定 $S > 5\sigma$ 是信号而非涨落.

利用蒙特卡罗模拟计算检验 (6) 式的可用性, 发现按 (6) 式计算得到的显著性在统计误差范围内与模拟结果基本一致^[30]. 在宇宙射线领域内分析信号显著性的过程中, Li-Ma 公式逐渐成为较常用的方法. 本文采用这一分析方法对雷暴期间中子监测器计数率的变化进行显著性分析.

本文计算和统计以下六个反映信号基本特征的物理量:

1) 信号的显著性 S : 本文中 t_{off} 取信号发生前 60 min 和信号发生后 60 min 计数率变化比较平缓的时间段, 即 t_{off} 取 120 min, N_{off} 取 t_{off} 内计数率的总和. 经过试验发现: 计数率变化比较平缓的时间内 t_{off} 取值的位置不同计算得到的显著性差别小于 0.05.

2) 信号最大 (小) 值与平均值的百分比 A : 计算 t_{off} 时间内计数率的平均值, 即本底平均计数率 I_{av} , 并根据本底平均计数率 I_{av} 计算信号的最大 (小) 值 ($I_m - I_{\text{av}}$) 与本底平均计数率的百分比

$$A = \frac{\Delta I_m}{I_{\text{av}}} \times 100\% = \frac{I_m - I_{\text{av}}}{I_{\text{av}}} \times 100\%, \quad (7)$$

其中 I_m 是计数率变化的最大(小)值.

3) 信号持续时间 Δt : 利用 Li-Ma 公式分析信号的显著性, 显著性 $S > 5\sigma$ 被视为信号. 起止时间的选取不同, 计算得到的显著性的数值不同, 取数值最大的为信号的显著性, 相应的起止时间为信号的起止时间, 起止时间之差为信号的持续时间.

4) 信号的计数率之和与相同时间内本底平均计数率之和的百分比 B : 信号发生时, 每分钟内探测器的计数与本底平均计数率之差 ($I_n - I_{av}$) 是每分钟内信号的计数, 即信号的计数率. 信号发生的时间内, 信号计数率之和与相同时间内本底平均计数率之和的百分比为

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\int_0^{\Delta t} \Delta I(t) dt}{I_{av} \Delta t} \times 100\% \\
 &= \frac{\sum_{n=1}^m (I_n - I_{av})}{m I_{av}} \times 100\% \\
 &= \frac{(I_1 + I_2 + \dots + I_m) - m I_{av}}{m I_{av}} \times 100\% \\
 &= \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_m - I_{av}}{m I_{av}} \times 100\% \\
 &= \frac{\bar{I} - I_{av}}{I_{av}} \times 100\%, \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中 I_{av} 是本底平均计数率; I_n 是探测器在信号第 n 分钟内的计数, 包括本底计数和信号计数, 即探测器的实际计数; m 表示信号持续的时间(多少分钟); \bar{I} 是信号持续时间内探测器计数率的算术平均值, 即 I_n 的算术平均值.

5) 信号持续时间内雷暴地面电场平均值 \bar{E} : 计算信号持续时间内雷暴地面电场的算术平均值.

6) 信号变化百分比

$$\frac{\Delta I}{I_{av}} = \frac{I - I_{av}}{I_{av}} \times 100\%, \tag{9}$$

其中 I 是信号每分钟的计数, 即信号计数率. 如果某次信号持续 n 分钟, 通过计算可以得到这次信号的 n 个信号变化百分比.

4 中子监测器计数率变化个例分析

4.1 显著性 $S > 10\sigma$ 个例

2008 年 8 月—2010 年 10 月共记录到较近和当顶雷暴 62 次, 分析羊八井中子监测器数据, 发

现 27 次雷暴期间中子监测器计数率发生明显变化, 显著性大于 5σ , 即有将近一半的雷暴过程中子监测器计数率发生明显变化, 其中 13 次个例显著性超过 10σ . 图 3 给出了显著性大于 10σ 的 2 次个例的计数率和地面电场随时间的变化图, 图中阴影标明了计数率发生明显变化的时间段. 从图 3 可以发现计数率发生明显变化期间地面电场均有明显变化, 但是电场幅值的变化较小, 表示中子监测器附近有雷暴活动, 但雷暴不当顶或当顶的雷暴较弱.

表 1 给出了中子监测器信号显著性大于 10σ 的 13 次个例的基本特征参量, 包括信号显著性 S 、信号持续时间 Δt 、信号最大(小)值与平均值的百分比 A 、信号计数率总和与信号持续时间内平均计数率总和的百分比 B 、信号持续时间内电场仪测得的地面电场平均值 \bar{E} .

通过统计发现, 中子监测器计数率发生显著变化的 13 次个例的计数都是增加, 信号持续时间最长达 43 min, 最短 8 min, 几何平均值 15.1 min, 算术平均值为 16.9 min; 信号峰值与平均值的百分比最大 2.7%, 最小 1.3%, 几何平均值 1.73%, 算术平均值 1.77%; 信号计数率总和与相同时间内本底平均值总和百分比最大值为 1.6%, 最小值为 0.6%, 几何平均值 0.93%, 算术平均值为 0.97%.

对信号变化百分比与地面电场平均值之间的关系进行分析. 图 4 是显著性 $S > 17\sigma$ 的 2010 年 8 月 23 日 (20.0σ), 2010 年 9 月 24 日 (18.5σ) 和 2010 年 7 月 22 日 (17.8σ) 三次雷暴期间电场强度与信号变化百分比的趋势图, 从图中可以发现信号变化百分比大体上随着电场强度的增大而增加. 图 5 是 2010 年 9 月 19 日 (15.8σ) 电场强度与信号变化百分比的变化趋势图, 信号变化百分比大体上随着电场强度的负向增大而增加, 即信号变化百分比随着电场强度幅值的增大而增加. 图 6 是显著性大于 10σ 的 13 次个例信号变化百分比与地面电场变化趋势图, 分布于正电场和负电场的点都较多, 计数率变化百分比大体上随着地面电场场强幅值的增大而增加. 图 4、图 5 和图 6 中点的分布很散, 说明雷暴期间地面电场与中子监测器信号变化之间不存在较强的关联, 仅存在大体一致的变化趋势.

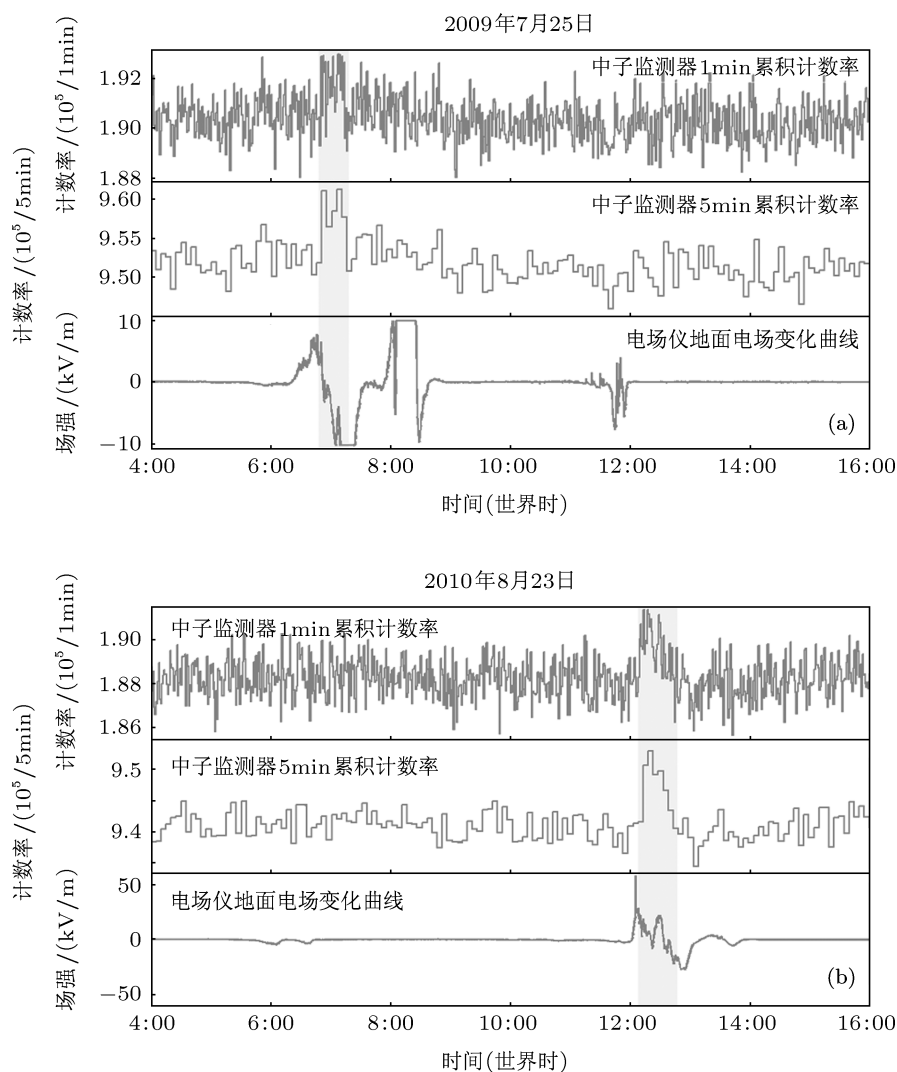


图3 羊八井雷暴期间中子监测器计数率有显著变化的2次个例的计数率和地面电场演变图(上图: 1 min 计数率, 中图: 5 min 计数率, 下图: 地面电场)

表1 雷暴期间中子监测器计数显著性超过 10σ 的13次个例特征参量

序号	雷暴发生时间	S	信号持续时间 /min	$A/\%$	$B/\%$	$\bar{E}/(\text{kV/m})$
1	2009.07.19	23.1	12	2.7	1.6	有正有负
2	2010.08.23	20.0	22	1.7	1.1	9.65
3	2010.09.24	18.5	18	2.3	1.1	20.4
4	2010.07.22	17.8	10	2.0	1.4	22.67
5	2010.09.19	15.8	19	1.6	1.0	-13.14
6	2009.08.02	15.1	13	1.7	1.0	有正有负
7	2009.07.25	13.8	24	1.3	0.7	多为负值
8	2010.07.06	13.6	43	1.4	0.6	-5.73
9	2009.07.02	13.5	12	2.0	0.9	有正有负
10	2009.09.06	12.5	17	1.8	0.7	多为正值
11	2008.09.15	11.4	8	1.5	1.0	11.8
12	2010.08.04	10.1	11	1.3	0.7	0.31
13	2008.09.29	10.1	10	1.7	0.8	5.54

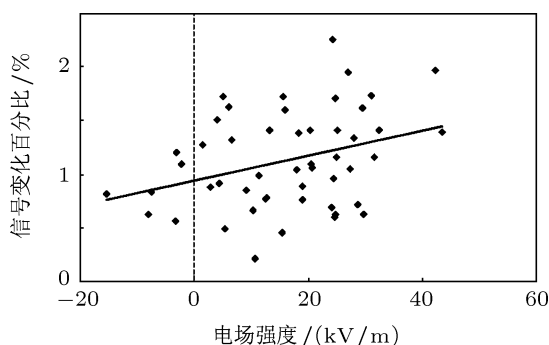


图4 2010年8月23日(20.0 σ), 2010年9月24日(18.5 σ)和2010年7月22日(17.8 σ)雷暴地面电场强度与信号变化百分比变化趋势散点图

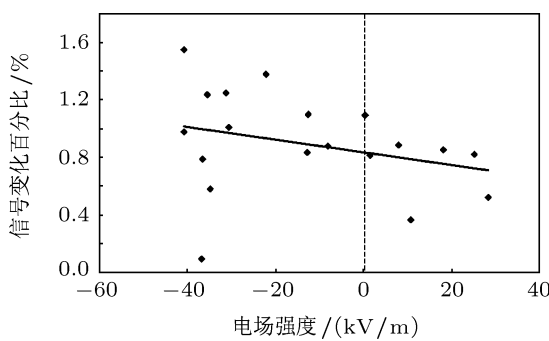


图5 2010年9月19日(15.8 σ)雷暴地面电场强度与信号变化百分比变化趋势散点图

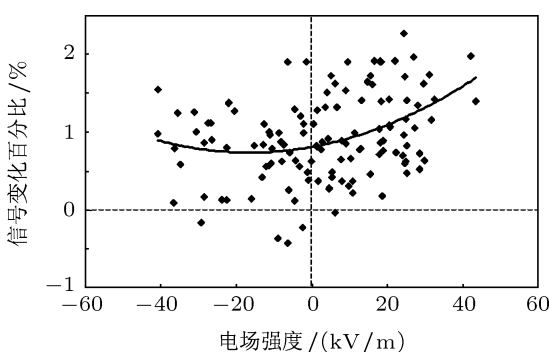


图6 $S > 10$ 的13次个例信号变化百分比与雷暴地面电场强度变化趋势散点图

对显著性大于 10σ 的 13 次信号的主要特征进行总结, 发现有以下主要特征: 1) 信号的计数率变化都是增加; 2) 较强的当顶雷暴期间计数率一般没有明显变化, 计数率发生明显变化时地面

电场有明显变化但电场幅值变化较小; 3) 信号发生时地面电场多数为正; 4) 信号多数并不持续发生于整个雷暴期间, 也不一定发生于雷暴地面电场最强的时间内; 5) 信号计数率变化与地面电场幅值之间不存在较强的关联, 仅存在计数率变化随着地面电场幅值增大而增加的大体一致的变化趋势.

4.2 显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 个例

对雷暴期间中子监测器计数率变化进行分析, 发现有 14 次个例计数率变化较明显, 显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$. 图 7 给出了其中的 2 次计数率和地面电场随时间的变化图.

经过统计, 14 次个例基本特征参量列于表 2. 从表 2 可以发现, 与显著性大于 10σ 的 13 次个例不同, 显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 的 14 次个例中有 8 次计数率变化是减少, 6 次是增加, 减少的个例超过一半. 信号持续时间最长达 34 min, 最短 7 min, 几何平均值 14.7 min, 算术平均值 16.5 min. 计数率增加的个例计数率最大值与平均值百分比最大为 1.6%, 计数率减少的个例计数率最小值与平均值百分比的绝对值最大为 1.5%. 信号计数率增加时, 信号的计数率之和与相同时间内本底平均计数率之和的百分比的最大值为 0.7%; 信号计数率减少时, 信号的计数率之和与相同时间内本底平均计数率之和的百分比绝对值最大为 0.9%.

从 14 次计数率较明显变化个例的统计结果可以发现以下几个特征与计数率变化显著个例的特征类似: 1) 计数率发生明显变化时地面电场有明显变化, 但变化的幅值较小; 2) 多数计数率变化并不发生于整个雷暴期间, 仅发生于其中的一段时间内, 也不一定发生于雷暴期间地面电场最强的时间段内; 3) 计数率变化较明显的过程中地面电场多数为正. 以下特征与计数率变化显著的个例不同: 1) 显著性 $S > 10\sigma$ 个例的计数都为增加, 而显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 个例计数多数是减少; 2) 对 14 次 $5\sigma < S < 10\sigma$ 信号的计数变化百分比与地面电场之间的关系进行分析发现计数变化与雷暴地面电场强度之间不存在大体一致的变化趋势.

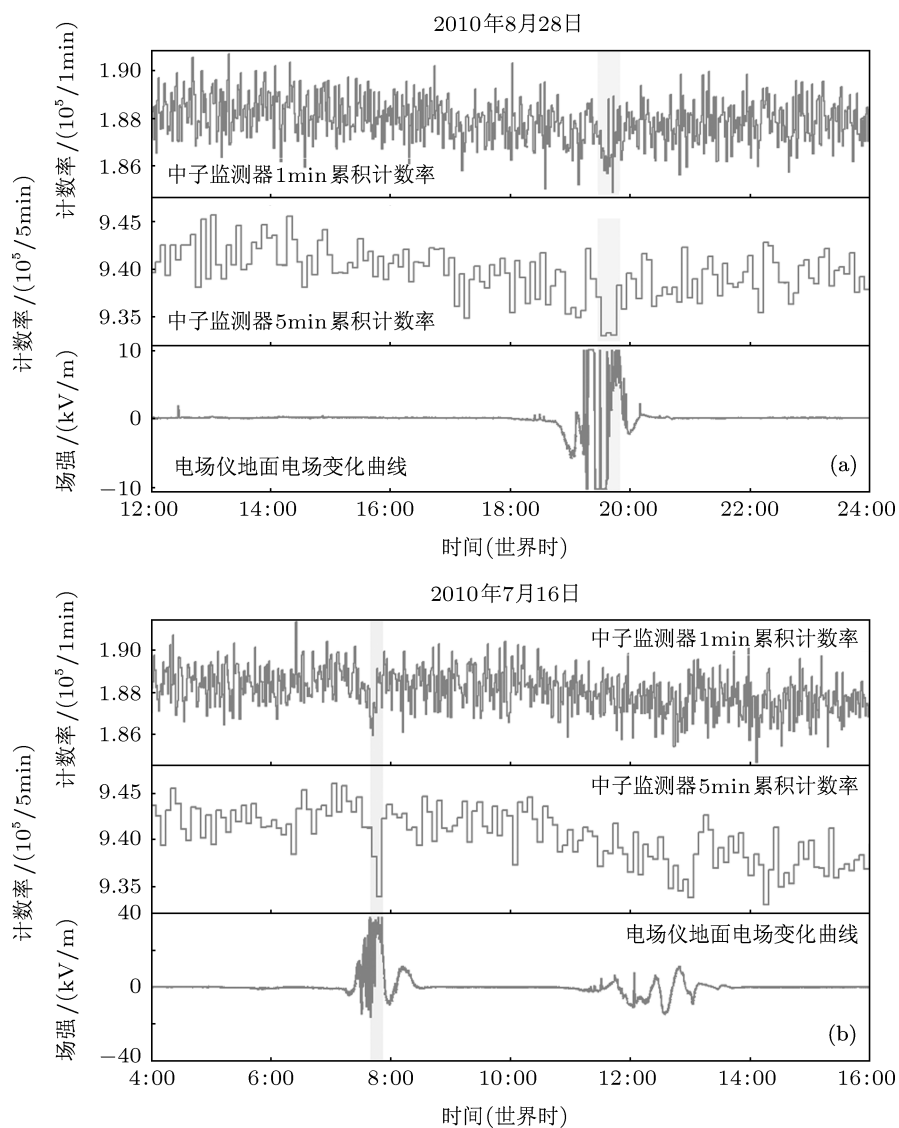


图7 雷暴期间中子监测器计数率变化较明显的2次个例(上图: 1 min 计数率, 中图: 5 min 计数率, 下图: 地面电场)

表2 雷暴期间中子监测器计数显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 的14次个例的特征参量

序号	信号发生时间	S	信号持续时间	$A/\%$	$B/\%$	$\bar{E}/(\text{kV/m})$
1	2010.08.28	9.9	14	-1.5	-07	有正有负
2	2009.08.27	9.9	22	-1.1	-0.5	有正有负
3	2010.08.29	9.78	19	1.1	0.6	正的居多
4	2010.07.16	9.7	7	-1.3	-09	26.77
5	2010.09.15	9.7	26	1.6	0.5	0.08
6	2010.09.08	9.4	13	1.4	.6	5.04
7	2009.08.06	8.9	22	1.4	0.5	有正有负
8	2009.06.28	8.2	8	1.3	0.7	有正有负
9	2010.09.10	7.9	14	1.1	0.5	11.98
10	2010.05.24	7.8	14	-1.3	-0.5	-2.88
11	2009.06.06	7.7	34	-1.3	-0.3	3.77
12	2010.05.24	7.7	8	-1.2	-0.6	10.91
13	2010.08.28	7.1	22	-1.4	-04	负的居多
14	2010.09.08	5.1	8	-1.4	-0.4	-8.79

4.3 地面电场与计数率变化的关系

资料分析发现雷暴当顶时计数率一般没有明显变化, 而计数率发生明显变化期间地面电场有明显变化但电场幅值变化较小. 中子监测器计数率发生明显变化的 20 次个例期间雷暴地面电场极性与计数率变化情况之间的关系列于表 3. 从表 3 可以发现, 中子监测器计数率发生变化时地面电场的极性 60% 为正, 10% 在正负 1 kV/m 之内, 即接近于 0, 30% 的地面电场的极性为负. 可见地面电场为负的情况仅占少数, 多数个例发生时地面电场为正. 结合表 3 的分析结果与前面资料分析的结果, 可以知道中子监测器计数率变化时多数雷暴可能不当顶但距离探测器不会太远, 中子监测器处于雷暴云下部正电荷的控制范围之内; 也可能当顶雷暴处于形成或消散阶段.

表 3 20 次个例计数率变化与地面电场平均值之间特征统计

	正电场	负电场	电场接近 0 (-1 kV/m—+1 kV/m 之间)	总数
增加	9	3	2	14
减少	3	3	0	6
总数	12	6	2	20

5 雷暴对宇宙射线次级粒子的影响机理讨论

中子监测器探测宇宙射线次级粒子中的负 μ 子成分和能量在 500 MeV—20 GeV 的核子成分. Dorman 等^[19] 认为雷暴期间中子监测器计数率的变化主要由负 μ 子受到雷暴云电场的影响引起, 而核子成分的质量和能量很大, 雷暴云电场的影响可以忽略不计. 2003 年 Dorman 等^[19] 建立了雷暴地面电场与负 μ 子计数率变化相关联的理论, 并利用 Emilio Segre 地面大气平均电场仪和中子监测器的同步资料对理论进行验证, 发现理论与观测结果符合的较好. 本文的资料分析发现中子监测器计数率变化与雷暴云地面电场的幅值、极性之间不存在明显相关, 与 Dorman 的理论不符. Dorman 理论成立的前提是雷暴地面电场与对负 μ 子发生作用的雷暴云中电场之间存在较强的关联, 这个条件对于羊八井地区的雷暴不成立. 电场仪测量的是雷暴云所有电荷及闪电引起的电场在观测点矢量叠加的垂直分量, 又由于雷暴云不同极性电荷区域的存在, 受到距雷暴云距离的影响, 地面电场还存在

极性反号距离, 利用电场仪资料只能大体判断雷暴发生的起止时间和雷暴的强弱, 多数的情况下地面电场与云中电场之间很难存在确定的相关. Dorman 的计算结果发现电场仪探测的地面电场值与计数率之间存在较好的相关, 这是由于 Emilio Segre 的雷暴持续时间一般在七八个小时甚至十几个小时, 雷暴云电荷层水平尺寸较大, 云中电场和地面电场相对比较均匀, 所以 Emilio Segre 雷暴地面电场与云中电场有一定的关联. 羊八井地区雷暴云持续时间一般仅有 1 h 左右^[31], 并且水平尺寸较小, 造成地面电场变化迅速, 云内电场与地面电场之间不存在较强的关联应该是必然的结果. 羊八井中子监测器雷暴期间信号变化百分比与地面电场之间不存在较强的关联, 仅存在大体一致的变化趋势, 可能是这一结果的证据. 雷暴期间中子监测器计数率变化的物理本质是否仅由雷暴电场引起? 是否还有其他的原因? 根据目前资料分析的结果还无法确定. 进一步的工作拟在宇宙射线程序中加入雷暴电场对这一问题进行数值研究, 并根据羊八井中子监测器在雷暴期间计数率变化的具体观测结果对数值结果进行修正和检验, 以对这一问题有更深入的认识.

6 结论

利用 2008 年 8 月—2010 年 10 月 62 次雷暴期间羊八井雷暴电场和中子监测器的观测数据, 初步分析了雷暴电场对宇宙射线次级粒子 μ 子的可能影响, 发现在 27 次雷暴期间中子监测器的计数率发生明显变化, 显著性 $S > 5\sigma$, 其中 13 次显著性 $S > 10\sigma$. 主要结论如下:

1. 显著性 $S > 10\sigma$ 的 13 次信号的持续时间最长达 43 min, 最短 8 min, 几何平均值 15.1 min; 信号变化峰值与平均值的百分比最大 2.7%, 最小 1.3%, 几何平均值 1.72%; 信号计数率变化总和与相同时间内计数率平均值总和和百分比的最大值为 1.6%, 最小为 0.6%, 几何平均值 0.93%; 显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 的 14 次个例中 8 次计数率是减少, 减少的个例超过 50%. 信号持续时间最长达 34 min, 最短 7 min, 几何平均值 14.7 min.

2. 较强的当顶雷暴期间计数率变化一般不明显, 计数率变化明显的信号多出现于雷暴云不当顶但探测器仍处于雷暴云下部正电荷层的控制范围

之内时, 或当顶雷暴处于形成或消散阶段.

3. 显著性 $S > 10\sigma$ 的 13 次个例计数率变化都是增加, 而显著性 $5\sigma < S < 10\sigma$ 的 14 次个例计数率变化减少居多.

4. 信号变化百分比与地面电场强度之间不存在明显相关, 显著性 $S > 10\sigma$ 的个例信号变化百分比与地面电场强度之间仅存在一致的变化趋势.

应该说明的是, 本文利用的中子监测器资料的时间分辨率是 1 min, 即最小的时间窗口是 1 min. 利用 1 min 窗口分析持续时间短于 1 min 的信号会

低估其显著性, 造成持续时间短于 1 min 的很多信号被忽略, 因此羊八井地区雷暴期间中子监测器计数率发生变化的个例应多于本文发现的数目. 本文虽然定性讨论了本文结果与 Dorman 理论的差异, 但是雷暴对宇宙射线次级粒子 μ 子影响机理更深入的讨论、以及雷暴期间持续时间更短的信号特征等都还需要进一步的详细研究.

感谢西藏羊八井宇宙射线国家野外科学观测研究站提供的观测条件和实验站工作人员的大力协助.

- [1] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 邴秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [2] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 邴秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [3] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 邴秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [4] Zhao X Y, Yuan P, Wang J, Shen X Z, Guo Y X, Qiao H Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3243 (in Chinese) [赵学燕, 袁萍, 王杰, 申晓志, 郭逸潇, 乔红贞 2009 物理学报 **58** 3243]
- [5] Guo 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]
- [6] Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, Bruning E, MacGorman D R, Hamlin T 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L04804
- [7] Zhao Z K, Qie X S, Zhang T L, Zhang T, Zhang H F, Wang Y, She Y, Sun B L, Wang H B 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 872
- [8] Li W L, Liu D X, Qie X S, Fu S M, Chen Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 059202 (in Chinese) [李万莉, 刘冬霞, 邴秀书, 傅慎明, 陈羿辰 2012 物理学报 **61** 059202]
- [9] Wilson C T R 1924 *Proc. Phys. Soc. London* **37** 32D
- [10] Parks G K, Mauk B H, Spiger R, Chin J 1981 *Geophys. Res. Lett.* **8** 1176
- [11] McCarthy M P, Parks G K 1985 *Geophys. Res. Lett.* **12** 393
- [12] Eack K B, Beasley W H, Rust W D, Marshall T C, Stolzenburg M 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 29637
- [13] Eack K B, Suszcynsky D M, Beasley W H, Roussel-Dupre R, Symbalisty E 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 185
- [14] Brunetti M, Cecchini S, Galli M, Giovannin G, Pagliarini A 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 1599
- [15] Tsuchiya H, Enoto T, Torii T, Nakazawa K, Yuasa T, Torii S, Fukuyama T, Yamaguchi T, Kato H, Okano M, Takita M, Makishima K 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 255003
- [16] Yoshida S, Morimoto T, Ushio T, Kawasaki Z I, Torii T, Wang D, Takagi N, Watanabe T 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L10804
- [17] Torii T, Sugita T, Tanabe S, Kimura Y, Kamogawa M, Yajima K, Yasuda H 2009 *Geophys. Res. Lett.* **36** L13804
- [18] Attolini M R, Cecchini M G, Guidi I 1971 *Lett. Nuovo Cimento Soc. Ital.* **1** 716
- [19] Dorman L I, Dorman I V, Iucci N, Parisi M, Ne'eman Y, Pustil'nik L A, Signoretti F, Sternlieb A, Villorosi G, Zukerman I G 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1181
- [20] Muraki Y, Axford W I, Matsubara Y, Masuda K, Miyamoto Y, Menjyou H, Sakakibara S, Sako T, Takami T, Yamada T, Shibata S, Munakata Y, Munakata K, Yasue S, Sakai T, Mitsui K, Fujimoto K, Flückiger E 2004 *Phys. Rev. D* **69** 123010
- [21] Alexeenko V V, Chernyaev A B, Chudakov A E, Khaerdinov N S, Ozrokov S K, Sborshikov V G 1987 *Conf. Pap. Int. Cosmic Rays, 20th* **4** 272
- [22] Lu H, Zhao L 2010 *Journal of Engineering Studies—The engineering in interdiscipline horizon* **2** 53 (in Chinese) [卢红, 赵琳 2010 工程研究——跨学科视野中的工程 **2** 53]
- [23] Tan Y H 2007 *Modern Physical Knowledge* **19** 3 (in Chinese) [谭有恒 2007 现代物理知识 **19** 3]
- [24] Qie X, Toumi R, Yuan T 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 4551
- [25] Qie X S, Yuan T, Xie Y R, Ma Y M 2004 *Chinese Journal of Geophysics* **47** 997 (in Chinese) [邴秀书, 袁铁, 谢毅然, 马耀明 2004 地球物理学报 **47** 997]
- [26] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Wang J F, Liu D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 邴秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 王俊芳, 刘冬霞 2011 物理学报 **60** 079201]
- [27] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* (in press) **61** 069202 [曹冬杰, 邴秀书, 段树, 宣越建 2012 物理学报 **61** 069202]
- [28] Qie X, Zhang T L, Zhang G, Zhang T, Kong X 2009 *Atmos Res.* **91** 244
- [29] Qie X, Zhang T L, Chen C, Zhang G, Zhang T, Wei W 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L05814
- [30] Li T P, Ma Y Q 1983 *The Astrophysical Journal* **272** 317
- [31] Wang J F, Cao D J, Lu H, Wang D F 2011 *Plateau Meteorology* **3** 831 (in Chinese) [王俊芳, 曹冬杰, 卢红, 王东方 2011 高原气象 **3** 831]

Effect of thunderstorm electric field on intensity of cosmic ray muons*

Wang Jun-Fang¹⁾³⁾ Qie Xiu-Shu^{1)†} Lu Hong²⁾ Zhang Ji-Long²⁾
Yu Xiao-Xia²⁾ Shi Feng²⁾

1) (*Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

2) (*Key laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 24 October 2011; revised manuscript received 10 January 2012)

Abstract

Neutron monitor (NM) in Yangbajing Cosmic Ray Observatory mainly detects nucleus components with energy in a range of 500 MeV—20 GeV and a small number of negative muons. On the basis of synchronous data of neutron monitor and atmospheric electric field during 62 thunderstorms from 2008 to 2010, obvious changes of NM counting rate during 27 thunderstorms with significance greater than $S > 5\sigma$ are found, and among them, 13 cases with significance greater than $S > 10\sigma$. A coincident approximate change trend is found between counting rate change percentage and atmospheric electric field amplitude for 13 cases with significance $S > 10\sigma$. However no obvious coincident change trend is found for 14 cases with significance $5\sigma < S < 10\sigma$. Obvious changes of counting rate do not occur when thunderstorm is just over electric field mill, however obvious changes occur when electric field mill is not exactly below thunderclouds but in the control of bottom positive charge layer. Dorman put forward the theory that NM counting rate changes are correlated with the atmospheric electric field, thus they attributed the former to the acceleration of the electric field to negative muons inside thunderstorms. However, there is found no evident correlation between NM counting rate change and the atmospheric electric field in this paper, so our experiment does not support Dormanetal's theory.

Keywords: thunderstorm, the ground electric field, neutron monitor, cosmic ray

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40774083, 40930949).

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn