

WANG Shihan, LI Lei, CHEN Tao, SONG Jiajun, TI Shuo, LI Wen, LUO Jing, SU Jianfeng, CAI Chunlin, LI Renkang, WU Han. Characteristics of Fair-weather Atmospheric Electric Field in Tibetan Ngari Prefecture (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1137–1144. DOI:10.11728/cjss2022.06.211115116

西藏阿里地区的晴天大气电场特征^{*}

王诗涵^{1,2} 李磊^{1,2} 陈涛¹ 宋佳军³
提炼¹ 李文¹ 罗静¹ 苏建峰¹
蔡春林¹ 李仁康⁴ 吴晗⁵

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院电工研究所 北京 100190)

4(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)

5(南方科技大学地球与空间科学学院 深圳 518055)

摘要 晴天大气电场是一个区域大气电场变化的基准场,是大气电场特性的研究基础。对于具有不同地质条件、地理环境和地形特点的区域,晴天大气电场特征具有明显区别。利用在西藏阿里地震台(80.12°E, 32.51°N)安装的一台场磨式大气电场仪于2021年10月10日至2021年11月10日观测到的数据,通过对大气电场数据建模与分析,结合气象条件,得到西藏阿里地区23天晴天条件下的平均卡耐基曲线。经过平滑处理去除仪器噪声的波动,得到西藏阿里地区的晴天条件下的标准卡耐基曲线,进而与北京市昌平区十三陵观测台站(116.23°E, 40.25°N)同期的晴天大气电场特征进行对比,并对其电场特性差异和原因进行了讨论。研究结果对分析高原地区晴天大气电场特征具有重要的参考价值和科学意义。

关键词 晴天大气电场, 西藏阿里地区, 卡耐基曲线

中图分类号 P353

Characteristics of Fair-weather Atmospheric Electric Field in Tibetan Ngari Prefecture

WANG Shihan^{1,2} LI Lei^{1,2} CHEN Tao¹ SONG Jiajun³ TI Shuo¹
LI Wen¹ LUO Jing¹ SU Jianfeng¹ CAI Chunlin¹
LI Renkang⁴ WU Han⁵

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA17010301, XDA17040505, XDA15052500, XDA15350201), 国家自然科学基金项目(41874175, 41931073), 国家重点实验室专项基金项目, 中国科学院国家空间科学中心重点培育方向与攀登计划主任基金项目(E0PD41A11S), 国家重大科技基础设施子午工程项目和云南省基础研究青年项目(2019FD111)共同资助

2021-11-12 收到原稿, 2022-05-05 收到修定稿

E-mail: xutwsh3@126.com. 通信作者 陈涛, E-mail: tchen@nssc.ac.cn

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(College of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

5(Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055)

Abstract Fair-weather atmospheric electric field is the benchmark field of atmospheric electric field variation in a region, and is the basis for studying the characteristics of the atmospheric electric field in the region. However, it is significantly different for different geological conditions, different geographical environments and topography. The research team of Meridian Project of National Space Science Center of Chinese Academy of Sciences has installed a mill-type atmospheric electric field meter at Tibetan Ngari Prefecture seismic station (80.12°E, 32.51°N), and this paper is mainly based on the atmospheric electric field observation data of this meter from 10 October 2021 to 10 November 2021, through the data modeling and analysis of the atmospheric electric field meter, combined with the analysis of meteorological conditions. The average Carnegie curves were obtained for 23 days of clear sky conditions in Tibetan Ngari Prefecture region. In order to obtain the standard Carnegie curve, the curve was smoothed to remove the fluctuation of the instrument noise, and then the characteristics of the fair-weather atmospheric electric field in Tibetan Ngari Prefecture region were summarized and compared with the fair-weather Carnegie curve of Beijing Changping District XIII Ling Observatory (116.23°E, 40.25°N), and its characteristics and reasons were discussed. It has important reference value and scientific significance to study the characteristics of the electric field in the plateau region.

Key words Fair-weather atmospheric electric field, Ngari Prefecture in Tibet, Carnegie curve

0 引言

大气电场是大气电学的物理参数,对于地震预警、雷电与电磁脉冲探测、电波传播、空间天气现象等研究具有重要科学和工程意义。影响大气电场的因素很多,包括太阳活动^[1]、天气条件^[1-3]、大气污染物^[4]、场地周围环境^[5]等。按照不同天气条件下的大气电场,可分为晴天大气电场和扰动大气电场,其中晴天大气电场具有明显的日变化特征^[2,5-7]和年变化特征^[8]。有关大气电场的测量研究,包括大气电场云体带电、闪电放电、保障运载火箭发射^[9-13]、震前大气电场异常^[14-23]以及特殊地形大气电场高度分布等^[24,25],但由于观测条件的限制,对于大气电场的变化规律依然缺乏系统、全面了解。

青藏高原大气电场已有很多相关研究。Zhou等^[3]利用1998年4—9月间进行的大气平均电场观测实验,结合GAME-TIBET青藏高原云和降水的多

普勒雷达,研究了青藏高原那曲地区冰雹天气条件下的大气电场特征;Zhang等^[26]对青藏高原东部地区的大气电场特征进行了分析,总结得出青藏高原东部地区不同天气条件下的大气电场特征,其中晴天大气电场呈单峰单谷型,在04:00—05:00 BLT(北京时间)左右为峰值,约为 $320\sim 340\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$,在17:00—18:00 BLT左右为谷值,约为 $60\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。此外,国内外研究者基于卡耐基曲线对不同地区和观测时间的大气电场的特征进行了相关研究。例如Burns等^[8]在南极洲的沃斯托克(78.5°S, 107°E)进行了长期的大气电场观测研究,选取了1998—2002年期间收集到720天晴天条件的大气电场数据,详细分析了该地区的晴天大气电场日变化、季节变化和年变化特点。Helin等^[27]在奥地利距离盖斯堡塔170 m的高山上进行了晴天大气电场观测,对于不同地形的观测结果进行了比较分析,并对由于地形因素产生的修正系数进行了讨论。Wu等^[2]利用在北京大学物理楼楼顶观测的2004

年 8 月—2005 年 11 月大气电场资料, 讨论分析了不同天气条件下近地面大气电场特征, 其中北京地区晴天条件下卡耐基曲线呈双峰双谷, 谷值分别出现在 05:00 BLT 和 12:00 BLT, 峰值分别出现在 07:00 BLT 和 23:00 BLT。

对大气电场日变化的研究, 通过对比不同区域的大气电场卡内基曲线, 可以计算出由地形、地质条件决定的当地因子, 有利于将地质条件、当地环境对大气电场的调制作用与太阳活动、地质活动的电场信号分离开, 对于研究一个区域大气电场特征是具有重要意义的。本文通过对西藏阿里地区 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日期间 23 天晴天数据进行处理, 得到晴天条件下大气电场在这段时间内的平均卡耐基曲线。考虑到仪器的噪声扰动, 对该曲线进行了平滑处理, 给出了西藏阿里地区晴天条件下的大气电场特征, 并与北京市昌平区十三陵观测台站于 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日期间的 21 天晴天大气电场卡耐基曲线相比较, 并对其电场特性差异的原因进行了分析和讨论。

1 观测设备与条件

1.1 观测设备

阿里地区位于中国西藏自治区西部、青藏高原北部, 山脉众多, 平均海拔高度大于 4500 m。全年气候寒冷干燥, 日夜温差大, 降雨量偏少, 降水主要集中在 5—9 月, 占全年降水量的 80% 以上。阿里地区地域辽阔、人烟稀少, 外界干扰少, 适合用于大气电场的相关观测研究。

在西藏自治区阿里地区噶尔县狮泉河镇阿里地震台 (80.12°E, 32.51°N, 海拔 4259 m) 的主楼楼顶 (距离地面约 3 m) 安装了一台 FAMEMS-DF02 场磨式大气电场仪, 该电场仪为场磨式结构, 测量范围是 $-50 \sim +50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 测量精确度 $< 30 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, 分辨率 $10 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, 功耗 $\leq 5 \text{ W}$, 由太阳能电池板提供 12 V 的稳压电源, 电场仪探头高度为 1.5 m。FAMEMS-DF02 场磨式大气电场仪主要由探头、主机箱、太阳能电池板、固定支架、天线 5 部分组成。打开开关, 电场仪探头内部扇叶开始高速旋转, 采集大气电场信息, 大气电场数据通过 RS232 模块送至主机箱内的

4G 通信模块, 通过移动网络发至服务器, 计算机终端从服务器上实时获取数据, 以 .dat 文件格式保存, 每秒钟记录一个时间点和对应的电场数据, 每天的电场数据生成一个文件。

1.2 观测条件

研究晴天大气电场的特征, 对于“晴天”这一概念必须有清楚、明确的定义。国外相关领域的专家给出了一些“晴天”定义, Harrison 等^[28]定义晴天能见度在 2 km 以上, 相对湿度小于 95%, 没有降水, 没有 1500 m 以下的低层云, 近地面的风速介于 $1 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间; Latha^[29]将满足天空中的云量小于 3/8、风速小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、没有降水的天气条件定义为晴天; Israelsson 等^[30]在瑞典马斯塔天文台进行大气电的观测实验中, 由于缺乏相应的气象数据, 因此把电场值在 $0 \sim 250 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间的天气条件看作晴天。参考上述的晴天定义, 在本文中, 以无降水、平均风速小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、相对湿度小于 95% 的天气条件作为晴天判别条件。通过中国气象数据网^{*}获得狮泉河气象台 (站台编号: 55228) 的逐小时气象数据, 包括降水量、风速、相对湿度数据, 筛选出 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日期间有 23 天为晴天, 将对应的 23 天大气电场数据挑选出来, 作为晴天条件下的大气电场数据, 进而对其特征进行分析讨论。

2 观测数据建模与分析

对于任何电子系统, 在进行测量时会不可避免地引入噪声, 假设各采样时刻的噪声独立同分布^[31]; 其幅度服从均值为 0, 方差均为 σ^2 的 Gauss 分布, 即

$$f(w_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{w_n^2}{2\sigma^2}}, \quad \forall n \in \mathcal{N}^*,$$

$$f(\mathbf{w}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^N e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N w_n^2},$$

$$E(\mathbf{w}\mathbf{w}^T) = \sigma^2 \mathbf{I}_{N \times N}. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$, $\mathbf{I}_{N \times N}$ 表示 N 维单位阵。 $\mathcal{N}^*$ 表示正整数集。

目标具有如下特性: 噪声与目标信号不相关, 即

$$E(A_m w_n) = 0, \quad \forall m, n \in \mathcal{N}^*. \quad (2)$$

^{*}<http://data.cma.cn/>

其中, A_m 和 w_n 分别表示在 m 和 n 时刻的信号和噪声, $E(\cdot)$ 为期望算子。

信号为二阶宽平稳过程, 即

$$E[A(t)A(t+\tau)] = R_A(\tau). \quad (3)$$

考虑加性噪声, 则每个采样时刻的观测值应为

$$x_n = A_n + w_n. \quad (4)$$

为了得到尽可能接近真实值的数据, 需要通过 x 对 A 进行估计。为便于计算, 通常将信号的估计值选取为多次测量值的线性组合, 即

$$\hat{A} = \sum_{n=1}^N a_n x_n = \mathbf{a}^T \mathbf{x}. \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [a_1, a_2, \dots, a_N]^T, \\ \mathbf{x} &= [x_1, x_2, \dots, x_N]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

上述估计应满足: 估计的方差应达到最小, 且权重之和应归一化。于是, 可以通过下面的条件极值问题对权重进行求解:

$$\begin{aligned} \min D(\hat{A}), \\ \text{s.t. } \mathbf{a}^T \mathbf{e} = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{e}$ 表示元素全为 1 的 $N \times 1$ 列向量。于是, 可构造 Lagrange 函数

$$L = D(\hat{A}) - \lambda(\mathbf{a}^T \mathbf{e} - 1). \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} D(\hat{A}) &= D\left(\sum_{n=1}^N a_n x_n\right) = \sum_{n=1}^N D(a_n x_n) = \\ &= \sum_{n=1}^N a_n^2 D(A + w_n) = \sigma^2 \sum_{n=1}^N a_n^2 = \sigma^2 \mathbf{a}^T \mathbf{a}. \end{aligned} \quad (9)$$

令

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{a}} = 2\mathbf{a} - \lambda \mathbf{e} = 0. \quad (10)$$

满足 $\mathbf{a}^T \mathbf{e} = 1$, 解得

$$\mathbf{a} = \frac{1}{N} \mathbf{e}. \quad (11)$$

即信号估计值为

$$\hat{A} = \mathbf{a}^T \mathbf{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n. \quad (12)$$

对于观测向量 $\mathbf{x}$, 由于各次观测相互独立, 故各次观测联合概率分布为

$$f(\mathbf{x}, A) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^N e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N (x_n - A)^2}. \quad (13)$$

于是可以获得该估计的 Fisher 信息量与估计均值, 分别可以表示为

$$E\left[\frac{\partial^2 \ln f(\mathbf{x}, A)}{\partial A^2}\right] = -\frac{N}{\sigma^2}, \quad (14)$$

$$E(\hat{A}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(x_n) = A. \quad (15)$$

而

$$\begin{aligned} E(\hat{A})^2 &= E\left[(\mathbf{a}^T \mathbf{x})(\mathbf{a}^T \mathbf{x})^T\right] = \\ &= \mathbf{a}^T E(\mathbf{x} \mathbf{x}^T) \mathbf{a} = \\ &= \sigma^2 \mathbf{a}^T \mathbf{I}_{N \times N} \mathbf{a} = \frac{\sigma^2}{N}. \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{I}_{N \times N}$ 表示 N 维单位阵, 有

$$\begin{aligned} E(\hat{A})^2 &= -\frac{1}{E\left(\frac{\partial^2 \ln f(\mathbf{x}, A)}{\partial A^2}\right)}, \\ E(\hat{A}) &= A. \end{aligned} \quad (17)$$

即将各次观测值取算术平均, 可以得到真实信号的最小方差无偏估计(MVUE), 且该最小方差达到 Crammer-Rao 下界(CRLB), 即得到真实信号的最优线性无偏估计(BLUE)。

考虑观测量的自相关函数

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= E\{[A(t) + w(t)][A(t + \tau) + \\ &w(t + \tau)]\} = R_A(\tau) + \frac{N_0}{2} \delta(\tau). \end{aligned} \quad (18)$$

其中, N_0 为噪声功率。不难看出, 如果不对信号进行平均处理, 则观测量的自相关函数应当具有冲激特性, 而通过观测量的算术平均对信号进行估计后, 其自相关函数如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 在对观测量取平均后, 其自相关函数不含冲激特性, 即噪声干扰 N_0 得到抑制。

对自相关进行傅里叶变换可得功率谱, 有

$$P_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = P_A(f) + \frac{N_0}{2}. \quad (19)$$

从图 2 所示的功率谱中可以看出: 经过平均处理, 噪声的功率被抑制到 10^{-7} 量级, 相对于信号衰减了约 60 dB。即对观测数据取平均后, 抑制了噪声的影响, 所得数值更加接近真实信号。

3 卡耐基曲线

对于阿里地震台 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日期间的 23 天晴天大气电场数据, 首先对每分钟的数据进行平均, 然后将 23 天的晴天大气电场数据按相应时刻再平均, 得到西藏阿里地区的原始平均卡耐基曲线。为了对比研究和深入探索空间辐射环境特征, 在北京市昌平区十三陵地震台(116.23°E, 40.25°N, 海拔 198 m)的主楼楼顶上(距离地面约 3 m)也安装了一台 FAMEMS-DF02 场磨式大气电场仪, 该电场仪与阿里地震台的大气电场仪型号、性能完全相同。选用与西藏阿里地震台相同日期的 21 天晴天大气电场数据, 采样相同的数据处理方法, 得到北京昌平原始平均卡耐基曲线。

图 3 分别给出了西藏阿里地区(蓝线)和北京昌平(红线)的原始平均卡耐基曲线。在图 3 中, 横轴表示的是北京时间(UTC+8, 由于经度差别, 2021 年

10—11 月阿里地区的日出时间比北京地区晚 2 小时 10 分钟左右, 其日落时间比北京地区晚 2 小时 30 分钟左右), 纵轴代表测得的垂直方向上的大气电场值, 单位为 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。图中的两条曲线就是平均后得到的大气电场平均卡耐基曲线。对比图 3 中的两条曲线, 西藏阿里地区的大气电场值明显高于北京昌平地区, 且其主要特征具有明显差异。此外, 由图 3 可以看出, 仪器存在噪声干扰(通常为高斯白噪声), 测量的数据中有轻微由仪器噪声引起的干扰波动, 但与大气电场数值相比较小。在对信号进行估计的基础上, 为了进一步降低噪声影响, 将阿里地区和北京昌平地区的平均大气电场卡耐基曲线平滑后得到的标准卡耐基曲线如图 4 所示, 其中蓝色曲线为阿里地区平滑后的标准卡耐基曲线, 红色曲线为北京昌平地区平滑后的

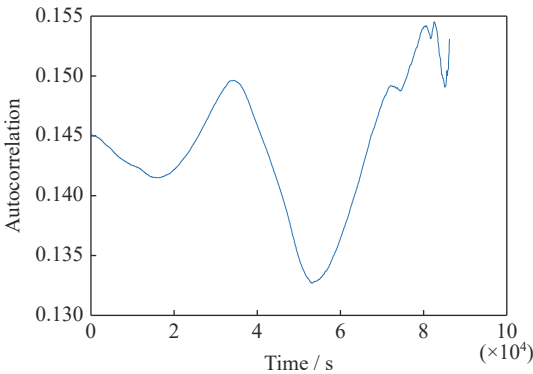


图 1 信号估计值的自相关函数

Fig. 1 Autocorrelation function of estimated signal

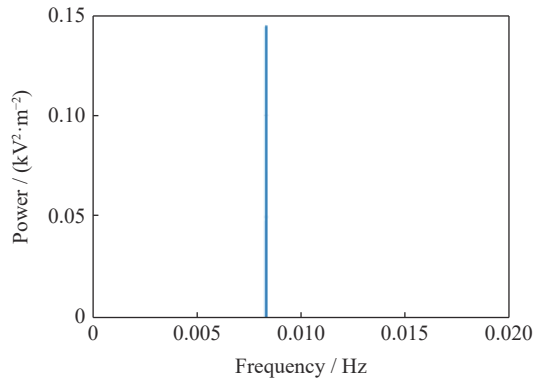


图 2 估计信号的功率谱

Fig. 2 Power spectrum of estimated signal

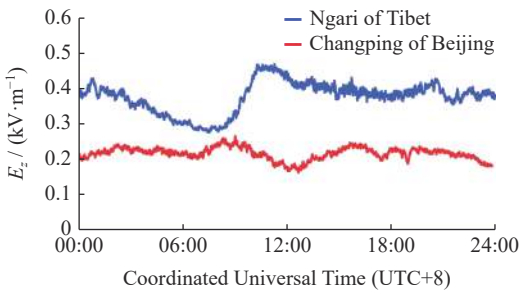


图 3 西藏阿里地区与北京昌平地区大气电场 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日的晴天平均卡耐基曲线

Fig. 3 Average Carnegie curve of the atmospheric electric field in Ngari Prefecture of Tibet and Changping, Beijing from 10 October to 10 November 2021

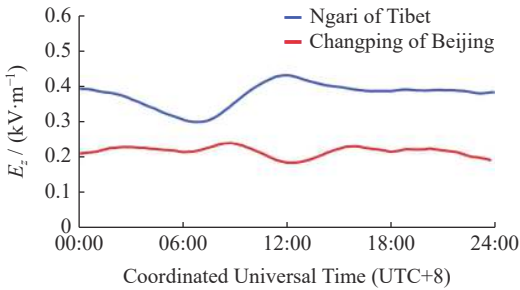


图 4 西藏阿里地区与北京昌平地区 2021 年 10 月 10 日至 2021 年 11 月 10 日平滑后的标准大气电场卡耐基曲线

Fig. 4 Standard atmospheric electric field Carnegie curve after smoothing from October 10 to November 10, 2021 in Ngari Prefecture, Tibet and Changping, Beijing

的标准卡耐基曲线。

图4的横、纵坐标意义与图3一致,是图3经过平滑处理后的结果。由图4可以看出,在西藏阿里地区,该曲线整体上呈现单峰、单谷的特点,谷值出现在早上7时左右,峰值出现在12:00 BLT左右。07:00 BLT至12:00 BLT,电场值增大至峰值 $0.43 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$;中午12时至次日早上7时,空气中的气溶胶成分相对稳定,大气电场缓慢降低至7:00 BLT的谷值 $0.3 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。通过计算得到,西藏阿里地区的大气电场卡耐基曲线平均电场值为 $0.38 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

图4中西藏阿里地区的卡耐基曲线呈现单峰、单谷规律的主要原因分析如下:近地面的传导电流近似为固定常数,由广义欧姆定律 $J = \sigma E$ (其中 J , σ , E 分别为晴天大气电流、电导率和电场)可得:近地面晴天大气电流近似为常数时,大气电场与电导率成反比。当气溶胶浓度增大时,大气重离子浓度随之增大,而大气电导率与大气轻离子浓度呈正相关,所以大气电导率随之减小,进而大气电场也就增大。因此,近地面大气电场与近地面的气溶胶浓度呈现正相关^[32]。对于西藏阿里地区,在凌晨至早上7时左右,近地面气溶胶浓度不断下降,大气电场也随之下降,至早上7时出现第一谷值。而后,由于热对流和湍流垂直输送作用不断加强,使得近地面大气中气溶胶浓度增大,地面气溶胶浓度迅速出现峰值,与大气电场的峰值对应。然后,由于热对流和湍流垂直输送较为旺盛,大量的气溶胶不断向上输送,使得下午至晚上期间地面气溶胶浓度缓慢下降直到第二天上午。

北京昌平地区的卡耐基曲线整体上呈现双峰、双谷的特点,两次峰值分别约在09:00 BLT和16:00 BLT,两次谷值分别出现在12:00 BLT和24:00 BLT。从00:00 BLT至09:00 BLT,气溶胶在近地面聚集增大,大气电场随之增大,在09:00 BLT时出现第一次峰值,为 $0.24 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,09:00—12:00 BLT时,由于太阳辐射作用,热对流和湍流垂直输送作用旺盛,气溶胶向上输送其溶度不断降低,大气电场缓慢下降至 $0.19 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 达到第一次谷值,然后12:00—16:00 BLT,由于垂直输送作用气溶胶浓度再次增大,大气电场也再次出现快速增大的趋势,16:00 BLT达到第二次峰值,约为 $0.23 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,在16:00—24:00 BLT,大气逐渐趋于稳定,气溶胶浓度缓慢下降,大气电场也再次缓慢下降至第二次的谷值,约为 $0.19 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,24时之

后直到次日凌晨大气电场缓慢上升。通过计算得到,北京昌平地区的大气电场卡耐基曲线平均电场值为 $0.22 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。对比北京昌平地区的卡耐基曲线两个峰值和谷值发现:中午的谷值与晚上的大气电场谷值接近,上午的大气电场峰值与下午的电场峰值也基本相等。

4 结论与讨论

通过对西藏阿里地震台和北京昌平十三陵地震台2021年10月10日至2021年11月10日期间的晴天同期大气电场数据的对比分析,发现西藏阿里地区的卡耐基曲线与北京市昌平地区主要存在以下三方面差别。

(1)西藏阿里地区与北京市昌平地区的卡耐基曲线属于两种不同类型。西藏阿里的卡耐基曲线是单峰单谷,而北京市昌平的曲线是双峰双谷。造成两种不同类型的因素主要由当地的地形和环境因素决定:西藏阿里偏僻,远离人口密集的大城市,远离气溶胶源,而北京昌平与之相反,因此北京昌平的气溶胶变化比西藏阿里更为复杂,卡耐基曲线变化也就相对复杂。两个地区的不同气溶胶浓度变化特性决定了大气电场的卡耐基曲线明显不同。

(2)横轴都表示的是北京时间,但两条卡耐基曲线的峰值、谷值出现的时间点有明显差别,这主要是由于经度差别,2021年10—11月阿里地区的日出时间比北京地区晚2小时10分钟左右,其日落时间比北京地区晚2小时30分钟左右,日出日落时间决定了气溶胶含量的垂直输送强度和ación,进而影响了卡耐基曲线的峰值、谷值时间点。

(3)西藏阿里地区与北京昌平地区的卡耐基曲线除了主要趋势、峰谷时间点不同之外,其平均值也有很大差别,西藏阿里地区比北京昌平的晴天大气电场平均值高约 $0.16 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。其原因是西藏阿里的海拔比北京昌平高出4000 m左右,高海拔特征会造成等电位面的起伏和畸变,等势线会被压缩,因此海拔高的地区大气电场基准值比海拔低的地方更大。

通过文中对从西藏阿里地区2021年10月10日至2021年11月10日期间23天晴天平均卡耐基曲线进行分析、处理,并与北京市昌平十三陵观测台站同期观测数据的卡耐基曲线对比,得出以下结论:不

同于北京市昌平区的双峰双谷特点, 西藏阿里地区由于远离人口密集的大城市、远离气溶胶源, 其卡耐基曲线变化更为简单, 呈现单峰单谷的特点; 西藏属于高原地区, 由于海拔比北京昌平地区高出 4000 m 左右, 大气电场等势线被压缩, 西藏阿里地区的大气电场日均值为 $0.38 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 北京昌平地区的大气电场日均值是 $0.22 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 西藏阿里地区比北京昌平的晴天大气电场平均值高约 $0.16 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

该文详细地分析了西藏阿里地区的卡耐基曲线, 总结出了西藏阿里地区的晴天大气电场特征。比较了西藏阿里地区和北京昌平的晴天大气电场特征的差异, 并对其原因进行了详细分析讨论, 实验结果和结论对研究高原地区的晴天大气电场特征具有重要的参考价值和科学意义。

致谢 西藏地震台甘茂老师对此项工作给予了支持和协助, 中国气象数据网提供了狮泉河气象台气象数据, 子午工程对该项目给予特别支持。

参考文献

- [1] YAN Muhong, SHEN Qiaonan, ZHOU Chunke, *et al.* Relationship between the solar activities and the thunderstorm activities, the atmospheric electric field at ground in partial region in China[J]. *Plateau Meteorology*, 1988, **7**(2): 156-165 (言穆弘, 申巧南, 周春科, 等. 我国部分地区雷暴活动、大气电场等与太阳活动的关系[J]. *高原气象*, 1988, **7**(2): 156-165)
- [2] WU Ting, LÜ Weitao, LIU Xiaoyang, *et al.* Characteristics of atmospheric electric field near the earth's surface under different weather conditions in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, **20**(4): 394-401 (吴亭, 吕伟涛, 刘晓阳, 等. 北京地区不同天气条件下近地面大气电场特征[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(4): 394-401)
- [3] ZHOU Yunjun, CHEN Chengpin, LIU Liping, *et al.* The characteristics of electric field of hailstorm weather in Nagqu area of Qinghai-Xizang plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2000, **19**(3): 339-347 (周筠珩, 陈成品, 刘黎平, 等. 青藏高原那曲地区冰雹天气系统中的大气电场[J]. *高原气象*, 2000, **19**(3): 339-347)
- [4] ZHANG Huaming, ZHANG Yijun, YANG Shigang, *et al.* Characteristics of atmospheric electric field in Taiyuan and its relationship with atmospheric pollutants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(9): 66-69 (张华明, 张义军, 杨世刚, 等. 太原地区大气电场及其与大气污染物关系[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(9): 66-69)
- [5] HUANG Yu, WU Ankun, ZHANG Shuxia. Influence of environmental features on the atmospheric electric field and correction[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, **41**(1): 35-38 (黄钰, 吴安坤, 张淑霞. 场地环境对大气电场测量的影响及修正[J]. *电子测量技术*, 2018, **41**(1): 35-38)
- [6] HARRISON R G. The Carnegie curve[J]. *Surveys in Geophysics*, 2013, **34**(2): 209-232
- [7] MUIR M S. Diurnal variations in the atmospheric electric field[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1976, **38**(12): 1339-1344
- [8] BURNS G B, FRANK-KAMENETSKY A V, TROSHICHEV O A, *et al.* Interannual consistency of bi-monthly differences in diurnal variations of the ground-level, vertical electric field[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110**(D10): D10106
- [9] RAKOV V A, UMAN M A. Lightning: Physics and Effects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- [10] HARRISON R G. The global atmospheric electrical circuit and climate[J]. *Surveys in Geophysics*, 2004, **25**(5): 441-484
- [11] ZHANG Yijun, MENG Qing, MA Ming, *et al.* Development of lightning detection technique with application of lightning data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, **17**(5): 611-620 (张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用[J]. *应用气象学报*, 2006, **17**(5): 611-620)
- [12] ADZHIEV A H, KOROVIN E A, CHERNYSHEV S V, *et al.* An atmospheric electric field meter[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, **60**(5): 733-736
- [13] LU Bingyuan. The Research on the Application of the Data of Atmospheric Electric Field in Lightning Warning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012 (卢炳源. 大气电场数据在雷电预警中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012)
- [14] HAO Jianguo, LI Derui, LIU Xiaoqin. Observation and study on anomaly of atmospheric static-electric field before earthquakes[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 1993, **14**(6): 1-6 (郝建国, 李德瑞, 刘小芹. 震前大气电场异常的观测与研究[J]. *地震地磁观测与研究*, 1993, **14**(6): 1-6)
- [15] HAO Jianguo, PAN Huaiwen, LI Derui. Regional features of atmospheric-electric field anomalies before earthquakes[J]. *Earthquake*, 1993(6): 48-54 (郝建国, 潘怀文, 李德瑞. 震前大气电场异常的区域性特征[J]. *地震*, 1993(6): 48-54)
- [16] HAO Jianguo, ZHANG Yunfu. Earthquake Static Electricity for the Prediction[M]. Beijing: Petroleum University Press, 2001 (郝建国, 张云福. 地震静电预测学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001)
- [17] JIN X B, ZHANG L, BU J W, *et al.* Discussion on anomaly of atmospheric electrostatic field in Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, **104**: 103423
- [18] SMIRNOV S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,

- 2008, **8**(4): 745-749
- [19] CHOUDHURY A, GUHA A, DE B K, *et al.* A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast India[J]. *Annals of Geophysics*, 2013, **56**(3): R0331
- [20] CHEN Tao, ZHANG Xiaoxin, ZHANG Xuemin, *et al.* Imminent estimation of earthquake hazard by regional network monitoring the near surface vertical atmospheric electrostatic field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(4): 1145-1154 (陈涛, 张效信, 张学民, 等. 利用区域大气静电场监测网临震预估地震灾害[J]. *地球物理学报*, 2021, **64**(4): 1145-1154)
- [21] SMIRNOV S. Negative anomalies of the earth's electric field as earthquake precursors[J]. *Geosciences*, 2020, **10**(1): 10
- [22] BYCHKOV V V, KORSUNOVA L P, SMIRNOV S E, *et al.* Atmospheric anomalies and anomalies of electricity in the near-surface atmosphere before the Kamchatka earthquake of January 30, 2016, based on the data from the Paratunka Observatory[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, **57**(4): 491-499
- [23] WIDARTO D S, MOGI T, TANAKA Y, *et al.* Co-seismic geoelectrical potential changes associated with the June 4, 2000's earthquake (Mw7.9) in Bengkulu, Indonesia[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009, **34**(6/7): 373-379
- [24] WU Han, CHEN Tao, LI Renkang, *et al.* Characteristics of the near-surface atmospheric electric field over the top of a flat mountain in Xilin Hot Volcano Geopark[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 357-363 (吴晗, 陈涛, 李仁康, 等. 锡林浩特市火山地质公园平台山顶近地面大气电场变化特征[J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(3): 357-363)
- [25] CHEN Tao, LI Lei, LI Wen, *et al.* Characteristics of the atmospheric electric field distribution with height in Qaidam Basin of Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(4): 626-634 (陈涛, 李磊, 李文, 等. 青海省柴达木盆地大气电场随高度的变化特征[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(4): 626-634)
- [26] ZHANG Yijun, MENG Qing. Cold-front activities and its influence on air pollution at urban districts of Lanzhou in cold half year[J]. *Plateau Meteorology*, 1998, **17**(2): 135-141 (张义军, 孟青. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. *高原气象*, 1998, **17**(2): 135-141)
- [27] ZHOU H, DIENDORFER G, THOTTAPPILLIL R, *et al.* Fair-weather atmospheric electric field measurements at the Gaisberg Mountain in Austria[C]//Piers Marrakesh Progress in Electromagnetics Research Symposium. Morocco: Electromagnetics Academy, 2011, 7: 1303-1307
- [28] HARRISON R G, NICOLL K A. Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **179**: 239-250
- [29] LATHA R. Diurnal variation of surface electric field at a tropical station in different seasons: a study of plausible influences[J]. *Earth, Planets and Space*, 2003, **55**(11): 677-685
- [30] ISRAELSSON S, TAMMET H. Variation of fair weather atmospheric electricity at Marsta Observatory, Sweden, 1993-1998[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(16): 1693-1703
- [31] SENGIPTA S K. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory[J]. *Technometrics*, 1995, **37**(4): 465-466
- [32] SUN Jingqun. Basics of Atmospheric Electricity[M]. Beijing: Meteorological Press, 1987 (孙景群. 大气电学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1987)