0254-6124/2022/42(3)-0414-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Lei, CHEN Tao, SU Jianfeng, LI Wen, TI Shuo, WU Han, LUO Jing, WANG Shihan, LI Renkang. Influence of Charged Clouds on the Distribution of Atmospheric Electric Field with Altitude (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 414–421. DOI:10.11728/cjss2022.03.210513053

带电云对大气电场随高度变化特征的影响*

李 磊[1,2] 陈 涛[1] 苏建峰[1] 李 文[1] 提 烁[1]
吴 晗[3] 罗 静[1] 王诗涵[1,2] 李仁康[4]

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(南方科技大学地球与行星科学学院 深圳 518055)

4(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)

摘 要 大气电场与雷暴活动、气候变化、大气污染、太阳活动密切相关，在特殊地形上探测大气电场的高度分布对于大气电学的相关研究具有重要意义。2020 年 9 月 12 日，中国科学院鸿鹄专项团队将大气电场仪搭载在探空气球上，在青海省海西蒙古族藏族自治州大柴旦地区进行了大气电场高度分布的探测实验。本文分析讨论了此次实验中用到的电场仪、实验过程及实验结果。大气电场曲线中间凸起的部分对应电场仪穿过带电云层，因此将其分为三段并分别进行拟合。探测实验及分析结果表明：在不同高度处大气电场的主要影响因素不同，其分布规律会存在差异。此外，带电云会使大气电场强度整体增大，但云层中大气电场的高度分布仍能较好地符合指数变化规律。

关键词 带电云，晴天大气电场，探空气球测量，大柴旦地区

中图分类号 P352

Influence of Charged Clouds on the Distribution of Atmospheric Electric Field with Altitude

LI Lei[1,2] CHEN Tao[1] SU Jianfeng[1] LI Wen[1] TI Shuo[1]
WU Han[3] LUO Jing[1] WANG Shihan[1,2] LI Renkang[4]

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(*College of Earth and Planetary Sciences*, *Southern University of Science and Technology*, *Shenzhen* 518055)

* 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及中国科学院国家空间科学中心培育专项 135 项目 (Y92111BA8S)，空间中心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

2021-05-13 收到原稿，2022-01-18 收到修定稿

E-mail：lilei@swl.ac.cn. 通信作者 陈涛，E-mail：tchen@nssc.ac.cn

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

Abstract　Atmospheric electric field is closely related to the thunderstorm, climate change, air pollution and solar activity. The detection of atmospheric electric field altitude distribution on special terrain is of great significance for the research of atmospheric electricity. On 12 September 2020, the Honghu special team of Chinese Academy of Sciences mounted the atmospheric electric field instrument on the air sounding balloon, and carried out the detection experiment of the high distribution of atmospheric electric field in the Dachaidan area of Haixi Mongolian-Tibetan Autonomous Prefecture in Qinghai Province. This paper has introduced the electric field instrument, experimental process, experimental results and discussion. The convex part in the middle of the atmospheric electric field curve corresponds to the electric field instrument passing through the clouds. The curve was devided into three sections. These three sections were fitted respectifly. The results show that the main influencing factors of the atmospheric electric field at different altitudes are different, and their distribution laws are also different. In addition, charged clouds can make the overall intensity of the atmospheric electric field increased, while the altitude distribution of the atmospheric electric field in the charged cloud layer is still in accordance with the exponential law.

Key words　Charged clouds, Fair-weather atmospheric electric field, Air sounding balloon measurement, Dachaidan area

0　引言

Aplin 等[1] 在很早之前就给出了全球大气电路的概念模型, 雷暴和闪电活动是维持全球电路变化的主要来源[2-4]。在全球大气电路的概念模型中, 大气电场尤为重要, 其是空间物理、大气物理和空间环境等领域的重要特征参数。大气电场的变化与雷暴活动[5,6]、大气污染物[7,8]、太阳活动[9,10]、地磁活动[11]、气候变化[12] 等很多因素有关, 许多学者也研究了在不同大气环境和天气条件下大气电场强度的变化特征[13-17]。

在晴天条件下的全球大气电路中, 地球表面是带有负电的良导体, 而电离层是带正电的在 60 km 以上高度处的部分电离大气区域。因此, 在地球表面与电离层之间, 就会存在一个由电离层垂直指向地面的电场, 称为晴天大气电场。晴天大气电场具有较明显的日变化[18-20] 和年变化[12] 特征。晴天大气电场随高度的变化特征会因时、因地而异, 由于大地带负电, 大量符号相反的正电荷就会在贴近地面的薄层大气中聚集, 并且电荷的分布在大气层中很不均匀, 因此晴天大气电场会随高度升高呈现近似指数衰减的变化特征。

监测和探测大气电场的变化, 对雷暴预警[21]、保障运载火箭发射[22] 具有重要的作用, 而且大气电场的探测实验也是临近空间环境探测研究的一个重要组成部分。国内外有很多学者进行过大气电场的测量实验[23,24]。尽管已经存在很多大气电场的相关研究, 但在特殊地形对大气电场的高度分布测量并不广泛。本文主要通过在青海省大柴旦地区近地面进行气球放飞测量大气电场随高度分布的实验, 研究分析青藏高原上大气电场随高度的变化特征, 为不同地理条件下晴天大气电场的测量和研究提供一定的科学观测依据。

1　大气电场仪

目前所用到的电场仪有很多, 常用的有地面旋转式电场仪、滚筒式电场仪以及球载双球电场仪、微火箭电场仪。地面旋转式电场仪是由数片扇形金属片的转子和定子构成, 转子接地屏蔽, 定子感应电荷。通过测量定子上交变感应的电荷形成的电流, 实现对探头所在外界静态电场的测量。滚筒式电场仪探头则是对半分开的圆柱体金属。探头的两部分外壁在旋转时就会在电场中产生周期性的感应电荷, 通过测量感应电流就能得到电场值。微火箭电场仪则是将

上述探头换成两半箭头形状的导体。另外，还可以利用两个金属球绕垂直于两球球心连线的轴旋转产生交变的感应电荷来测量电场，制成球载双球式电场仪。除此以外，Li[25] 提出了一种基于 FPGA 数字式大气电场仪的设计，将传感器探头采用差动结构，使电路具备结构更简单、数字化程度更高、测量精度更高等优点。Adzhiev 等[22] 提出了一种能够在–40～55℃ 工作的大气电场仪，适用于高空测量。

本文所用到的大气电场仪是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自主研制开发的空间差分新型电场仪，其原理如图 1 所示，当电机带动转子匀速转动时，上下定片在电场中交替地被屏蔽或暴露，各自产生交变的信号输出。采用两个定子和转子，利用差分电路的特点，输出信号与两个输入信号之间的差值成比例，消除了自身带电所产生的误差。这种空间差分新型电场仪体积小、质量轻、耗电少，适合搭载在探空气球上对空间电场进行探测。

本次野外空间电场气球探测用到的大气电场测量系统包括大气电场仪、发射机、天线、GPS 接收机、电源、降落伞、地面接收系统。测得的大气电场数据与 GPS 接收机的定位参数由发射机发回地面接收，经由数据处理系统处理后显示。在空中大气电场气球测量系统中，气球下方依次为降落伞、探测装置、大气电场测量装置（包括大气电场仪、GPS 接收机、电源和发射机）。

2 实验过程

2.1 晴天大气标准

测量大气电场，选择晴天大气的标准对于实验过程以及实验结果是很重要的。Latha[26] 给出的晴天定义是天空中的云量小于 3/8，风速小于 4 m·s^{-1}，并且没有降水。Harrison[27] 也给出了晴天的定义，即没有降水，没有低云，天空中的积云小于 3/8，10 m 高度处的平均风速小于 8 m·s^{-1}。与以上的定义类似，Zhang 等[7] 给出的晴天标准是没有降水、没有低云、天空中的积云小于 3/8 和平均风速小于 4 m·s^{-1}。Siingh 等[28] 将风速小于 10 m·s^{-1} 的数据作为晴天大气的数据选择标准。依据以上这些晴天大气的定义，本文以没有低云，没有降水，天空中的积云小于 3/8，平均风速小于 4 m·s^{-1} 来定义晴天大气电场。根据 2020 年 9 月 12 日实验当天的气象数据以及实验时的场景拍摄，实验进行期间没有降水，没有低层云和积云，最高风速为 2 m·s^{-1}。因此，2020 年 9 月 12 日大柴旦实验中所测得的大气电场数据是排除了其他因素干扰的有效的晴天大气电场强度。

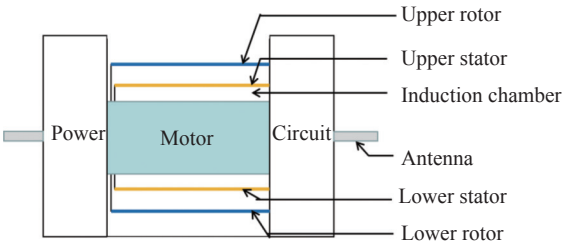


图 1 空间差分新型电场仪原理

Fig. 1 New space differential electric field instrument's principle

2.2 电场仪的标定

想要获取可靠、科学的大气电场强度数据，大气电场仪的标定十分关键。Luo 等[29] 详细分析了三种电场仪（双球式电场仪、微火箭电场仪和地面旋转式电场仪）的标定方法。基于这三种电场仪的标定方法，在进行大气电场测量实验前，于 2020 年 8 月 10 日进行了大气电场仪的标定。大气电场仪的标定系统原理是在两个圆形铁板之间加电压，会产生一个模拟的大气电场，将大气电场仪放置在其中，只要两圆形铁板之间的距离保持不变，大气电场强度与所施加的电压就会成正比，也就是线性相关。图 2 给出了所得到的电场仪标定曲线。从电场仪的标定结果来看，外加电压与电场强度之间的线性度超过了 95%，说明电场仪性能良好，可以用于大气电场科学实验。

2.3 大气电场测量实验

2020 年 9 月 12 日 08:40 LT，在青海省大柴旦地

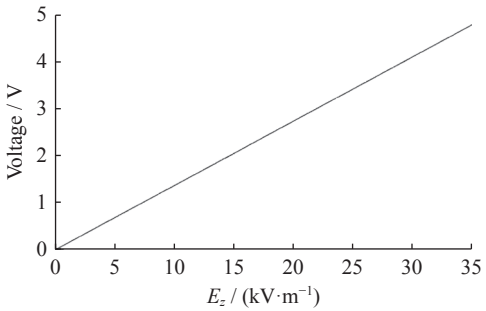


图 2 大气电场仪的标定曲线

Fig. 2 Calibration curve of the atmospheric electric field instrument

区(95.34°E, 37.74°N, 海拔 3185 m)进行了野外空间电场气球探测实验。当天气象条件良好, 适合大气电场的测量。将大气电场仪与数传系统通电, 反复检查状态是否正常。然后将气球充气, 并将气球、降落伞、电场仪依次连接好, 待数据接收稳定且正常之后, 缓缓放飞。实验时的数据接收系统记录到的数据格式见表 1, 时间分辨率为 1 s。其中电场值为测得的垂直方向的大气电场强度, 工作状态中 A 代表正常工作, 高度为发射机所在位置的海拔高度。探空气球于 2020 年 9 月 12 日上午 09:21 LT 放飞, 气球平均上升速度约为 3～4 m·s^{-1}, 10:58 LT 上升至最大海拔高度 25.05 km, 然后探空气球由于外界大气压过低而爆破, 降落伞和大气电场测量装置快速下落, 下落速度超过 10 m·s^{-1}, 下落至海拔高度 11.61 km, 信号被山遮挡, 数据接收结束。2020 年 9 月 12 日实验当天的地磁活动指数为: *Dst* 指数–10～1 nT, *Ap* 指数 2～7 nT, 属于地磁平静期。

3　实验结果

3.1　实验数据曲线

图 3 给出的是探空气球大气电场探测实验得到的垂直方向测量的大气电场随高度变化曲线, 从图 3 中可以看出, 在地面的时候(海拔 3 km 附近), 大气电场值约为 2600 V·m^{-1}, 之后随着高度的增加大气电场强度快速减小。在海拔 4 km 附近, 大气电场不再减小反而增加, 直到 6 km 附近, 电场强度从 500 V·m^{-1} 增加到了 750 V·m^{-1}。在 6～10 km 之间, 随着高度的增加, 大气电场继续减小, 从 750 V·m^{-1} 减小到 500 V·m^{-1}。在 10 km 附近,大气电场迅速减小到 100 V·m^{-1}。10 km 以上, 大气电场缓慢继续减小, 在最高点 25 km 附近, 大气电场强度最低, 为 10 V·m^{-1}。从整体上看, 大气电场整体趋势能够较好地符合指数分布规律, 但在 4～10 km 左右出现了一端凸起, 且有一定的波动, 通过与相对湿度、风速多物理参量对比, 发现其主要原因是在该段大气电场探测设备穿过了带电云。

图 4 所示为探空气球大气电场探测实验得到的相对湿度随高度变化的曲线。由图 4 可知, 在地面的时候, 相对湿度为 27%, 随着高度的增加, 相对湿度迅速减小。在 4 km 附近, 相对湿度不再减小反而迅速增大, 由 17% 迅速增大, 直到 6 km 附近增至 38%。在 6～10 km 之间, 虽然中间有一个波动, 但是整体上相对湿度迅速减小至接近 0。10 km 以上, 相对湿度

表 1　接收机记录的数据格式

Table 1　Data format recorded by the receiver

电场/(V·m^{-1})	相对湿度/(%)	工作状态	世界时(UT)	经度/(°)	纬度/(°)	高度/m
96.94	22	A	00:25:03	95.34053	37.743683	3185

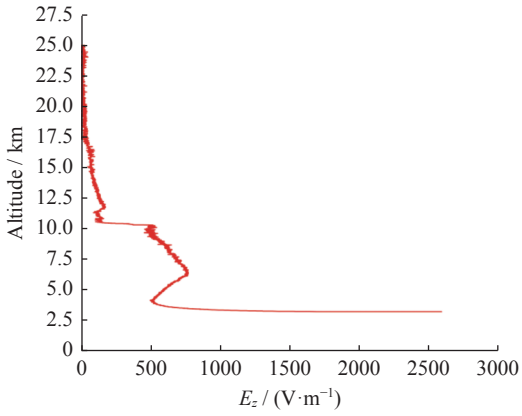


图 3　探空气球实验测量结果(大气电场–高度分布)

Fig. 3　Atmospheric electric field-altitude distribution measured by the air sounding balloon experiment

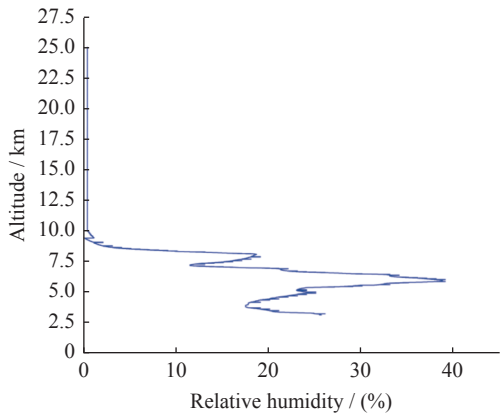


图 4　探空气球实验的相对湿度–高度分布

Fig. 4　Relative humidity-altitude distribution measured by the air sounding balloon experiment

基本稳定保持在 0.4% 不变。在最高点 25 km 附近，相对湿度最低，为 0.4%。4～7.5 km 左右相对湿度较大，尤其是 5 km 附近，相对湿度不再按照原有的变化规律，而是产生了凸起，说明探测器在该段穿过了带电云。

图 5 所示为探空气球实验中得到的风速随高度的分布曲线。从图 5 中可知，在海拔高度 3～5 km 近地面的时候风速存在波动，大约为 2～3 $m\cdot s^{-1}$。在 5～13 km 之间，风速迅速增大，从 2 $m\cdot s^{-1}$ 增大到了 47 $m\cdot s^{-1}$。在 13 km 附近，风速不再增大反而迅速减小，直到 20 km，海拔高度 20 km 处的风速大约为 2 $m\cdot s^{-1}$。20～22.5 km 之间，风速在 2～3 $m\cdot s^{-1}$ 波动。22.5～25 km，风速出现增大，在最高点 25 km 附近，风速为 8 $m\cdot s^{-1}$。7.5～17 km 风速很大，说明在该段大气上下对流活动较为剧烈，该段为对流层，17 km 以上，风速只有小幅波动，说明 17～25 km 为平流层。

对比大气电场的高度分布与相对湿度及风速的高度分布，可以发现：大气电场的变化受相对湿度影响很大。4～7.5 km 为带电云，在海拔高度 4 km 附近，相对湿度迅速增加，说明开始接触云层底部，大气电场强度增加。海拔为 6 km 附近，相对湿度增加到 38%，到达云内部最湿润的部分，随后又迅速降低，在 6～7.5 km 之间一直在降低，大气电场也在随之减小。到达海拔高度 8～10 km，相对湿度迅速降低，探空气球逐渐离开云层，10 km 附近，探空气球随着不断上升离开云层，大气电场也迅速降低。在海拔高度

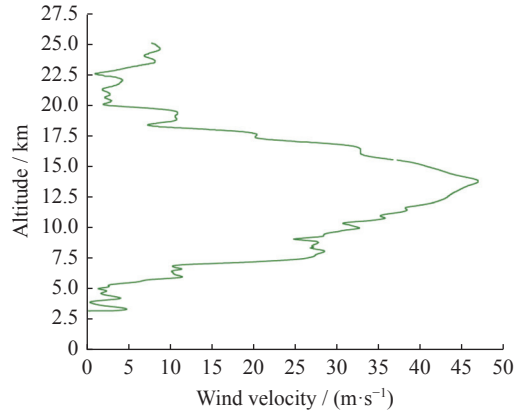


图 5 探空气球实验的风速–高度分布

Fig. 5 Wind speed-altitude distribution measured by the air sounding balloon experiment

10～17.5 km 以上，风速很大，超过 30 $m\cdot s^{-1}$，大气电场主要受风场影响出现一些波动，风速越大，大气电场强度也会越大。

3.2 实验数据分析

对 2020 年 9 月 12 日探空气球大气电场探测实验的电场数据进行深入分析。根据相关文献研究，大气电场随海拔高度的分布近似符合 e 指数分布，大气电场随高度的分布可采用如下指数规律递减的经验公式

$$E(z) = E_0 e^{-az}. \tag{1}$$

其中，E_0 为起始高度处的大气电场值，单位 $V\cdot m^{-1}$；z 为海拔高度，单位 km；a 为与地区、环境有关的常系数，单位 km^{-1}。利用上述公式对原始数据的散点图进行拟合，因为中间部分海拔高度 4～10 km 主要受云层中电荷分布状态的影响，因此可以将其划分为海拔小于 3.9 km、海拔在 6.7～9.7 km 之间和海拔高于 11 km 三段分别进行拟合，拟合所得到的结果如图 6 所示。图 6(a) 为海拔小于 3.9 km 数据拟合结果，E_0=6.05×10^6 $V\cdot m^{-1}$，a = –0.00255，拟合优度 77.4%；图 6(b) 为海拔在 6.7～9.7 km 之间数据拟合结果，E_0=1864 $V\cdot m^{-1}$，a = –0.00013359，拟合优度 96.3%；图 6(c) 为海拔高于 11 km 数据拟合结果，E_0=2920 $V\cdot m^{-1}$，a = –0.000247338，拟合优度 95.49%。图 6(b) 和图 6(c) 的拟优度均超过 95%，明显好于图 6(a) 段。这说明大气电场随海拔高度的分布对于图 6(b) 和图 (c) 两段比图 6(a) 能够更好地符合 e 指数的分布规律，也就是说近地面可能受到其他因素的影响。图 6(b) 和图 6(c) 受到其他因素的影响较小，其他因素能够改变大气电场的强度和波动幅度，但其整体趋势仍然受海拔高度这一因素主导。

4 结论与讨论

大量研究结果表明，大气电场强度会随着高度的上升单调递减，其数值始终为正，递减按照指数规律变化。贴近地面的大气中晴天大气电场的高度分布较为复杂，会因地而异。从图 6 的拟合结果可以明显看出：图 6(a) 海拔高度小于 3.9 km 的近地面，原始数据散点按指数规律拟合得到的拟合优度为 77.4%，说明在贴近地面的大气层，由于大气湍流等因子，会改变气溶胶的成分，使气溶胶的成分分布无规律，导致

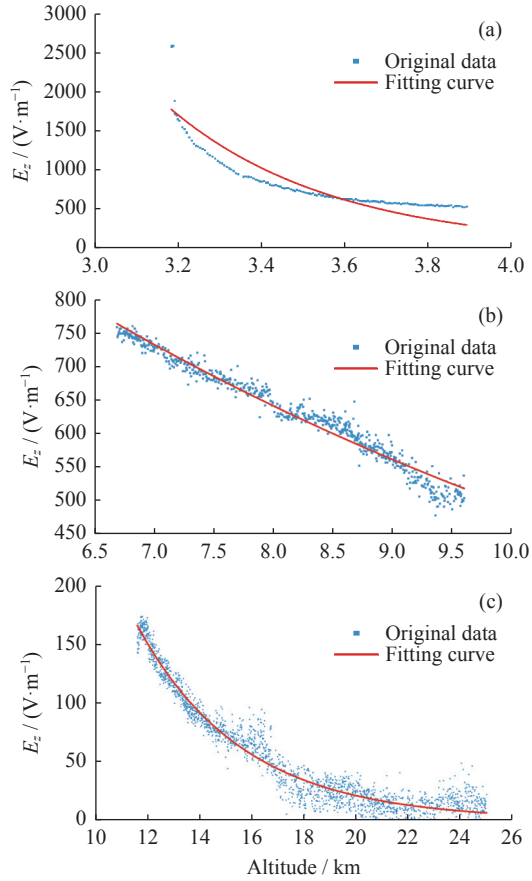


图 6　探空气球实验大气电场强度的高度分布拟合曲线与原观测数据对比. (a) 海拔高度小于 3.9 km 的数据, (b) 海拔高度在 6.7～9.7 km 的数据, (c) 海拔高度在 11 km 以上的数据

Fig. 6　Comparison of the fitting curve of atmospheric electric field intensity with altitude and the observed data measured by air sounding balloon experiment. (a) The altitude is less than 3.9 km. (b) The altitude is between 6.7 km and 9.7 km. (c) The altitude is higher than 11 km

带电粒子的分布也并不是严格按照指数变化, 因此指数变化规律并不十分明显, 这部分属于大气层中最不稳定的组成部分, 得到的拟合结果也与图 6(b)、图 6(c) 差异较大; 图 6(b) 海拔高度在 6.7～9.7 km 之间, 探空气球穿过云层, 实验中遇到的带电云层电荷分布状态为上正下负, 与大气电场的正方向一致, 因此大气电场仪穿过带电云层时主要受带电云层影响, 使其整段的大气电场值有所增大, 但由于带电云层的电荷主要分布在带电云层的上下两端, 因此大气电场仪在带电云层内部时, 大气电场的分布规律主要由高度变化决定, 其仍然较好地符合指数变化规律, 得到的拟合优度为 96.3%; 图 6(c) 海拔高度在 11 km 以上, 大气电场仪已经远离地面和带电云, 大气电场不再由气溶胶成分、带电云的电荷分布状态决定, 其主要受风速影响, 但通过对比 11 km 以上的电场数据与风速数据, 发现 11～17 km 风速对大气电场的影响主要体现在一些细节波动, 对大气电场整体趋势影响不大, 拟合优度为 95.49%, 能够很好地符合指数变化规律。

从整体上看, 在近地面, 晴天大气电场的高度分布主要受大气湍流等因子的影响, 导致气溶胶的成分分布无规律, 不同地点会存在差异, 指数变化规律不明显。放飞时间 2020 年 9 月 12 日。9:21LT, 近地面的相对湿度较大, 即水气压较大, 大量水气分子弥散在近地表大气中, 水气分子也容易与大气轻离子结合, 但大气轻离子与水气分子结合在一起并不会成为大气重离子, 只是迁移率会有所减小, 与此同时大气导电性也会有所减小, 也就是大气电导率降低。由欧姆定律可得

$$j = \sigma E. \tag{2}$$

式中, j 为大气电流密度, σ 为大气电导率, E 为大气电场。在同一地点, 晴天大气电流密度 j 不随高度变化, 这一结论已被大量观测所证实。j 近似为常数, 电导率减小, 大气电场强度将随之增大。这说明由于实验当天的相对湿度较大, 近地面水气分子较多, 近地面的电场强度较大, 由图 3 可知, 在近地面的时候(海拔 3 km 附近), 实验当时测得的大气电场值约为 2600 V·m^{-1}, 与理论结果相符。此次实验大气电场仪所穿过的带电云层, 其内部的电荷分布状态为上正下负, 与大气电场的正方向一致, 大气电场值整体增大, 但在带电云层内部仍按照指数变化规律递减。高空中, 大气电场不再受地面因素的制约, 会受风速的影响产生一些波动, 但整体的趋势并没有受到影响, 能够较好地符合指数变化规律。综上所述, 2020 年 9 月 12 日中国科学院鸿鹄专项青海省大柴旦镇探空气球测量的大气电场高度分布与理论相符, 对后续相关研究具有很大的参考价值。

通过这次探空气球探测大气电场高度分布实验, 可以表明: 在大柴旦地区, 大气电场强度会随着高度的增大而减小, 但其值始终为正值; 不同高度处的大气电场变化规律会有差异。低高度处的大气电场受

近地面湍流等因子、气溶胶成分、水气压影响，不能很好地符合指数变化规律，而高高度处的大气电场可以很好地符合指数变化规律，经过拟合得出高空中的大气电场分布经验公式为

$$E = 2.92 \times 10^3 \mathrm{e}^{-0.00027338} \quad (\text{单位} \mathrm{V \cdot m^{-1}}).$$

大气电场的高度分布在带电云层中受带电云内部的电荷分布状态影响较大，本次实验遇到的带电云所携带的电场为 250～300 $\mathrm{V \cdot m^{-1}}$，方向与晴天大气电场正方向相同，垂直指向地面，带电云层会使大气电场整体增大，但由于带电云层的电荷主要分布在带电云层的上下两端，在穿过带电云层的过程中，大气电场主要受海拔高度制约，仍能较好地按照指数变化规律递减。

该实验结果很好地说明了大气电场在穿过带电云时的主要特征，对于后续大气电场的分布特征研究具有一定的参考价值和科学意义。接下来将进一步深入探索、研究大气电场在不同特殊环境条件下的信号特征和相关物理机制，更深入地开展大气电学方面的研究。

致谢 风速分布数据由中国科学院国家空间科学中心韦峰老师提供，实验当天地磁活动指数由 NASA 提供，大柴旦气象数据由中央气象台提供。中国科学院光电研究院同行及先导专项总体组提供了探测平台以及在实验过程中给予了大力帮助和支持。

参考文献

[1] APLIN K L, HARRISON R G, RYCROFT M J. Investigating earth's atmospheric electricity: a role model for planetary studies[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **137**(1/2/3/4): 11-27

[2] RYCROFT M J, ISRAELSSON S, PRICE C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(17/18): 1563-1576

[3] SIINGH D, SINGH R P, KAMRA A K, *et al*. Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, **67**(6): 637-658

[4] VICTOR N J, CHANDRA S, SIINGH D. Lightning, the global electric circuit, and climate[M]//SRIVASTAVA P K, SINGH S K, MOHANTY U C, *et al*. Techniques for Disaster Risk Management and Mitigation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2000

[5] MACH D M, BLAKESLEE R J, BATEMAN M G. Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D5): D05201

[6] BLAKESLEE R J, MACH D M, BATEMAN M G, *et al*. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit[J]. *Atmospheric Research*, 2014, **135-136**: 228-243

[7] 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): 66-69,95 (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): 66-69,95)

[8] LI Jingxiao, CHEN Xuemeng, CHENG Yuexing, *et al*. A preliminary study on the relationship between atmospheric electric field and atmospheric pollutants in Beijing[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, **40**(1): 209-218 (李京校, CHEN Xuemeng, 程月星, 等. 北京市大气电场和大气污染物关系初步研究[J]. 高原气象, 2021, **40**(1): 209-218)

[9] TACZA J, RAULIN J P, MENDONÇA R R S, *et al*. Solar effects on the atmospheric electric field during 2010−2015 at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(21): 11970-11979

[10] LI R K, CHEN T, LUO J, *et al*. Enhancement of high energy electron fluxes and variation of atmospheric electric field in the Antarctic region ormalsize[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(1): 40-48

[11] TELANG A V R. The influence of rain on the atmospheric-electric field[J]. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1930, **35**(3): 125-131

[12] 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

[13] 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)

[14] GURMANI S F, AHMAD N, TACZA J, *et al*. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **179**: 441-449

[15] 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 (周筠珺, 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)

[16] ZHANG Yijun, GE Zhengmo, CHEN Chengpin, *et al*. Electrical characteristics of atmosphere in East area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 1998, **17**(2): 135-141 (张义军, 葛正谟, 陈成品, 等. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. 高原气象, 1998, **17**(2): 135-141)

[17] YAN Muhong, XIAO Qingfu, SHEN Qiaonan. Characteristics of atmospheric electric field at the West Pacific Region in Sep.-Nov., 1988[J]. *Plateau Meteorology*, 1990, **9**(4): 395-404 (言穆弘, 肖庆复, 申巧南. 1988年9—11月西太平洋海区大气电场特征分析[J]. 高原气象, 1990, **9**(4): 395-404)

[18] WU Ting, LV 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)

[19] HARRISON R G. The Carnegie curve[J]. *Surveys in Geophysics*, 2013, **34**(2): 209-232

[20] MUIR M S. Diurnal variations in the atmospheric electric field[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1976, **38**(12): 1339-1344

[21] 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)

[22] 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

[23] 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)

[24] IAROSSI S, POSCOLIERI M, RAFANELLI C, *et al*. The measure of atmospheric electric field[M]//NERI G, DONATO N, D'AMICO A, *et al*. Sensors and Microsystems: AISEM 2010 Proceedings. Dordrecht: Springer, 2011: 175-179

[25] LI Zhongfu. Design of digital atmospheric electric field instrument based on FPGA[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2018(22): 136-137 (李中富. 基于FPGA数字式大气电场仪的设计[J]. 科技与创新, 2018(22): 136-137)

[26] 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

[27] HARRISON R G. Long-term measurements of the global atmospheric electric circuit at Eskdalemuir, Scotland, 1911-1981[J]. *Atmospheric Research*, 2004, **70**(1): 1-19

[28] SIINGH D, SINGH R P, GOPALAKRISHNAN V, *et al*. Fair-weather atmospheric electricity study at Maitri (Antarctica)[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, **65**(12): 1541-1553

[29] LUO Fushan, HE Yuhui, ZHANG Huawei, *et al*. Calibration method of electric field[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(3): 223-226 (罗福山, 何渝晖, 张华伟, 等. 电场的标定方法[J]. 空间科学学报, 2007, **27**(3): 223-226)

(责任编辑: 孙伟英)