0254-6124/2022/42(3)-0403-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GAO Zhixu, CHEN Tao, LI Wen, LIU Gang, LI Renkang. Analysis of the Spatial and Temporal Variation Characteristics of the Atmospheric Electric Field on Fair-weather (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 403–413. DOI:10.11728/cjss2022.03.210531066

晴天大气电场时空变化特征分析*

高志旭[1] 陈 涛[2] 李 文[2]
刘 刚[1] 李仁康[1]

1(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 利用子午工程5个大气电场观测站点近10年的近地面晴天大气电场观测数据，在年变化、季节变化、日变化三种不同时间尺度上进行了对比分析。结果表明：不同纬度站点的日平均晴天大气电场峰谷类型不同，且部分站点的波峰出现了逐年左移或右移的趋势；在电场幅值变化方面，位于中低纬度地区的站点呈现出逐年减小的变化特征，而位于中高纬度的站点呈现出逐年增加的变化趋势，且这种年变化均是线性的；多元回归分析表明，最大波峰出现时间与地理经度呈负相关，而与地理纬度呈正相关；各站点在近10年中均未出现明显的纬度效应；冬季的晴天大气电场日平均值水平较高，夏季较低，且各季节的日平均晴天大气电场最小值及最大值均近似呈正态分布；最小值及最大值在年度和季节两个时间尺度上的变化规律是基本一致的。这些研究结果揭示了晴天大气电场在不同时间尺度上的变化特征。

关键词 子午工程，晴天大气电场，变化特征，对比分析

中图分类号 P41

Analysis of the Spatial and Temporal Variation Characteristics of the Atmospheric Electric Field on Fair-weather

GAO Zhixu[1] CHEN Tao[2] LI Wen[2] LIU Gang[1] LI Renkang[1]

1(*School of Physics and Electronic Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming* 650500)

2(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract At present, research on the fair-weather atmospheric electric field are mostly carried out on

* 国家自然科学基金项目 (41874175，41931073)，国家重大科技基础设施子午工程项目，空间中心攀登计划主任基金项目 (E0PD41A11S)，中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17010301，XDA15052500，XDA15350201)，云南省基础研究青年项目 (2019FD111)，中国科学院国家空间科学中心五个重点培育方向项目 (Y92111BA8S)，中国科学院大学生创新实践训练计划项目 (20204001508) 和云南师范大学大学生创新创业训练计划项目 (202110681009) 共同资助

2021-05-31 收到原稿，2022-01-22 收到修定稿

Email：rkli@ynnu.edu.cn

a single region or on a 2～3 years time scale, while the analysis and comparison on multiple observation stations with different longitude and latitude and large time scale are few. In this study, the observational data of near-surface fair-weather atmospheric electric field from five stations of the Meridian Project in recent ten years were compared and analyzed on three different time scales: annual variation, seasonal variation and diurnal variation. The results show that the peak and valley types of the average daily fair-weather atmospheric electric field are different at different latitudes, and the wave peaks at Zhaoqing Station in Guangzhou, Jiufeng Station in Wuhan and Mohe Station in Heilongjiang tend to shift to the left or the right year by year. Located in the low latitudes in Zhaoqing, Guangzhou, Wuhan, Chengdu PI county stand the Jiufeng station sites, such as nearly a decade of sunny overall atmospheric electric field amplitude shows the characteristics of the change of the reduced year by year, while the electric field amplitude of Changchun Nong'an Station and Heilongjiang Mohe Station in the middle and high latitudes showed an annual increase in the overall trend, and the annual changes were linear. The occurrence time of maximum crest is negatively correlated with geographical longitude, but positively correlated with geographical latitude. There was no obvious latitude effect at each station in the last ten years. The daily average level of the fair-weather atmospheric electric field is higher in winter and lower in summer, and the minimum and maximum values of the daily average fair-weather electric field are approximately normally distributed in all seasons; the variation of the minimum and maximum values is generally consistent on both annual and seasonal time scales. The results reveal the variation characteristics of fair-weather atmospheric electric fields on different time scales.

Key words Meridian project, Fair-weather atmospheric electric field, Variation characteristics, Comparative analysis

0 引言

近地面大气电场强度作为大气电学领域的一个重要研究方向，可为研究太阳活动、理解全球大气电路模型（GAEC）与气候变化的关系、临震前兆监测、雷暴预警等提供重要依据。研究表明，太阳活动可能导致高纬度地区的高能电子通量增加，沉降的高能电子激发出 X 射线，进而使得近地面大气电场增强[1]。Wilson 等[2]1921 年提出了全球大气电路模型，大气电路系统中的垂直电流密度很可能影响并主导短期天气状况或者长期气候变化[3]。Pulinets 等[4] 提出岩石圈、大气和电离层耦合模型（LAIC），认为地震活动可能导致区域大气电场变化并引起电离层异常，而 LAIC 模型可以根据地面、大气和电离层之间的相互作用和异常变化来解释短期地震前兆的性质。Chen 等[5] 根据震前晴天大气电场异常及其物理发生机制，提出了一种地震灾害组网监测方法及技术思路。在雷电灾害防护方面，Jü等[6] 和 Xing 等[7] 根据大气电场特征分别提出了雷电临近预警方法，并取得了较好的预报效果。但一般情况下，大气电场同时受全球效应（例如：太阳辐射、宇宙射线、特定气象事件、氡等天然地面元素衰变）和局部效应（例如：气溶胶浓度、气象参数、空间电荷、人为因素）的影响[8, 9]。因此，为进一步开展对大气电场的相关研究，给出大气电场的背景量就显得尤为重要。

通常将晴天大气电场视为大气电场的背景量，将晴朗天气下大气电场的特征性世界时日曲线称为卡内基曲线。Harrison 等[10] 对 20 世纪初华盛顿卡内基研究所的海洋测量数据进行分析，发现晴天日电场随世界时的变化与测量地理位置无关。但目前越来越多的研究表明，由于局部影响的差异，不同地域的晴天大气电场日变化曲线与卡内基曲线存在较大差别。Yaniv 等[11] 研究发现，以色列南部 2013－2015 年的晴天大气电场出现了与卡内基曲线不一样的晨峰（08:00－10:00 UT），该晨峰与地表附近气溶胶浓度增加有关。南极 Arctowski 站 2012－2013 年的晴天大气电场日变化曲线总体上也与卡内基曲线有较大差异，但当地气溶胶浓度对大气电场没有显著影响[12]。

Bhattacharyya 等[13] 通过研究喜马拉雅山东部高海拔站 2017－2018 年的晴天大气电场并与卡内基曲线对比, 发现当地大气电场值整体高于卡内基曲线, 并表现出与当地气象参数及大气成分较强的相关性。Gurmani 等[14] 对巴基斯坦 3 个台站 2015－2017 年的晴天大气电场研究表明, 3 个台站都出现了与卡内基曲线较大的差异, 并且大气电场峰值的出现时间受季风影响。中国学者同样也对此做了相关研究, 例如 Xü等[15] 对西藏羊八井地区 2005－2007 年的晴天大气电场进行分析, 发现当地晴天大气电场日变化呈现大陆复杂型(双峰双谷), 并且会随季节变化。Liu 等[16] 对成都地区 2009－2015 年的晴天大气电场研究表明, 当地日变化呈现出双峰双谷型。Zhang 等[17] 对欧亚大陆 9 个观测站点在 20 世纪不同时段的晴天大气电场数据进行分析, 发现其日变化主要呈单峰单谷和双峰双谷两种波形, 并且表现出与季节变化和绝对湿度等气象参数较强的相关性。Yang 等[9] 对台湾海峡西岸 2014－2015 年的晴天大气电场进行分析, 发现台湾海峡西岸晴天大气电场日变化呈双峰双谷特征, 并且与海陆风关系较为密切。

上述研究揭示了不同地区的晴天大气电场差异及特征, 发现晴天大气电场受局部效应影响明显, 但多为对单一地区或在两至三年的时间尺度上进行分析, 缺乏对多个不同经纬度观测站点及较大时间尺度的分析对比。本文利用子午工程 5 个大气电场观测站点近 10 年的观测数据, 通过引入高斯加权移动平均法, 分析中国大陆 103.8°E－124.9°E, 23.1°N－53°N 较大经纬范围的晴天大气电场, 进而探究晴天大气电场的日变化、季节变化、年变化特征。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文用于晴天大气电场特征及变化分析的近地面大气电场数据来源于子午工程数据中心[18], 该数据集包括子午工程大气电场观测广州肇庆站(ZQT)、成都郫县站(PXT)、武汉九峰站(JFT)、长春农安站(NAT)、黑龙江漠河站(MHT)等 5 个站点的大气电场观测数据, 上述站点地理分布如图 1 所示。子午工程大气电场数据采用场磨式电场仪进行测量, 电场分辨率为 2.5 V·m^{-1}, 时间分辨率为 1 s。这里使用的气象数据来自于中国气象局气象数据中心*, 使用的地磁 Kp, Ap指数来自于德国地球科学研究中心提供的(Kp and ap/Ap indices)数据集**, 使用的气溶胶光学厚度(AOD)数据来源于美国国家宇航局(NASA)提供的 MOD04_3 K 数据集***, 且上述数据集选用时间均为 2011－2020 年。

1.2 数据处理方法

晴天大气电场数据的筛选条件是: 地磁活动指数 $Kp<3$, 晴天, 无雷暴、降水、暴风雪等气象活动, 风速不大于 8 m·s^{-1}。对按上述条件筛选出来的晴天大气电场数据, 应用线性插值对缺失值和离群值进行填充, 并进行世界时转换, 对于连续缺失数据点超过 3600 个(即 3600 s)的晴天大气电场数据予以舍弃。

采用高斯加权移动平均滤波的方法对上述电场数据进行平滑滤波, 以计算晴天大气电场日平均曲线。高斯加权移动平均滤波法又称为高斯权函数平滑法, 是以高斯函数为权函数, 根据高斯窗函数的大小选择权值进行线性平滑滤波, 进而将高斯核函数与原始信号进行卷积得到滤波后的信号。高斯平滑滤波函数具有低通滤波器的性质, 可以有效滤除高频随机噪声[19]。高斯平滑滤波可表示为

$$h_g(t)=\frac{\int_{-\infty}^{+\infty}h(\tau)g(t-\tau)\mathrm{d}\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty}g(t-\tau)\mathrm{d}\tau}. \tag{1}$$

式中: τ为高斯窗函数在时间轴上的中心点; $h_g(t)$为经过高斯平滑滤波的时间域大气电场信号; $g(t-\tau)$为高斯窗函数, 一维零均值高斯函数为

$$g(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right). \tag{2}$$

式中, σ为高斯函数的标准差, 用于控制高斯窗函数的时窗宽度。高斯平滑滤波函数主要是通过控制高斯窗函数的宽度进行去噪。由于大气电场剩余高频随机噪声幅值较小, 因此这里选择 5000～8000 的时窗宽度(即 5000～8000 s)进行平滑滤波去噪, 从而在对高频随机噪声压制的同时, 尽量多地保留有效信号。

* http://data.cma.cn/

** https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/

*** https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/



图 1　子午工程大气电场台站地理分布

Fig. 1　Geographical distribution of atmospheric electric field stations in the Meridian Project

以黑龙江漠河站 2020 年为例，最终得到的晴天大气电场日平均曲线如图 2 所示。分析图 2 可知，上述数据处理方法有效可行。

2　日变化及年变化

2.1　数据处理结果

利用以上数据筛选条件及处理方法，针对子午工程 5 个大气电场观测站点的观测数据，分别计算 2011－2020 年晴天大气电场日平均曲线。这里对年度有效晴天数小于 10 天的年份因其缺乏统计意义而不予以分析，最终计算结果如图 3 及表 1 所示。

2.2　物理机制解释

在无大气强对流的晴朗天气下，大气电流主要沿竖直方向流动。由欧姆定律可得大气电场垂直分量

$$E_z = \frac{J_z}{\sigma}. \tag{3}$$

其中：J_z为近地大气与地面之间的电流密度；空气电导率σ主要取决于空气中的离子浓度及其迁移率，尤其是小离子(直径为$1\times10^{-10}\sim1\times10^{-9}$ m)[12]，其表达式如下：

$$\sigma = e\left(n_+\mu_+ + n_\mu_\right) = 2en\mu. \tag{4}$$

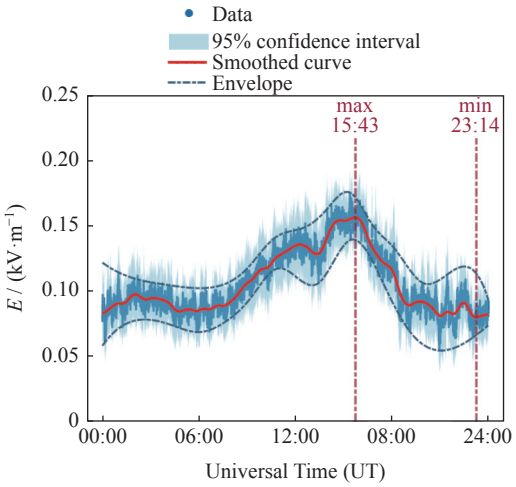


图 2　黑龙江漠河站 2020 年晴天大气电场日平均曲线

Fig. 2　Daily average curve of the fair-weather atmospheric electric field in 2020 at Mohe Station in Heilongjiang Province

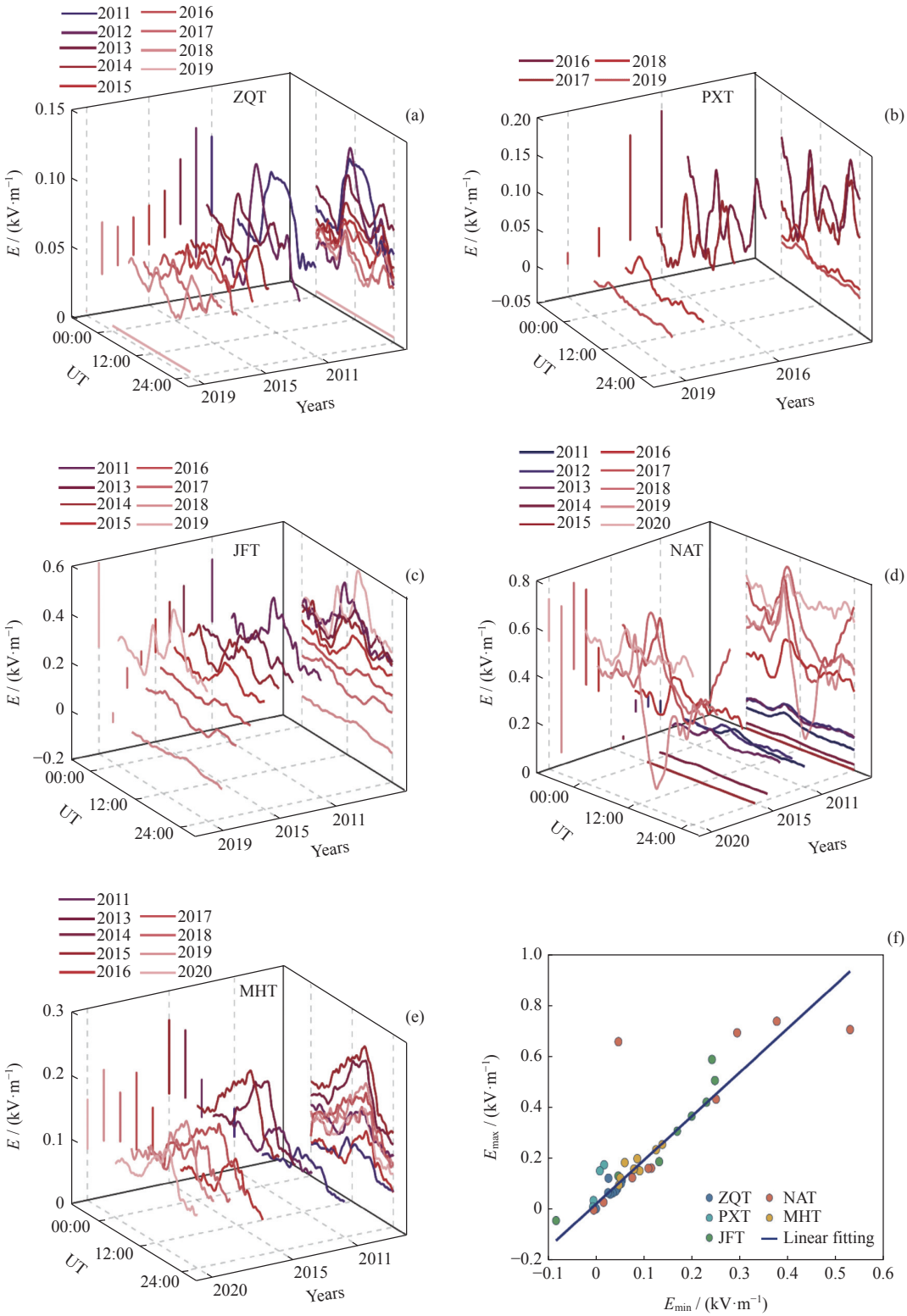


图 3 (a)～(e) 各台站 2011－2020 年晴天大气电场日平均曲线，(f) 各台站 2011－2020 年日平均晴天大气电场最小值–最大值拟合

Fig. 3 (a) ～ (e) Daily average curve of the fair-weather atmospheric electric field at all stations from 2011 to 2020. (f) Min-max fitting of daily average fair-weather atmospheric electric field from 2011 to 2020 at all stations

式中, n_+和$n_$分别为正负离子浓度, μ_+和$\mu_$分别为正负离子迁移率, e 为元电荷。当正负离子浓度相等时, 可对上式进行简化。空气中的正负离子主要来自于宇宙辐射和土壤中的放射性物质(氡气^{222}Rn、钍射气^{220}Rn等)衰变, 并附着在气溶胶上或互相中和, 其稳定状态可由平衡方程描述为

$$q-\alpha n^2-n\beta Z=0, \tag{5}$$

$$q=q_{\mathrm{c}}+q_{\mathrm{s}}, \tag{6}$$

$$Z=Z_0+Z_++Z_-. \tag{7}$$

其中, q为总离子生成率, α为离子–离子复合系数, β为离子–气溶胶附着系数, q_{c}和q_{s}分别为由宇宙辐射和土壤中放射性物质衰变引起的离子生成率, 参数Z_0, Z_+, $Z_$, Z 分别表示不带电气溶胶浓度、正电气溶胶浓度、负电气溶胶浓度和总气溶胶浓度。

当带电离子对气溶胶的附着达到一定程度时, 根据高斯定理, 气溶胶颗粒上的电荷会影响大气电场, 即

$$\nabla E_z=\frac{\rho}{\varepsilon_0}. \tag{8}$$

由式(3)～(5)可得, 大气电场垂直分量E_z与总气溶胶浓度 Z 间的关系为

$$E_z=\frac{J_zZ}{\left(\sqrt{\beta^2Z^2+4q\alpha}-\beta Z\right)\mu e}. \tag{9}$$

在重污染的情况下, $n\beta Z\gg\alpha n^2$[20], 有

$$n=\frac{q}{\beta Z}. \tag{10}$$

此时,

$$E_z=\frac{J_z\beta Z}{2\mu qe}. \tag{11}$$

因此, 在受污染的区域中, 大气电场E_u与气溶胶浓度Z成正比。许多测量研究表明, 大气电场和气溶胶浓度之间存在相似的变化规律[20-23]。但在未受污染或污染程度较小的情况下, 大气电场E_z与气溶胶浓度 Z 成非线性关系, 并且在大多数情况下, 较低浓度的气溶胶对电场的局部影响并不显著, 此时大气电场主要受全球效应影响[12], 高纬度地区还可能受太阳活动引起的高能粒子入射影响[1, 24, 25], 即高能粒子入射使大气电离增加, 进而使空间电荷增加, 从而导致大气电场增强。

2.3 晴天大气电场日变化

从图 3(a)～(e)可知, 各台站的日平均晴天大气电场主要呈现以下特点: 广州肇庆站的日平均晴天大气电场主要由一个主波峰、一个次生峰和两个波谷组成, 2011－2018 年主波峰有逐渐左移的趋势, 而次生峰有逐渐右移的趋势; 成都郫县站的日平均晴天大气电场主要由两侧的两个主波峰和中间的一个次生峰组成; 武汉九峰站的日平均晴天大气电场主要由一个波峰一个波谷组成, 但个别年份也出现了双峰双谷的情况, 且主波峰 2011－2018 年有逐渐右移的趋势; 长春农安站的日平均晴天大气电场主要由一个波峰、一个波谷组成, 波峰波谷历年位置基本保持不变; 黑龙江漠河站的日平均晴天大气电场主要由一个波峰、一个波谷组成, 个别年份只有波峰而无明显波谷出现, 且主波峰 2011－2020 年有逐渐右移的趋势。因此, 低纬度站点的日平均晴天大气电场峰谷类型为双峰双谷或多峰多谷型, 而中高纬度站点则为单峰单谷型, 其中广州肇庆站、武汉九峰站、黑龙江漠河站的波峰出现了逐年左移或右移的趋势。目前, 其逐年移动趋势的原因仍需进一步的研究。表 1 给出了各台站 2011－2020 年晴天大气电场日平均曲线统计结果。

各台站近 10 年晴天大气电场日平均曲线在 22:00－04:00 UT(对应当地时间 06:00－12:00 LT)均

表 1 各台站 2011—2020 年晴天大气电场日平均曲线统计结果

Table 1 Statistical results of the average daily curve of the fair-weather atmospheric electric field at each station from 2011 to 2020

站点	地理经度/(°)E	地理纬度/(°)N	主要峰谷类型	最大波峰平均出现时间(UT)
广州肇庆站	113.44	23.01	双峰双谷	09: 44
成都郫县站	103.89	30.9	三峰三谷	20: 37
武汉九峰站	114.48	35	单峰单谷	14: 15
长春农安站	124.96	44.08	单峰单谷	08: 33
黑龙江漠河站	122.37	53.5	单峰单谷	15: 37

表现出不同程度的震荡。这是由于晨间日出引起的大气热对流和湍流，导致近地面水气、气溶胶浓度发生变化，从而使得大气电场出现波动[17]。而随着太阳辐射的累积，地表温度不断升高，大气热对流和湍流加剧，人类活动也导致气溶胶浓度逐步上升，同时温度升高使得大气电离过程增加，带电离子浓度增大。根据式(8)和式(9)，气溶胶和带电离子浓度的增加都会导致大气电场值的增大，这种累积最终在 06:00 UT (对应当地时间 14:00 LT)左右达到影响电场的临界值，并在各台站出现明显的大气电场值上升。夜间，太阳辐射和人类活动减弱，并且昼夜温度变化加强了低层大气中热对流和湍流向上输送气溶胶的能力，使得低层大气中的气溶胶浓度减小，从而增大了近地面大气的电导率，最终导致大气电场的衰减[9, 26]。

2.4 晴天大气电场年变化

由图 3 还可以看出：位于中低纬度地区的广州肇庆站、成都郫县站、武汉九峰站等站点近 10 年的晴天大气电场幅值整体呈现出逐年降低的变化特征；而位于中高纬度的长春农安站、黑龙江漠河站等站点近 10 年的晴天大气电场幅值则表现出不一样的逐年变化特征，其中长春农安站电场幅值整体呈现出逐年增加的变化特征，而黑龙江漠河站 2011－2015 年电场幅值逐年增加，2016 年电场幅值较上一年突然衰减，并在 2016－2020 年重新呈现出逐年增加的趋势。为进一步定量探究这种电场幅值的逐年变化特征，将各台站近 10 年晴天大气电场幅值的最小值和最大值进行线性拟合。为了抑制少数异常点对拟合结果的影响，采用稳健最小二乘法进行拟合，拟合结果如图 3(f)所示，拟合得到的线性方程为

$$E_{\max} = 1.7240E_{\min} + 0.0175. \tag{12}$$

式中，$E_{\max}$和$E_{\min}$分别表示晴天大气电场幅值的最大值和最小值，单位均为$\mathrm{kV\cdot m^{-1}}$。拟合均方根误差为 0.0325，调整后的决定系数(拟合优度)为 0.9765，表明该次拟合效果较好，电场最大幅值与最小幅值之间存在线性强相关性，各站点近 10 年晴天大气电场幅值的逐年变化无论是递增还是递减均是线性的。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth，AOD)为消光系数在垂直方向上的积分，可用于估量大气污染程度，其物理意义为沿辐射传输路径、单位截面上气溶胶吸收和散射对太阳辐射产生的总削弱强度。AOD 受垂直方向上大气气溶胶的柱浓度影响，并与气溶胶浓度成正比[27]。因此，AOD 值可间接反映区域气溶胶浓度和大气污染程度。图 4 所示为各大气电场台站所处区域 2011－2020 年的年平均晴天 AOD 值变化及其线性拟合。从图 4 可以看出：广州肇庆、成都郫县、武汉九峰等站点区域的 AOD 值较高，并且逐年线性下降趋势明显，与站点所在区域大气电场幅值的逐年线性递减趋势相对应，这表明上述区域的大气污染程度较为严重，气溶胶浓度与大气电场值之间呈正相关关系，符合 2.2 节中大气污染较严重时的情况；而处于较高纬度的长春农安、黑龙江漠河等站点区域的 AOD 值则较低，其逐年变化趋势与当地大气电场幅值的变化趋势相似，但呈非线性，根据 2.2 节中的物理机制，在大气污染程度较轻时，大气电场值与该区域的气溶胶浓度之间呈非线性关系，并主要受全球效应的影响，其大气电场幅值的逐年递增可能揭示了全球雷暴活动的年变化趋势。

2.5 最大波峰出现时间与站点地理经纬度的关联性

由表 1 可知，最大波峰出现时间似乎是随纬度的增加而后移，但成都郫县站和长春农安站却例外。这里估计最大波峰出现时间可能同时与观测点的地理经纬度存在联系，因此对站点地理经纬度及最大波峰出现时间作多元线性回归，以探究三者之间的联系。首先对其中的离群值进行检测并剔除，最终剩余可用样本点数为 31，多元线性回归结果如图 5 所示。

得到的多元线性回归模型为

$$T = -0.8506L_{\mathrm{o}} + 0.4433L_{\mathrm{a}} + 95.732. \tag{13}$$

式中，T为最大波峰出现时间，L_{o}为地理经度，L_{a}为地

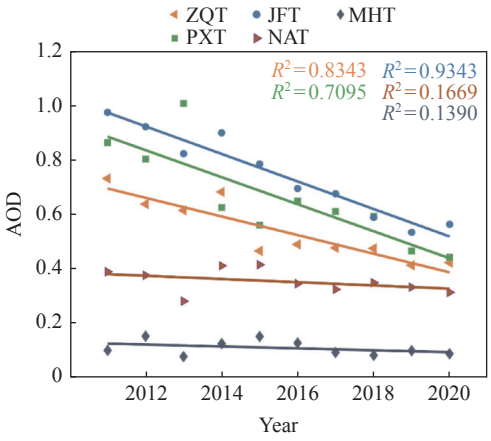


图 4 各站点区域晴天 AOD 值年变化趋势

Fig. 4 Annual trends in fair-weather AOD values at site area

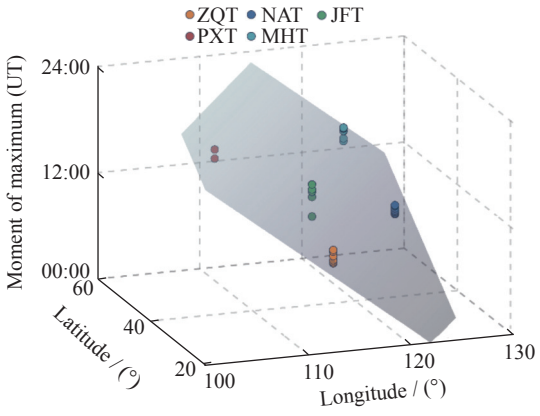


图 5 多元线性回归结果

Fig. 5 Results of multiple linear regression

理纬度。回归得到的三个估计系数 t 检验 p 值分别为 9.70×10^{-21}, 8.96×10^{-20}, 8.55×10^{-22}。模型 F 检验 p 值为 2.75×10^{-20}, 整体均方根误差为 0.7630, 调整后的决定系数为 0.9570。上述结果表明: 三个估计系数的 t 检验 p 值均远小于 0.05, 各项在 5% 水平上显著, 可拒绝原零假设; 对模型进行 F 检验的 p 值表明, 该模型是显著的, 台站地理经纬度与最大波峰出现时间相关性很强。从该回归模型中还可以看出, 最大波峰出现时间与地理经度呈负相关, 而与地理纬度呈正相关, 且地理经度对最大波峰出现时间的影响程度(权重)几乎是地理纬度的两倍。调整后的决定系数表明, 95% 的最大波峰出现时间变化与自变量地理经纬度相关, 剩余 5% 的最大波峰出现时间变化可能是测量随机误差或者人为因素等引起的。

分析认为, 上述模型表现出了最大波峰出现时间与观测站点地理经纬度的强相关性, 这可能是由于地理经纬度对当地日出时间的影响所造成的。太阳辐射会引起大气电离过程的增加, 并最终导致大气电场增强。 因此, 日出时间越早, 辐射电离过程越早积累, 大气电场峰值也就出现得越早。而日出时间主要受经度、纬度、海拔高度等因素的影响。综合以上影响因素, 在中国区域内, 地理经度越小、纬度越高, 则日出时间越晚, 反之则越早 [28], 这与本文模型中电场峰值出现时刻与经度呈负相关、与纬度呈正相关相符。但与此同时, 由于所统计站点的地理经纬度范围有限, 该模型也存在一定的局限性, 例如随着观测点经纬度范围的扩大, 上述回归模型所预测的最大波峰出现时间可能会超出 24:00 UT 或小于 00:00 UT, 这是目前该模型难以解释的, 或者这意味着该模型可能只适用于一定经纬度范围的局部地区。因此, 对于更大经纬度范围的最大波峰出现时间与地理经纬度间的关系仍需进一步的研究。

2.6 纬度效应

计算各站点晴天大气电场日平均值并作其年变化曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 各站点在近 10 年中均未出现明显的纬度效应, 即各站点晴天大气电场日平均值并未随站点纬度增加而增加, 与 Harrison 等[10] 在海洋上观测到的纬度效应不符, 这可能是陆地与海洋的气象因素和大气环境差异所导致[17]。

3 季节变化

基于以上数据筛选结果, 根据 24 节气进行季节月份分组(春: 2 月, 3 月, 4 月。夏: 5 月, 6 月, 7 月。秋: 8 月, 9 月, 10 月。冬: 11 月, 12 月, 1 月), 计算得到 5 个站点近 10 年的各季节晴天大气电场日平均值及最值。对夏季和冬季的晴天大气电场日平均值 F 检验所得 p 值为 0.0021, 远小于 0.05 的显著性水平, 这表明夏季与冬季的晴天大气电场日平均值显著不同。另外, 各季节晴天大气电场日平均值的四分位水平如图 7 所示, 中心标记表示中位数, 箱子的底边和顶边分别表示第 25 个和 75 个百分位数, 虚线以外的数据点为离群值。

分析图 7 可知: 冬季晴天大气电场日平均值的中

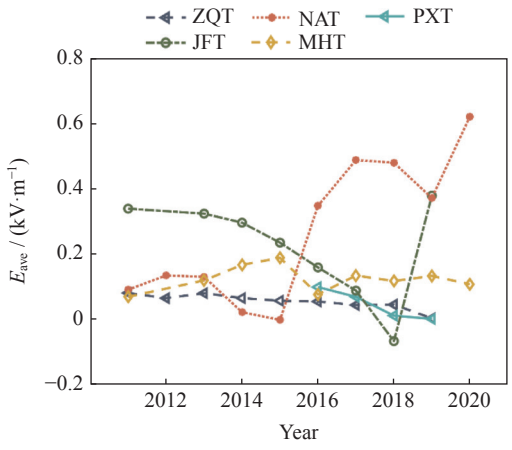


图 6 各站点晴天大气电场日平均值年变化

Fig. 6 Annual variation of daily mean value of fair-weather atmospheric electric field at each station

位数水平较高, 夏季较低; 且冬季的上四分位数、下四分位数水平较高, 夏季较低。这表明冬季晴天大气电场日平均值整体上高于夏季。该现象目前已在巴基斯坦伊斯兰堡站[8]、穆扎法拉巴德站[14]、英国雷丁大学大气观测站[29]、欧亚大陆 Irkutsk 的 8 个观测站[17]、中国西藏羊八井地区观测站[15] 等多个国内外站点被观测到。研究表明: 局部效应中的近地面气溶胶浓度主导了冬季晴天大气电场值大于夏季这一现象, 冬季燃煤取暖导致大气污染物浓度增大, 加之冬季相对湿度通常较高, 使得冬季气溶胶浓度较大, 大气电导率较低, 进而导致大气电场值较高 [13]; 而北半球夏季降水较为充沛, 降水对气溶胶粒子有冲刷作用, 导致夏季气溶胶浓度下降, 从而使得夏季大气电场值较低[17]。同样对 5 个站点近 10 年的各季节日平均晴天大气电场最小值–最大值作稳健最小二乘法拟合, 并给出各季节的最小值和最大值分布曲线, 计算结果如图 8 所示。

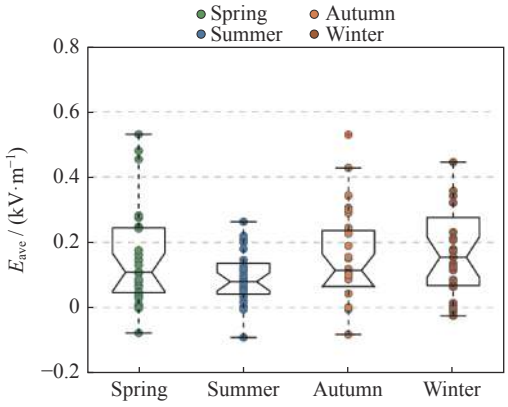


图 7 各季节晴天大气电场日平均值箱线

Fig. 7 Boxed plot of the daily mean fair-weather atmospheric electric field in each season

拟合得到的线性方程为

$$E_{s_max} = 1.85E_{s_min} + 0.0593. \tag{14}$$

式中, E_{s_max}和E_{s_min}分别为季节晴天大气电场值的最大值及最小值, 单位均为kV · m^{-1}。拟合均方根误差为 0.0284, 调整后的决定系数(拟合优度)为 0.9855。这表明该次拟合效果较好, 季节电场最大值与最小值之间同样存在线性强相关性, 各季节晴天大气电场最值变化仍然是线性的。图 8 中的最小值和最大值分布曲线显示: 各季节的晴天大气电场最大值主要集中于0 ∼ 1 kV · m^{-1}, 最小值主要集中于0 ∼ 0.5 kV · m^{-1}; 两种最值均近似呈正态分布; 各季节的最大值分布中心位置基本一致, 但夏季最大值的分布离散程度较小, 冬季较大; 夏季的最小值分布中心位置对应的电场值较小, 冬季则较大, 在分布离散程度上, 仍然是夏季最小值的分布离散程度较小, 冬季较大。另外, 季节性的与年度的最小值–最大值拟合斜率近似相等, 这表明晴天大气电场的最小值和最大值在年度和季节两个时间尺度上的变化规律基本一致。

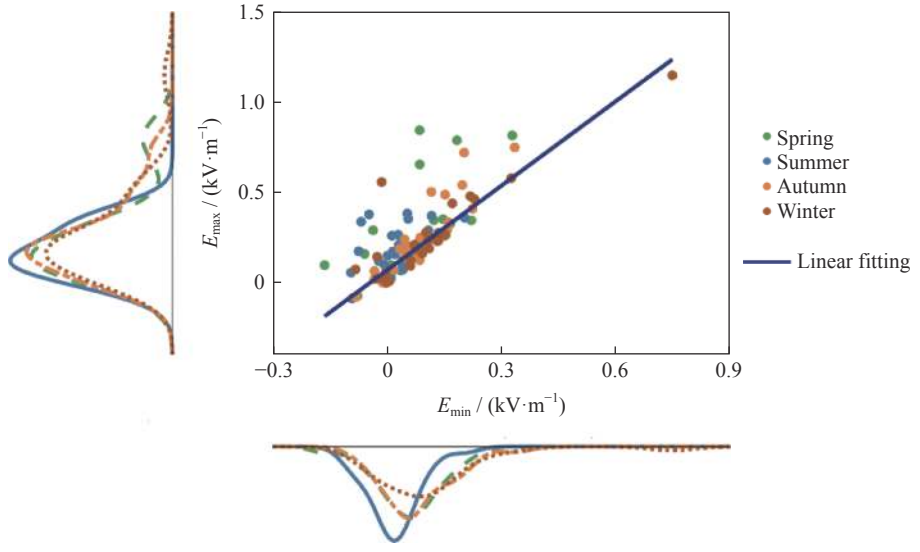


图 8 各季节日平均晴天大气电场最小值–最大值拟合及分布

Fig. 8 Minimum-maximum atmospheric electric field fitting and distribution of daily average fair-weather in each season

4 结论

基于子午工程 5 个站点 2011－2020 年的近地面晴天大气电场观测数据，采用高斯加权移动平均滤波的方法对电场数据进行平滑滤波，计算得到晴天大气电场日平均曲线及相关参数，给出相关物理机制解释，并在年变化、季节变化、日变化三种时间尺度上进行相关分析，得出如下结论。

(1) 低纬度站点的日平均晴天大气电场峰谷类型为双峰双谷型或多峰多谷型，而中高纬度站点则为单峰单谷型。其中，广州肇庆站、武汉九峰站、黑龙江漠河站的波峰出现了逐年左移或右移的趋势。

(2) 位于中低纬度地区的广州肇庆站、成都郫县站、武汉九峰站等站点，近 10 年的晴天大气电场幅值整体呈现出逐年降低的变化特征；而位于中高纬度的长春农安站电场幅值整体呈现出逐年增加的变化趋势，黑龙江漠河站则出现了两次逐年增加的趋势。采用稳健最小二乘法对各台站 2011－2020 年日平均晴天大气电场最小值–最大值的拟合结果显示，上述逐年变化无论是递增还是递减，均是线性的。结合 AOD 值的年变化分析，验证了所提出的物理模型。

(3) 最大波峰出现时间与观测站点地理经纬度的多元线性回归表明，三者之间呈强相关性，最大波峰出现时间与地理经度呈负相关，而与地理纬度呈正相关，且地理经度对最大波峰出现时间的影响程度(权重)约为地理纬度的两倍。

(4) 各站点在近 10 年中均未出现明显的纬度效应。

(5) 冬季的晴天大气电场日平均值水平较高，夏季较低，各季节的日平均晴天大气电场最小值、最大值均近似呈正态分布。

(6) 稳健最小二乘法对各季节日平均晴天大气电场的最小值–最大值拟合结果表明，最小值和最大值在年度和季节两个时间尺度上的变化规律基本一致。

致谢 本文使用的大气电场数据来源于国家重大科技基础设施子午工程。

参考文献

[1] 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[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(1): 40-48

[2] WILSON C T R. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1921, **221**(582/583/584/585/586/587/588/589/590/591/592/593): 73-115

[3] TINSLEY B A, BURNS G B, ZHOU L M. The role of the global electric circuit in solar and internal forcing of clouds and climate[J]. *Advances in Space Research*, 2007, **40**(7): 1126-1139

[4] Pulinets S, Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earth-Quakes[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2004

[5] 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)

[6] JÜ Zeli, LÜ Xinliang, PU Lu, *et al*. Method of lightning nowcasting warning based on atmospheric electric field characteristics[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(4): 111-117 (琚泽立, 吕新良, 蒲路, 等. 基于大气电场特征的雷电临近预警方法[J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 111-117)

[7] XING Hongyan, ZHANG Qiang, JI Xinyuan. Experimental research on thunderstorm nowcasting based on atmospheric electric field data[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2017, **40**(1): 111-117 (行鸿彦, 张强, 季鑫源. 基于地面电场资料的雷暴临近预报研究[J]. 大气科学学报, 2017, **40**(1): 111-117)

[8] 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

[9] YANG Chao, ZENG Jinquan, JIANG Huiyuan, *et al*. Diurnal variation and its influencing factors of atmospheric electric field under clear days near the surface of the west side of the Taiwan strait[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, **40**(3): 143-149 (杨超, 曾金全, 江慧远, 等. 台湾海峡西岸晴天近地面大气电场日变化及其影响因素[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, **40**(3): 143-149)

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

[11] YANIV R, YAIR Y, PRICE C, *et al*. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **172/173**: 119-125

[12] KUBICKI M, ODZIMEK A, NESKA M. Relationship of ground-level aerosol concentration and atmospheric electric field at three observation sites in the Arctic, Antarctic and Europe[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178/179**: 329-

346

[13] BHATTACHARYYA T, CHATTERJEE A, DAS S K, *et al*. Study of fair weather surface atmospheric electric field at high altitude station in Eastern Himalayas[J]. *Atmospheric Research*, 2020, **239**: 104909

[14] GURMANI S F, AHMAD N, TACZA J, *et al*. Comparative analysis of local and global atmospheric electric field at the Northern Pakistan[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, **206**: 105326

[15] XU Bin, ZHANG Ying, JIA Huanyu, *et al*. Periodic variations of fair-weather atmospheric electric field near ground in Yangbajin of Tibet[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, **28**(2): 314-318 (徐斌, 张颖, 贾焕玉, 等. 西藏羊八井地区近地晴天大气电场周期变化[J]. 高原气象, 2009, **28**(2): 314-318)

[16] LIU Chang, ZHANG Jingwen, JIN Xiaobing, *et al*. Characteristics of atmospheric electric field under different weather conditions in Chengdu[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2016, **36**(2): 88-91 (刘畅, 张婧雯, 靳小兵, 等. 成都地区不同天气条件下大气电场特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, **36**(2): 88-91)

[17] ZHANG Yi, ZHANG Weibin, WANG Zhenhui, *et al*. Analysis of fair-weather atmospheric electric field over Eurasian Continent[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(5): 703-709 (张祎, 张卫斌, 王振会, 等. 欧亚大陆晴天大气电场变化特征统计分析[J]. 大气科学学报, 2015, **38**(5): 703-709)

[18] LI Renkang, CHEN Tao, LI Wen, *et al*. A dataset of the atmospheric electric field obtained from the Meridian Project during 2010－2020[J]. *China Scientific Data*, 2021, **6**(2): 146-157 (李仁康, 陈涛, 李文, 等. 2010－2020年大气电场数据集[J]. 中国科学数据: 中英文网络版, 2021, **6**(2): 146-157)

[19] CAO Pengtao, ZHANG Min, LI Zhenchun. An adaptive filtering denoising method based on gen-eralized Stransform and Gaussian smoothing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, **53**(6): 1128-1136,1187 (曹鹏涛, 张敏, 李振春. 基于广义S变换及高斯平滑的自适应滤波去噪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2018, **53**(6): 1128-1136,1187)

[20] HARRISON R G, APLIN K L. Mid-nineteenth century smoke concentrations near London[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(25): 4037-4043

[21] SILVA H G, CONCEIÇÃO R, MELGÃO M, *et al*. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(11): 114025

[22] CONCEIÇÃO R, MELGÃO M, SILVA H G, *et al*. Transport of the smoke plume from Chiado's fire in Lisbon (Portugal) sensed by atmospheric electric field measurements[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, **9**(3): 275-283

[23] BO T L, HUANG Z M. The properties of vertical electric field during haze event in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(7): 101109

[24] FRANK-KAMENETSKY A V, TROSHICHEV O A, BURNS G B, *et al*. Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A1): 179-190

[25] SHUMILOV O I, KASATKINA E A, FRANK-KAMENETSKY A V. Effects of extraordinary solar cosmic ray events on variations in the atmospheric electric field at high latitudes[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, **55**(5): 650-657

[26] KASTELIS N, KOURTIDIS K. Characteristics of the atmospheric electric field and correlation with CO_2 at a rural site in southern Balkans[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**(1): 3

[27] ZHANG Chenhe, ZHAO Tianliang, WANG Fu, *et al*. Variations in aerosol optical depth over three northeastern provinces of China, in 2003-2014[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 476-484 (张宸赫, 赵天良, 王富, 等. 2003～2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 476-484)

[28] Stefano Maggiolo, The time it takes to change the time[EB/OL]. (2015-02-17)[2021-08-13]. http://blog.poormansmath.net/the-time-it-takes-to-change-the-time/

[29] BENNETT A J, HARRISON R G. Variability in surface atmospheric electric field measurements[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, **142**: 012046

(责任编辑: 孙伟英)