近地表大气电场研究进展与发展趋势

闫召爱[1,2]　李文[1,2*]　孙志斌[1,2*]　罗静[1]　徐轻尘[1]　陈涛[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 电场变化是研究地球各圈层耦合过程的重要内容。随着空间科学的快速发展，天基、地基和空基等多平台观测手段的广泛应用，积极推动了近地表大气电场的研究进展。本文系统阐述了由卫星和无人机等构成的多平台协同观测网络，及其在空间电场三维动态监测中的应用；揭示了大气电场异常与太阳活动、雷暴闪电活动以及地震前兆"湾流型"负异常之间的关联性，指出突变型大气电离信号可作为地震短临预报的重要指标之一。研究表明，大气静电模型和电流脉冲特征在航空航天安全、气象活动研究和日地关系等领域具有重要的应用价值。最后，本文总结了当前近地表大气电场研究的主要发展趋势。

关键词 近地表大气电场；多圈层耦合；地震前兆

中图分类号 P401

Research Progress and Development Trends of Near-Surface Atmospheric Electric Fields

Zhaoai Yan[1,2], Wen Li[1,2*], Zhibin Sun[1,2*], Jing Luo[1], Qingchen Xu[1], Tao Chen[1]

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

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

Abstract Variations in atmospheric electric fields constitute a critical component in studying the coupling processes among Earth's spheres. With the rapid advancement of space science, the extensive application of multi-platform observation systems (including space-based, ground-based, and airborne approaches) has significantly propelled research progress in near-surface atmospheric electric fields. This paper systematically elaborates on a coordinated multi-platform observation network comprising satellites, and unmanned aerial vehicles (UAVs), , along with its application in three-dimensional dynamic monitoring of spatial electric fields. The study reveals correlations between atmospheric electric field anomalies and solar activities, thunderstorm/lightning events, as well as pre-seismic "bay-shaped" negative anomalies, demonstrating that abrupt atmospheric ionization signals can serve as crucial indicators for short-term earthquake prediction. Research indicates that atmospheric electrostatic models and current pulse characteristics hold significant application value in aerospace safety, meteorological studies, and solar-terrestrial relationship research. Finally, this paper summarizes the main development trends in current near-surface atmospheric electric field research.

Key words near-surface atmospheric electric field; multi-sphere coupling; seismic precursor

*国家重点研发计划“重大高风险入侵物种跨境追踪溯源与前哨廊道监测拦截技术研究”项目（2023YFC2604900）课题四“重大高风险入侵物种口岸检测技术与多模态信息集成移动装备研发”（2023YFC2604904）和国家重点研发计划“高精度电子背散射衍射探测器研制”（2023YFF0719800）课题一“高动态范围 sCMOS 相机研制”（2023YFF0719801）。中国科学院国际伙伴计划（国际子午圈）（183311KYSB20200003），国家重大科技基础设施子午工程（子午工程一期），空间环境地基综合监测网（子午工程二期），中国科学院战略性先导科技专项（XDA15350200）和中国科学院国家空间科学中心”攀登计划“共同资助。

最新录用

0 引言

大气电场是表征地表与电离层之间电势分布的重要物理现象，其形成机制主要源于地表携带的负电荷与电离层正电荷构成的全球大气电路系统，并受太阳风、宇宙射线等空间环境扰动的日地关系作用，雷暴活动、云微物理过程等气象过程，气溶胶浓度、放射性物质分布等地表参数边界层特征多尺度因素共同影响。

大气电场是由持续雷暴电流维持，并通过晴天区域耗散的电离层与地表间电势差的表现形式。垂直大气电场测量以地球球面坐标系为基准，其正方向由电离层指向地面。90%以上的近地表大气电场强度由约2皮安/平方米的全球大气电路电流密度和局地大气电导率共同决定。气溶胶、放射性物质等边界层效应使地表大气电场调制幅度高达30%。雷暴发挥大气电压发生器作用，海陆交界面调控大气电流分布。主要发生在美洲和亚洲地区的全球雷暴活动日周期振荡，使地表大气电场的世界时在约18时达到极大值，在约04时降至极小值。全球各地近地表大气电场在晴天条件下大多为100伏特/米左右正值Error: Reference source not found。

陈涛等人分析 2021 年 4 月 16 日河北滦州 M_S4.3 地震前中国科学院国家空间科学中心在天津市宝坻区和廊坊市永清县两观测站均观测到大气电场异常。宝坻站监测到过境云与地质活动共同产生的大气电场异常信号；永清站监测到湾流型持续大气电场异常信号，属于典型临震前小时尺度前兆信号且幅度和持续时间均明显高于宝坻站。对比两站电场异常期间气象活动和空间天气活动发现，两站电场异常信号表现方式不同。分析结果表明，通过分析多源活动产生的空间静电演变过程，在一定气象活动范围内，从大气静电监测数据中提取中等以上强度地震前兆信息Error: Reference source not found。

Chen T 等人研究了一种小时尺度陆地地震前兆现象。通过对 23 次中国内陆地震事件的发震时间、震中位置、震级、震区天气条件、前兆起始时间及持续时长等参数系统分析，发现震中附近天气晴朗，在地震前约 2～48 小时可观测到大气静电负异常信号。研究实现临近中等强震的单站预测，阐明前兆信号物理机制：地震过程中，地下放射性气体大范围微裂隙释放～大气使大气发生强电离，分离的正负离子形成特殊宏观电场。震前 2～48 小时临震阶段反映稳定的构造活动过程Error: Reference source not found。

Han,R 等人认为对氡异常、热异常和水位变化等地震前兆信号的研究历史悠久。阐明分析震前大气垂直电场异常的物理机制，以汶川地震验证了模型的正确性。经蒙特卡洛模拟，利用震前氡浓度随高度变化计算不同高度放射性氡衰变的电离率。通过求解正负离子对流-扩散偏微分方程，计算得到震前地表～10 米高度的大气垂直电场范围为-593V/m～-285 V/m。实际观测表明，5 月 12 日汶川地震前，温江和郫县出现大气电场负异常，峰值分别为-200 V/m 和-600 V/m。模拟数据与汶川地震实测结果相符合，该物理机制为大气电场异常作为地震前兆信号提供了理论支撑Error: Reference source not found。

V. G K 等人为解决大气电场地面监测难题，需监测局部地区变化中的全球性影响因素。大气电场日变化体现电离层电位的全球变化，受近地表电极效应干扰。产生的电极层结构主要取决于湍流强度、空气电导率及电场强度。利用地表大气层电极效应理论推导全电流方程，模拟计算不同气象条件不同高度大气电场的日变化特征。结果表明：全球大气电场极值点位置和大小分别与湍流系数、空气电导率及电极层高度之间存在相关性。为大气电场监测等地球物理学问题提供解决方案Error: Reference source not found。

O R 研究"晴天"条件下地震区近地表大气电场中的"湾流型"负异常现象。观测结果表明，负异常特征与构造地震的近地表岩石形变有关。由大气电学理论确定异常源为：在负极性电导率垂直梯度作用下，近地表空气小离子局部成为负空间电荷。研究表明电荷及电场负异常具有形变-释放特性。研究了氡与钍射气的作用差异，发现在某些情况下钍射气比氡更具影响力Error: Reference source not found。

Wu, Z 等人认为离散元建模是颗粒动力学模拟的重要手段。研究了电荷交换模块和电场

力模块：电场力模块控制颗粒对电场的响应，电荷交换模块实现颗粒与带电几何体接触时的电荷转移。通过静电粉末沉积实验高速摄像与理论计算，表明模型较好模拟实验过程。在调整电场模型后，静电场模拟结果提升了颗粒悬浮的模拟精度Error: Reference source not found。

Krasheninnikov V A 等人提出了晴天区域大气污染数值-理论模型。利用俄罗斯莫斯科地球物理监测中心与米赫涅沃地球物理观测站的电场强度均值比，结合近地表颗粒物垂直分布特征，估算特大城市区域内、外颗粒物浓度差异Error: Reference source not found。

陈涛等人提出大气电场强度是大气电学的重要参数。2019 年 8 月 26 日和 8 月 28 日，中国科学院鸿鹄专项团队在青海省海西蒙古自治州大柴旦镇地区，通过放飞载有磨式电场仪的探空气球，测量了不同高度大气电场强度。结果表明，高度是决定大气垂直电场大小的主要因素，地区风场也较大影响着大气电场强度。晴天大气条件下，有无薄云在一定程度上影响大气电场测量，有云条件下，风速影响云的形成从而间接影响大气电场。柴达木盆地存在易受影响的大气电场边界层，分析表明该层厚度在 3km 以上。对该层大气电场变化以及 3.6km 以上大气电场晴天无云时的分布进行了拟合分析Error: Reference source not found。

高志旭等人利用 10 年来子午工程 5 个大气电场观测站的近地晴天大气电场观测数据，在年变化、季变化和日变化三种不同时间尺度上进行了对比分析。结果表明：不同纬度站点日均晴天大气电场峰谷类型不同，部分站点峰值出现了逐年左移或右移的趋势；在电场幅值变化方面，位于中低纬地区站点呈逐年减小的变化特征，而位于中高纬的站点呈逐年增加的变化趋势，且年变化均是线性的；多元回归分析表明，最大峰值出现时间与地理经度呈负相关，与地理纬度呈正相关；各站点近 10 年来均未出现明显的纬度效应；冬季晴天大气电场日均值水平较高，夏季较低，且各季节日均晴天大气电场最小值及最大值均近似呈正态分布；在年度和季节两个时间尺度上，最小值及最大值变化规律基本一致。Error: Reference source not found。

1 宇宙线对近地表大气电场的影响

Funke B 等人研究分析 2003 年 10 月末"万圣节"太阳质子事件后，在北半球 40°-90°N：25-0.01hPa 高度，Envisat 卫星被动大气探测干涉仪观测到 NO、NO_2、H_2O_2、O_3、N_2O、HNO_3、N_2O_5、HNO_4、ClO、HOCl、$ClONO_2$ 十一种成分变化与 9 种大气模型的模拟结果。经多种模型研究对比，研究了太阳质子事件对 NO_y 和臭氧变化的影响因素，通过温度及 CH_4、CO 示踪剂验证了气象条件对化学响应的影响。通过对太阳质子事件产生的臭氧损耗影响模拟计算分析，平均偏差小于 5%，NO_y 增量在 1hPa 附近增加 30%，与电离率参数偏差、模型或传输误差有关。通过对 NO_y 组成成分分析表明，离子-离子复合化学反应产生 HNO_3、水团簇离子等。模型研究会使 H_2O_2 产生上升偏离，极区平流层上层 OH/HO_2 比值会产生下降偏离。氯组分扰动分析表明，极夜区原有 ClO 含量不足会使模型计算得到的 $ClONO_2$ 含量下降。研究发现，数天短时计算模型的大气初始条件及气象变化差异会对计算结果产生重要影响Error: Reference source not found。

Jackman C H 等人提出太阳质子事件会使地磁纬度大于 60°的中高层大气极区的 H、OH、HO_2 和 N、NO、NO_2 成分增加。观测表明，在 2000 年 7 月和 11 月太阳质子事件期间，UARS HALOE 和 NOAA14 SBUV/2 卫星观测到臭氧浓度下降超过了 30%。因此太阳质子事件产生的 HO_x 成分会使中间层和平流层上层臭氧快速下降。由于 HO_x 成分大气寿命较小使臭氧损耗持续数小时～数天。而 NO_x 成分会在数小时～数周内转化为 N、NO、NO_2、NO_3、N_2O_5、HNO、NO_4、$ClONO_2$、$BrONO_2$ 氮化物成分 NO_y，在平流层太阳活动低谷期持续数月。1989 年 10 月和 1972 年 8 月发生了两次强烈太阳质子事件，使极区平流层持续数周臭氧含量衰减超过 10%；2000 年 7 月第三次太阳质子事件后，NOAA14 SBUV/2 卫星观测到数日臭氧下降了几个百分比，比 UARS HALOE 卫星观测到的中间层 NO_x 浓度增加超过 50ppbv。研究了太阳质子事件对中高层大气臭氧及其成分的影响机制Error: Reference source not found。

Tinsley B A 等人研究了与空间粒子流 11 年周期有关的云特性变化，通过离子成核和电场作用的物理过程进行解释，硫酸和水蒸气凝结形成气溶胶离子，在特定条件下云凝结核尺寸会增加。在云上下层之间的空间电荷区形成电场屏蔽效应，全球大气电路垂直电流密度会使云层内电阻增加，空间电荷是由于正负离子的电势差产生的静电电荷密度而形成。理论计算表明气溶胶粒子静电电荷作用会增加云中液滴的静电屏蔽作用，气溶胶屏蔽效应对原位冰核和云凝结核形成具有重要作用，这两种机制与大气中银河宇宙线产生的离子有关，垂直电流密度与银河宇宙线通量、辐射带 MeV 电子流和太阳风产生的电离层电位有关。宇宙线和垂直电流密度分别与"太阳活动-太阳风-银河宇宙线-云-气候"存在因果关系 Error: Reference source not found。

Mironova I A 等人分析了不同物理机制产生的高能电子沉降事件。利用摩尔曼斯克地区气球观测与"流星-M2"低轨卫星数据，研究了高能电子沉降对大气或电离层的影响。利用能段为数百 keV～MeV 的卫星观测测量了高能电子沉降能谱，通过卫星与气球观测计算电离率，研究在地磁扰动期间大气-电离层对高能电子沉降的响应特征。结果表明：卫星与气球观测获得的高能电子沉降能谱趋势相同，粒子通量强度存在差异；地磁暴活动末期电离率低于地磁暴活动高峰期 Error: Reference source not found。

Vlasova N A 等人研究了 2022 年 3 月 30 日、3 月 28 日与 4 月 2 日前后太阳质子事件特征。研究表明，行星际与近地空间高能质子通量增加与连续发生的 M4.0、X1.3 和 M3.9 级太阳 X 射线耀斑及日冕物质抛射有关。针对 3 月 30 日太阳质子事件，利用行星际空间 ACE/WIND/STEREO A 卫星、DSCOVR 卫星、850 公里极轨"流星-M2"卫星、地球静止轨道 GOES-16 卫星和"电子-L2"卫星等多源卫星数据研究表明：3 月 28 日耀斑中的质子加速事件被来自于太阳爆发活动的行星际日冕抛射物部分屏蔽；不同能量粒子中最大质子通量来源于行星际日冕抛射物粒子通量。近地轨道的太阳质子空间分布与约 50 分钟之前拉格朗日 L1 点处相似 Error: Reference source not found。

Chilingarian A 研究了银河系中的初级宇宙线高能粒子在空间等离子体中的多种加速作用。初级宇宙线高能粒子进入地球大气层形成广延大气簇射，广延大气簇射在地面几平方公里区域产生上百万次级基本粒子。不同粒子簇射产生的次级粒子会受到雷暴强电场调制作用。通过地闪暴实现粒子通量脉冲放大，在粒子探测器计数率时序信号上形成峰值，自由电子加速倍增形成电子伽玛雪崩。大气雷暴电子加速会改变广延大气簇射触发频率。大气不同高度广泛存在的自由电子会实现广延大气簇射由小到大的加速作用。广延大气簇射核随机撞击粒子探测器阵列会产生相对论粒子短暴。高山区域存在的闪电活动也能产生额外的种子电子。位于高山地区的粒子探测器、电场传感器和闪电测量仪长期探测，研究了次级粒子流、电场与闪电复杂作用，为大气高能物理学领域提供了重要信息 Error: Reference source not found。

2 大气电场与下垫面放射性气体的关系

Igarashi G 等人分析了 1995 年 1 月 17 日在日本兵库县神户南部发生大地震前，当地地下水氡浓度异常升高。观测数据表明，从 1994 年 10 月下旬～12 月底氡浓度已增长约 4 倍。在地震发生前 9 天氡浓度达到峰值，超过初始观测值的 10 倍，随后开始下降。氡浓度异常变化是这次灾难性地震的前兆现象 Error: Reference source not found。

Li W 等人研究了晴天条件下全球大气电路垂直大气电场。研究发现晴天条件下只要观测到向上的垂直大气电场，随后 2-48 小时内就会发生地震。该现象的物理机制尚未得到验证。该研究建立了一种空气中四种带电粒子作用力的物理模型，证明较重正离子与较轻负离子会快速分离，最终通过该电荷分离过程形成反向晴天静电场 Error: Reference source not found。

ri, Y 等人分析震前氡气释放是电磁前兆现象的主要物理机制之一。利用准静态条件下全球大气电路理论，分析 1995 年神户地震发生前后大气氡浓度变化对大气电场环境的影响。研究表明：氡气释放会增加小离子数密度和大气电导率，使低层大气电场减弱约 40-50%，而对高层大气影响甚微。上下层大气差异会产生电离层电位降低。近地表区域准静态变化可解释离子数密度和电场等地震前兆现象。在电离层高度，需考虑准静态过程和大气瞬态电动过程等短时效应，由此理解大震相关氡释放引发的岩石圈-大气圈-电离层耦合作用 Error: Reference source not found。

Sorokin, V.M 等人研究了低层大气电导率扰动对地震区域直流电场的影响。该扰动与地

震活动增强产生氡等放射性元素释放，新电离源由放射性增强形成。通过计算模拟分析电离率随高度变化，发现电离源因平衡态离子数密度改变而影响大气电导率。定量化研究了电导率扰动高度分布，表明低层大气电导率的变化对全球大气-电离层电路电流传输有影响，该影响源于地震区域上方外部电流。研究计算了地表和电离层直流电场的扰动强度 Error: Reference source not found。

Chen, Z 等人分析活动断裂带释放的氡是大气环境中持续放射性污染源，该研究调查了中国首都活动断裂带土壤气体中氡的种类、浓度和通量，并发现活动断裂带土壤气体释放的氡主要有两种形式：一是透过渗透性土壤扩散的氡气，二是沿断裂带上涌的氡气。因砂岩储层铀元素富集及岩层渗透性较高，渤海湾盆地断裂带氡浓度和通量明显偏高。强震引发持续性的氡释放增强，1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震震中丰南区观测到的最高通量达 334.56 毫贝可勒尔/平方米·秒。根据 GB 50325-2001，2006 版中国《民用建筑工程室内环境污染控制规范》标准，太行山前断裂带以西盆岭构造区 22 个测点中的 8 个达到二级水平，渤海湾盆地 14 个测点中的 13 个达到二～四级水平。因断裂带氡释放会潜在影响周边居民健康，建议采取相应防护措施。并对活动断裂带氡浓度进行风险研究 Error: Reference source not found。

Pulinets S A 等人提出氡浓度测量是地震预测研究中的主要技术手段之一。观测表明，氡浓度在强震前数月会逐渐升高、在震前几天出现急剧增长且在震前数小时骤降。因应力作用该现象通常局限于地下水被挤出并由裂隙释放的震源区，此时也会出现震前电离层异常变化电磁前兆现象。一种前兆是穿越潜在震区的甚低频信号相位发生变化，理论计算表明该变化与"地球-电离层"波导的电导率改变有关；另一种前兆是电离层峰值电子密度发生变化，在当地时间 3 时、6 时和 18 时的标度值与氡浓度变化呈高度负相关性，观测现象表明电离层变化与氡浓度之间存在耦合关系，耦合通过震前活动断裂带上空大气-电离层系统电动力学性质改变实现。观测现象无法完全由大气电导率变化来解释，而氡同时释放的亚微米金属气溶胶对起着重要作用。当甚低频信号穿过核电站上空时，爆炸反应堆释放的放射性尘埃产生相似信号相位异常，在切尔诺贝利核事故中曾出现类似的辐射与尘埃组合效应。因此，可通过监测地震活动区的氡和金属气溶胶预测强震，对大气-电离层系统电动力学的影响也能合理解释电离层中各类异常变化 Error: Reference source not found。

Omori, Y 等人分析了大震前观测到的氡异常释放现象，该现象被认为与震前大气电场剧变和电离层扰动等电磁异常有关。通过分析大气氡浓度数据，研究了震前氡异常对大气电学环境的影响。研究表明：氡释放量遵循地壳损伤演化幂律特征，震前随时间呈幂律增长；氡释放不仅会使大气电场强度降低 40%，还能产生 10^4-10^5 V/m 量级的强电场扰动，强度足以引发电离层异常。变化范围与已观测大震电磁前兆现象相符合 Error: Reference source not found。

3 近地表大气电场的几个特征

Smirnov S 研究了 1997 年～2002 年堪察加半岛观测到的 103 例近地大气准静态电场"湾流型"凹陷现象。结果表明：该凹陷持续 40-60 分钟，电场强度下降 106V/m～300 V/m。该参数与地震震级和震中距离无关。通过近地大气准静态电场异常实现 24 小时前地震预测的概率为 36%Error: Reference source not found。

Li L 等人提出大气电场是研究地球与电离层间电荷密度分布的重要物理参数，日变化特征能反映区域大气电学特性。研究利用 2021 年希腊克桑西站、中国庄河站和英国雷丁大学站的观测数据，由气象数据与地磁活动数据筛选出晴天大气电场数据，绘制了平均晴天大气电场曲线。对比不同站点日出日落时间与气溶胶浓度，分析了各站季节性差异、站间差异及与卡内基曲线的偏离特征，研究表明该差异与气溶胶浓度呈正相关、特定站点平均晴天大气电场曲线峰谷位置和变化趋势等不受季节影响 Error: Reference source not found。

Li L 等人研究认为大气电场的变化受太阳活动、气象活动和地质条件共同调制。研究建

立了晴天大气电场日变化基础数据集，深入分析了区域特征。首先统计了 2022 年 3 月 1 日～8 月 1 日期间中国南极中山站与北京昌平站的晴天大气电场日变化数据；其次分析了同期南极 40 个和北京 37 个晴天大气电场平均日变化曲线；最后解释了两地变化的差异及成因并给出合理的误差分析Error: Reference source not found。

Harrison R G 等人提出垂直传导电流由全球电离层电位和地表～电离层间的总电阻决定。在地表被称为"地空电流"，密度随电离层电位和柱状垂直电阻变化。1906 年 C.T.R.威尔逊提出地空电流测量技术，1909 年英国气象局在伦敦北纬 51°28′，西经 0°19′的丘天文台实现了该技术。直～1979 年研究人员利用威尔逊提出的技术在晴朗午后持续开展地空电流、电位梯度和正极性空气电导率同步测量。研究首次研究了核试验时期和 1956 年英国《清洁空气法案》实施期的月均值测量数据，这两次事件均对测量结果产生影响。丘天文台地空电流密度年均值分别为：1909 年～1931 年为 0.97pA/m^2、1932 年～1949 年为 1.04pA/m^2 和 1967 年～1979 年为 1.41pA/m^2Error: Reference source not found。

Märcz F 等人研究 1962 年北纬 47°38′，东经 16°43′的匈牙利纳吉岑克地球物理观测站测量的大气垂直电位梯度。1920 年～1981 年北纬 55°19′，西经 3°12′的苏格兰埃斯克代尔缪尔观测站的大气垂直电位梯度呈长期下降趋势，这反映了与宇宙线减弱相关的大气电场全球变化。1962 年～2001 年纳吉岑克站大气垂直电位梯度下降达 40%，该变化与 1966 年～1978 年北纬 51°28′，西经 0°19′的伦敦丘站测量的地空电流变化一致。通过对比分析埃斯克代尔缪尔与纳吉岑克两站长期大气垂直电位梯度数据，表明纳吉岑克站局部效应不是主要因素，且进一步证实了"20 世纪初～今全球大气电场强度持续减弱"的假说Error: Reference source not found。

Li W 等人提出近地表大气静电场是理解全球大气电路模型及气候变化影响的关键参数。在分析太阳活动、地质活动与大气电场相互作用之前，首先必须厘清特定区域晴天大气电场日变化基准曲线。通过 2022 年云南省大气电场联网观测数据，分析了晴天与扰动天气下楚雄、牟定、禄丰和大理四站组成四边形阵列的大气电场分布特征，重点分析了晴天大气电场日变化曲线波动规律及与卡内基曲线的差异Error: Reference source not found。

Chalmers J A 阐述了大气电学各研究领域关键问题。首先回顾大气电学发展史，其次系统论述基本原理，再深入分析电荷分离、闪电放电、电荷传输、垂直电位梯度、离子与核等专业技术概念。在气象学研究领域具有重要意义Error: Reference source not found。

Harrison R G 分析认为在富兰克林的研究后不久，科学家便在远离雷暴的"晴天"区域发现了大气电场。开尔文通过研制静电仪和早期记录数据探寻起源，最终 C.T.R.威尔逊通过天气电荷交换扰动使电离层带电，通过晴天区域微弱垂直电流密度研究全球大气电路模型。分析地球及行星大气中晴天大气电学的作用，例如全球大气电路电流密度与云等大气过程。早期大气静电研究为城市空气污染提供重要数据Error: Reference source not found。

Smirnov S 研究了 1997 年～2016 年堪察加半岛中纬度地区帕拉通卡观测站大气电场的季节与年际变化。观测结果表明，电场强度存在稳定的季节性峰值与低谷。该观测站位于活跃的地质区，原本较大正趋势逐渐转为平缓负趋势，且近地面大气电场呈突变趋势。变化与观测区域氡释放强度改变和堪察加半岛火山活动变化有关Error: Reference source not found。

Tacza J 等人分析地面电位梯度变化对监测全球大气电路及太阳与地球物理现象具有重要意义。研究因气象等局部地区因素干扰电位梯度。多站点地面电位梯度时序与频谱分析能有效降低局部地区效应，从而获得全球性影响。研究首次完成对南半球东方站、康科迪亚站哈利站、卡斯莱奥站、北半球索丹屈莱站和雷丁站的地面电位梯度数据频谱分析。通过 Lomb-Scargle 周期图和小波变换，分别研究了主要周期及振幅随时间的变化规律。所有站点均检测到 0.5 天、1 天、180 天和 365 天的周期性信号，其中在 6-8 月中 0.5 天的周期性信号最强，而在 12-2 月中 1 天的周期性信号较强。多站点还观测到 27 天和 45 天的周期性信号。通

过地面电位梯度与宇宙线、马登-朱利安振荡指数及气象参数的交叉小波分析表明，27 天的周期性信号与太阳自转相关，45 天的周期性信号与马登-朱利安振荡有关。当经过公转相互作用区时，地面电位梯度与宇宙线的 27 天周期性信号强度较高 Error: Reference source not found。

Huang A 等人对青藏高原中部纳木错湖热力特征构建了 FLake、WRF-Lake 和 CoLM-Lake 模型。结果表明：在默认参数下这三个模型均存在明显的垂直温度剖面模拟误差。通过敏感性实验对 FLake 和 CoLM-Lake 的三个关键参数以及 WRF-Lake 的四个关键参数分别调整后发现，多参数协同调优与单参数调整相比，模型性能得到更大提升。核心改进包括：将最大密度水温从 4°C 调整为 1.1°C 可有效改善冷季垂直热结构；降低 FLake 光衰减系数能使暖季混合层加深、温跃层增温；减小光衰减系数并增强湍流混合可有效提升 WRF-Lake 和 CoLM-Lake 的暖季模拟效果；而 WRF-Lake 采用参数化方案可改善暖季水温剖面模拟效果 Error: Reference source not found。

郝建国等人通过对华北地区震前大气电场异常观测研究，全面分析论述了震前大气电场异常的基本特征,大量震例证实了每次大地震前都能观测到该类异常现象,当较长时间内观测不到该类异常时,近期不会发生大地震。给出并验证了异常与地震三要素间定量或定性判别指标。进一步通过地震事例研究了异常与地震间存在的内在关系。并根据物理学基本理论深入分析了地震电场异常产生的机理并解释大气电场负异常现象。最后,通过大气电场观测方法和一般电场观测方法对比分析表明，大气电场在地震电场观测研究中的优势和作用 Error: Reference source not found。

Jin X 等人研究了 2008 年 5 月 12 日中国汶川 8.0 级地震。位于震中附近的郫县和温江观测站在震前数小时～数十天内均记录到大气垂直静电场异常变化。在排除雷电、气象因素、气溶胶、太阳辐射及人类活动等干扰因素后，发现地震孕育过程产生的不同地点大气垂直静电场呈同步异常变化。汶川地震前约 40 天，郫县与温江站大气垂直静电场日均值呈同步减小趋势；随着主震临近，姑咱站氡浓度快速上升且两站大气垂直静电场日均值再次同步减小。5 月 9 日温江站大气垂直静电场异常与电离层异常存在对应关系；5 月 12 日主震前 6 小时，姑咱站氡浓度下降且相关系数高达 0.818 的温江与郫县站大气垂直静电场呈同步异常增大；主震后 2 分钟，两站均记录到持续 225 秒的高度同步负脉冲。震前氡释放加速机制可解释这些大气垂直静电场同步异常变化且与 2009 年日本观测现象一致。研究结果表明，大气垂直静电场同步异常变化是一种重要的地震前兆 Error: Reference source not found。

Hobara Y 等人研究了日本地震期间观测到的大气电场异常现象。通过日本新建立的调布、柿冈和磐城三站大气电场观测网络，分析了两次震中距数百公里内的地震，经分析全天空相机和气象数据，观测时天气条件良好。大气电场时序与小波分析表明：在地震发生前后数小时内，观测到周期为 10-60 分钟及大于 70 分钟的大气电场波动异常。异常起始时间与震中距呈正相关。观测到的大气电场波动异常特征在三站高度一致，因此可视为地震临震前兆 Error: Reference source not found。

Bychkov V.V 等人分析了 2016 年 1 月 28 日～30 日期间，帕拉通卡综合地球物理观测站每 15 分钟记录一次垂直电离层探测结果、每 10 分钟记录一次近地准静态大气电场垂直分量和相应空气电导率测量值的观测数据，发现了 2016 年 1 月 30 日 3 时 25 分发生的 7.2 级地震存在前兆异常。该观测站距震中 117 公里。发现的异常现象与孕震过程有关 Error: Reference source not found。

Choudhury A 等人研究了 2009 年 7 月～2012 年 7 月印度东北地震活跃区出现的近地面垂直电场"湾流型"凹陷异常。选取气象条件良好并分析地震期间 10 天的数据，发现近地面垂直电场凹陷平均持续 50-70 分钟，强度达 500V/m～800 V/m。在 7-12 小时前出现近地面垂直电场异常变化的概率为 31%。研究表明：近地面垂直电场凹陷深度与地震震级/震源深度比值呈相关系数为 0.72 的正相关，而凹陷持续时间与该比值呈相关系数为 0.82 的负相关；

震中距与凹陷参数呈中等相关Error: Reference source not found。

Minamoto, Y 等人分析了 1968 年 69.0°S，39.6°E 南极洲东翁古尔岛昭和站开始间歇性大气电场观测。该站在 2005 年 2 月～2006 年 1 月采用改进电场仪获得高质量观测数据，中断一年后于 2007 年 1 月恢复观测。因近地面气象条件常对局部地区干扰，研究分析了 2005 年 2 月～2006 年 1 月及 2007 年 2 月～2008 年 1 月期间大气电场与地面天气的相关性，提出利用风速和云量数据的"晴天"电场筛选标准。一月晴天数据日变化曲线与经典卡内基曲线形态相符。亚磁暴期间晴天数据表明，大气电场变化与地磁场波动存在相关性。该筛选标准有望推动日地环境研究中应用大气电场数据Error: Reference source not found。

Li L 等人分析认为要理解青藏高原大气静电分布特征，首先需厘清大气电场与各气象参数的关系等变化规律。研究使用 2021 年 11 月～2022 年 10 月在 80.13°E，32.52°N，海拔 4259 米的狮泉河站观测数据，分析了天气条件对大气电场的影响。通过晴天天气判别标准，首次分析了该站晴天大气电场"双峰双谷"型日变化曲线，解释了不同气象条件对大气电场变化的调制作用，同时对比"狮泉河曲线"与经典"卡内基曲线"的差异Error: Reference source not found。

Silva H G 等人研究葡萄牙南部三角观测阵列大气电场测量表明：2014 年 7 月 16 日～7 月 17 日撒哈拉沙尘暴期间，因与地空电流相互作用，远距离传输的沙尘产生了带电效应并形成内部正空间电荷。数据表明大气电场在沙尘当天增强约 23 V/m，对应厚度约 10-100 米的电荷层空间电荷密度为 20-2 p/Cm^3，而沙尘过境后大气电场出现下降Error: Reference source not found。

Smirnov S 等人分析堪察加半岛希韦卢奇 2023 年 4 月 10 日最强火山上方电离层 F 区电子浓度骤增。在距火山 450 公里处，观测到近地面大气电位梯度垂直分量异常。研究了火山喷发的大气电效应并提出相应物理解释机制。2024 年 8 月 18 日希韦卢奇火山再次喷发，证实了火山活动产生大气电场正突变的物理机制Error: Reference source not found。

王诗涵等人认为晴天大气电场是一个区域大气电场变化的基准场也是大气电场特性的研究基础。晴天大气电场特征在不同地质条件、地理环境和地形特点区域具有很大差异。利用 2021 年 10 月 10 日～2021 年 11 月 10 日在 80.12°E，32.51°N 西藏阿里地震台场磨式大气电场仪的观测数据，经建模分析并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。经平滑处理并去除仪器噪声波动，得到西藏阿里地区晴天条件下的标准卡耐基曲线，研究结果为分析高原地区晴天大气电场特征提供了重要参考价值Error: Reference source not found。

4 近地表大气电场测量技术与标定

罗福山等人介绍了一种新型倒装式旋转电场仪,通过测量大气电场强度和极性的变化,对局部地区潜在雷暴活动及静电电击事故发出报警,可用于气象、航空航天、石油电力、森林防火和露天体育场地等容易产生静电和容易受静电及雷电危害的场所安全监测Error: Reference source not found。

李磊等人提出大气电场是大气和空间物理科学重要的电学参量，全球大气电路和近地表大气电荷分布受气象活动、地质活动和太阳活动的共同作用。平均日变化反映该地区平静时期近地表大气电场，对不同纬度地区近地表大气电场由于地质活动或太阳活动引起的扰动具有重要意义。为实现日地空间环境全圈层和多要素综合立体式探测，子午工程在两极和中国多地区建成大气电场观测网，介绍子午工程场磨式大气电场仪观测方法及数据，对 2021 年 11 月～2022 年 10 月子午工程西藏噶尔站晴天大气电场平均日变化与“卡耐基曲线”进行对比Error: Reference source not found。

黄钰等人研究解决大气电场仪受周围环境影响的问题,利用有限元差分法计算模拟环境建筑及仪器对电场分布的影响,并给出修正关系式。结果表明：建筑使电场发生畸变,电场仪会受建筑屏蔽作用,屏蔽距离与电场修正系数呈指数关系;仪器位于建筑物顶部,电场修正系

数随建筑高度变化,受宽度变化影响小,与仪器本身高度变化最大Error: Reference source not found。

Sellars M 研究了 20 年来高压输电技术的快速发展。需精确测量高压线路电场强度 E、离子电流密度 J 和空间电荷密度 ρ 等电磁环境参数。典型测量值为：E=10kV/m，J=400nA/m²。研制的电场仪电场强度测量分辨率为 10V/m，测量范围为 0kV/m～25kV/m，测量精度为±8%；离子电流密度测量分辨率为 20nA/m²，测量范围为 0nA/m²～1000nA/m²，测量精度为±12%Error: Reference source not found。

Nicoll K A 研究了 200 年来高空观测大气电学特性，实验平台包括风筝、气球、火箭及飞机等。深化了对大气电学特性、全球大气电路、雷暴起电与闪电机制、雷暴上方瞬态发光现象等电学过程的认知。梳理了载人气球、无人气球和飞机在晴空、污染大气、非雷暴云及雷暴云等多种气象条件下的电场数据Error: Reference source not found。

Marshall T C 等人研究了中尺度对流系统的层状云上空电场突变现象。云顶上方 10～16 公里高度范围观测到 12 次电场突变，变化范围为-1.1kV/m～- 4.0 kV/m。数据分析表明，突变由正极性云地闪产生，峰值电流达 20～154 kA。通过构建层状云正电荷水平扩散闪电放电模型，模拟电荷密度为 1～3 nC/m³、厚度为 400 米和直径为 20～200 公里，研究了云上电场突变现象。结果表明：中尺度对流系统中，通过放电层状云电荷区，正极性云地闪引发云上电场触发红色精灵现象。在两次突变之间层状云上方背景电场维持 -0.5kV/m～-1.0 kV/m，因水平范围可达约 10^4 平方公里，该电场对全球大气电路带来重要影响Error: Reference source not found。

Afreen S 等人研究了 2019 年 6 月～2020 年 5 月 34°05′ N，74°42′ E 克什米尔古尔马尔格观测站的大气电场观测结果。该站具有雷暴活动频繁和氡浓度高的特点。电位梯度日变化特征可归因于：夏季/干燥地表条件下的电极效应，以及冬季/湿润地表条件下与日出相关的蒸发效应，在当地时间 13:00 低温水汽压产生电位梯度峰值。在湍流交换作用下，电极层过剩正电荷使峰值提前至 10:00～11:00。年均曲线是两种季节性效应共同作用的结果。该站电位梯度年变化呈双峰结构且冬季值较高，20:00 次峰是非洲雷暴活动远程影响的反映。台站差异与卡内基曲线弱相关，1970 年 8 月～1973 年 10 月与 B N Raina 的观测结果对比分析表明存在相似电位梯度变化特征。电位梯度与气象参数及氡浓度相关性分析表明，除水汽压外，氡浓度、温度和相对湿度等是影响地表电位梯度测量的重要因素Error: Reference source not found。

Harrison R G 等人认为全球大气电路分别与空间环境和地面天气系统相关，获取晴天条件下全球大气电路局部地区气象干扰。利用仪器测量与理论提出了三项改进标准：能见度超过 2 公里的无降水、气溶胶及雾霾；无积雨云与层云底高度不低于 1500 米；地表风速介于 1～8 米/秒。通过现有观测站应用该标准，将有效降低气象变化带来的噪声，从而获得能反映全球大气电路特征的数据Error: Reference source not found。

陈涛等人通过地震事件研究临震前形成晴天大气静电信号异常的物理机制。在临震阶段震中区域地壳结构发生临界变化，产生大量岩石微破碎，岩缝间通道相互连通，通过土壤缝隙，将含微量元素的气体释放到大气中，放射性同位素在大气中扩散不断产生衰变，特别是 α 粒子放射性电离辐射使大气电离为正负离子，正负离子与晴天大气产生相反极化电场。利用晴天大气异常静电信号确定潜在震中位置、震级大小和地震时间Error: Reference source not found。

李磊等人研究大气电场对近地表气象活动、太阳活动与地质活动的综合响应。研制了一种大气电场综合观测设备，实现对温度、相对湿度、风速和大气电场等参数的测量。通过分析北京市十三陵站实测数据，结果表明各气象参数 99％的时刻对应误差不超过±10％,平均误差不超过±3％,而电场数据的平均误差为±0.166 kV/mError: Reference source not found。

5 近地表大气电场研究的发展趋势

（1）雷暴作用。雷电研究将朝着多学科交叉融合、高精度动态监测和智能化预警的方向快速发展。随着三维闪电定位观测与多源数据同化技术不断发展，建立雷暴电荷时空演变和电荷分层动态模型，测量闪电活动触发和传播特征。通过偶极子或单极子理论与精细化电场观测，研究分析水平与垂直电荷传输耦合机制，完善初始击穿到持续电流全过程放电的理论框架。结合人工智能和大数据分析，雷电预警将实现在航天发射、电力输送等高风险领域高时空分辨短临预测，有效提升动态规避自然和人工引发闪电的能力。电荷结构演化和闪电通道特性研究可有效提升新型雷电防护能力，为重大基础设施和重大工程提供更可靠的安全保障。

（2）光学辐射与舒曼共振作用。随着全球大气电场监测网络技术的发展，定量化太阳耀斑和质子事件等空间天气现象对全球大气电路系统的影响，建立从太阳活动到电离层-对流层全链路电动力学耦合模型。地震电磁前兆研究将向多参数协同监测方向发展，通过融合断裂带大气电场、氡气电离、红外辐射和地磁异常等多维数据，结合人工智能技术构建地震短临预测新方法。研究日食、高能太阳耀斑等极端事件和太阳活动周期变化对地表电磁环境的影响作用，通过部署新一代智能化监测网络，整合地基观测与卫星数据，将能实时追踪太阳辐射突变引发全球大气电导率变化与气候效应。跨圈层、多尺度研究既能加深人类对日地关系的认识，又能为空间天气预警、地震预测和灾害防控提供更可靠的科学依据。随着观测技术的进步和理论模型的优化，对太阳活动与地球电磁环境的相互作用研究，将逐步从现象描述迈向机理验证和预测应用新阶段。

（3）电离层与磁层发电模型。通过构建"岩石圈-大气层-电离层-磁层"全耦合模型，整合甚低频跨层传输、超视距无线电信号等新型探测技术，系统研究地震电磁前兆的产生机制与传播路径。利用全球观测网络建立空间天气响应纬度差异模型，解析太阳活动、宇宙线调制和地磁暴对区域电路的差异化影响；发展天地一体化智能监测系统，融合卫星遥感、地面台站和人工智能技术，实现从太阳爆发到近地环境扰动全过程跟踪预警。赤道电离异常区动力学过程更将成为研究热点，通过量化分析热层中性风、电离层电势和大气扰动的非线性相互作用，阐明空间天气事件对电离层结构的调控机制。

（4）全球大气电路模型。研究将突破传统大气电学框架，构建"行星际-电离层-地表-岩石圈"多圈层耦合模型，系统整合昆虫集群迁徙等生物电荷源环境变量，形成"宇宙线-大气物理-地质活动-生物过程"四位一体新理论体系。利用深空探测器和智能传感网络，将实现对火星沙尘暴放电、木星雷电活动等地外电路实地观测，对地球电路扰动到行星级变化的精准解析可通过新一代传感探测技术和人工智能算法提升实现。将构建实时同化能力的动态电路模拟系统，为空间天气预报、地震短临预测、电网安全运维以及深空探测任务提供分钟级精度的电磁环境预测服务。人类对从微生物活动到太阳系尺度电磁耦合机制的认识可通过跨越11个数量级的全频谱研究实现。

（5）全球大气电路电导率与柱状电阻。通过新一代传感探测技术、海底光纤阵列和人工智能技术的深度融合，构建"核-幔-气"耦合全域电导率测量模型，精确定位深部地幔电导率突变、建立多种离子源全耦合动态模型与约束极区智能监测网络基准。形成高精度全球大气电路图谱，为空间天气预警和气候变化研究提供关键技术支撑，推动"全球大气电路动力学"多学科交叉融合。全球电磁环境实时协同监测通过国际数据共享平台实现，地球电磁系统研究将进入从局部观测到整体认知的新阶段。

（6）全球大气电路与全球温度变化。全球大气电路与环境气候变化研究将迈向多系统耦合新阶段。重点聚焦"宇宙线-气溶胶-云微物理-全球大气电路"的闭环作用机制，通过部署新一代传感探测技术和卫星星座观测系统，实现从带电粒子动力学到行星尺度电路变化的跨尺度监测。定量分析全球大气电路参数与温度变化非线性响应关系。实现宇宙线调制下气溶胶对云辐射的精确量化。构建太阳风能量由全球大气电路向气候系统传输的效率模型。为气候

变化预测提供全新电路参数体系，推动气候研究从传统热力学向"电磁-热力"多圈层耦合转变。

（7）全球大气电路与气溶胶及云作用。构建"宇宙线-气溶胶-云微物理-全球大气电路"全耦合模型。研究电场对云凝结核的调控机制，量化气溶胶带电气候效应可通过建立新一代耦合电路动力学地球系统模型实现，构建全球大气电路-云数据库共享平台。

（8）全球大气电路与宇宙线关系。聚焦"太阳活动-宇宙线-大气化学-全球大气电路"全链耦合机制，通过构建新一代传感探测技术，实现从高能粒子微观动力学到行星尺度电磁响应的跨尺度观测。建立宇宙线诱导的NOy或臭氧化学扰动模型，定量解析太阳质子事件对平流层的光化学影响。研究雷暴电场对广延大气簇射调制机制。构建耦合相对论粒子雪崩与电路动力学地球系统模型，评估宇宙线通量变化对全球大气电路的长期影响。

（9）全球大气电路与氡气释放电离。聚焦"地壳应力-氡气释放-大气电离-电路扰动"全链耦合机制，通过构建新一代传感探测技术和天地一体化监测系统，实现从岩石圈微破裂到电离层异常的三维动态跟踪监测。建立氡气幂律释放与全球大气电路扰动的定量关系模型。开发人工智能氡-电多参数地震短临预测算法。构建覆盖活动断裂带的氡气健康风险动态评估体系。推动形成"地震电化学"新交叉学科，通过多源数据融合平台发展氡气-电路耦合参数地震预测和辐射防护新体系，为防灾减灾和公共健康提供新技术解决方案。解析氡气释放诱发"岩石圈-大气圈-电离层"电磁耦合机制，突破传统地震预测方法的局限。

（10）全球大气电路与电离层耦合机理。围绕构建"岩石圈-大气圈-电离层"全耦合动力学模型。通过构建天地一体化智能监测网络，整合新一代传感探测技术、三维电场探测和电离层多波段遥感技术，实现从地壳气体释放到高空电磁扰动的全过程跟踪监测。建立"构造应力-氡气释放-离子团簇-电路扰动"的定量响应模型，开发"空间闪烁指数"深度学习预测算法并构建地震电磁耦合平台。通过解析"气体释放-电路扰动"的特异性响应规律，实现从经验统计到物理机制的地震预测模式转变。

（11）全球大气电路与地表电场。随着观测技术的进步，全球大气电场的联网监测将更加精细化，结合卫星遥感、地面电场仪阵列和地空电流、电离层电位、大气电导率等多参数同步测量，构建更完善的全球大气电路动态模型。重点聚焦于太阳活动、地震、火山等地质构造活动和气溶胶、沙尘暴等气象过程对大气电场的多尺度调制作用，分析其与全球气候变化的内在关系。在地震预测领域进一步明确震前大气电场“湾流型”凹陷和同步负异常等物理机制，结合氡气释放、电离层扰动等多源数据，发展机器学习短临预测模型。加速区域性晴天大气电场基准曲线标准化工作，通过参数优化提升全球大气电路模型的适用性。大气电场与宇宙射线、温室效应的关联变化趋势将成为评估全球大气电路稳定性和气候效应的重要指标。

（12）电场仪测量技术与标定。下一代电场仪将实现高精度测量和自适应环境补偿，在复杂环境下提升数据可靠性。多源数据融合技术将推动构建天地一体化立体监测网络，通过卫星遥感、无人机群和地面传感阵列协同观测，实现对全球大气电场全天候、全空域监测。建立全新的动态标定体系，使测量精度得到提升。实现雷暴活动精准预测和预警；为地震前兆识别提供新手段；有效提升空间天气事件应对能力；为石油化工、电力输送等高风险作业提供可靠静电防护。

全球大气电路模型是地球各圈层耦合的重要理论。新一代传感探测技术和智能监测网络为地表到电离层的跨时空、多尺度、高精度电场动态监测提供技术基础。多物理场耦合模型为岩石圈、大气圈层和空间天气相互作用提供理论方法，建立氡气释放与"湾流型"电场异常定量关系模型，发展先进可靠地震短临预测技术，构建"星-球-机-地"协同立体观测体系，通过卫星星座、浮空器平台、无人机群和智能地面站网的联动观测，实现全球大气电路参数实时三维测量。发展高精度、高稳定、高可靠动态标定技术，利用高精度环境仿真方法实时

修正建筑屏蔽、地形畸变等局部测量数据偏差。立足子午工程建立全球统一数据标准和分析平台，促进各国观测数据互联共享。通过大气电场异常与地质活动的相关规律可实现对破坏性地震临震前数小时预测；在气候研究领域全球大气电路参数成为监测温室效应影响的新指标；全球大气电路在航天安全方面可为卫星和航天器提供更可靠的空间环境预警。随着5G/6G和边缘计算技术的发展，分布式智能传感网络将推动全球大气电路研究从科学探索向业务化应用转变，形成覆盖地球、大气层和空间环境的全链路监测预警能力。

参考文献

[1] 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

[2] CHEN Tao, WANG Shihan, LI Lei, *et al*. Analysis of the abnormal signal of atmospheric electric field before the Luanzhou M_S4.3 earthquake on April 16, 2021[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, **42**(8): 771-776 (陈涛, 王诗涵, 李磊, 等. 2021-04-16河北滦州M_S4.3地震前的大气电场异常信号分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, **42**(8): 771-776)

[3] CHEN T, LI L, ZHANG X X, *et al*. Possible locking shock time in 2 – 48 hours[J]. *Applied Sciences*, 2023, **13**(2): 813

[4] HAN R L, CAI M H, CHEN T, *et al*. Preliminary study on the generating mechanism of the atmospheric vertical electric field before earthquakes[J]. *Applied Sciences*, 2022, **12**(14): 6896

[5] KUPOVYKH G V, TIMOSHENKO D V, KLOVO A G, *et al*. Electrode effect on the daily variation in the atmospheric electric field in the surface air layer[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, **37**(1): 94-98

[6] RULENKO O P. Negative anomalies of the atmospheric electric field close to ground in seismic regions[J]. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2024, **18**(1): 78-91

[7] Wu, Z., Tang, G., Troksa, M. *et al.* New electric force and charge exchange modules in discrete element model enables particle dynamics simulation in electric field[J]. *Comp. Part. Mech,* 2025, https://doi.org/10.1007/s40571-025-00916-1

[8] KRASHENINNIKOV A V, LOKTEV D N, SOLOVIEV S P. Assessment of aerosol pollution in the city of Moscow based on measurements of the atmospheric electric field[J]. *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, **60**(8): 877-883

[9] 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)

[10] GAO Zhixu, CHEN Tao, LI Wen, *et al*. Analysis of the spatial and temporal variation characteristics of the atmospheric electric field on fair-weather[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 403-413 (高志旭, 陈涛, 李文, 等. 晴天大气电场时空变化特征分析[J]. 空间科学学报, 2022, **42**(3): 403-413)

[11] FUNKE B, BAUMGAERTNER A, CALISTO M, *et al*. Composition changes after the “Halloween” solar proton event: the High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) model versus MIPAS data intercomparison study[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(17): 9089-9139

[12] JACKMAN C H, MCPETERS R D, LABOW G J, *et al*. The effect of solar proton events on ozone and other constituents in the middle atmosphere[C].Solar Variability and its Effects on Climate. Geophysical Monograph, 2004, 141.

[13] TINSLEY B A, YU F Q. Atmospheric ionization and clouds as links between solar activity and climate[M]//PAP J M, FOXP, FROHLICH C, *et al.* Solar Variability and its Effects on Climate. Washington: AGU, 2004

[14] MIRONOVA I A, IVANOVA A R, BAZILEVSKAYA G A, *et al*. Ionization effects caused by precipitation of energetic electrons during geomagnetic disturbances[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, **37**(1): S208-S212

[15] VLASOVA N A, BAZILEVSKAYA G A, GINZBURG E A, *et al*. Influence of processes on the sun and in the interplanetary medium on the solar proton event on March 30, 2022[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2024, **64**(6): 802-

最新录用

813

[16] CHILINGARIAN A. Extensive air showers and atmospheric electric fields. Synergy of space and atmospheric particle accelerators[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **74**(9): 4388-4402

[17] IGARASHI G, SAEKI S, TAKAHATA N, *et al*. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan[J]. *Science*, 1995, **269**(5220): 60-61

[18] LI W, SUN Z B, CHEN T, *et al*. Atmospheric charge separation mechanism due to gas release from the crust before an earthquake[J]. *Applied Sciences*, 2024, **14**(1): 245

[19] OMORI Y, NAGAHAMA H, KAWADA Y, *et al*. Preseismic alteration of atmospheric electrical conditions due to anomalous radon emanation[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, *Parts A/B/C*, 2009, **34**(6/7): 435-440

[20] SOROKIN V M, YASHCHENKO A K, HAYAKAWA M. Electric field perturbation caused by an increase in conductivity related to seismicity-induced atmospheric radioactivity growth[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2007, **1**(6): 644-648

[21] CHEN Z, LI Y, LIU Z F, *et al*. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital of China and its environmental effects[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 16772. DOI: 10.1038/s41598-018-35262-1

[22] PULINETS S A, ALEKSEEV V A, LEGEN'KA A D, *et al*. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification[J]. *Advances in Space Research*, 1997, **20**(11): 2173-2176

[23] OMORI Y, YASUOKA H, NAGAHAMA H, *et al*. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, **7**(5): 629-635

[24] 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

[25] LI L, CHEN T, SONG J J, *et al*. Comparison of the atmospheric electric field from three global stations in 2021[J]. *Universe*, 2023, **9**(3): 112

[26] LI L, CHEN T, TI S, *et al*. Fair-weather near-surface atmospheric electric field measurements at the Zhongshan Chinese Station in Antarctica[J]. *Applied Sciences*, 2022, **12**(18): 9248

[27] HARRISON R G, INGRAM W J. Air–earth current measurements at Kew, London, 1909–1979[J]. *Atmospheric Research*, 2005, **76**(1/2/3/4): 49-64

[28] MÄRCZ F, HARRISON R G. Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagycenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew[J]. *Annales Geophysicae*, 2003, **21**(11): 2193-2200.

[29] LI W, SUN Z B, YAN Z A, *et al*. Observations and variability of near-surface atmospheric electric fields across multiple stations[J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(1): 124

[30] CHALMERS J A. Atmospheric Electricity: International Series of Monographs in Natural Philosophy[M]. Oxford: Pergamon, 2013

[31] HARRISON R G. Fair weather atmospheric electricity[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 301(1): 012001

[32] SMIRNOV S. Variations of atmospheric electric field and meteorological parameters in Kamchatka in 1997-2016[C]//Proceedings of the E3S Web of Conferences. Paris: EDP Sciences, 2017: 01012

[33] TACZA J, NICOLL K A, MACOTELA E. Periodicities in fair weather potential gradient data from multiple stations at different latitudes[J]. *Atmospheric Research*, 2022, **276**: 106250

[34] Huang, A., Lazhu, Wang, J., Dai, Y.,Yang, K., Wei, N., et al. Evaluating and improving theperformance of three 1-D Lake modelsin a large deep Lake of the centralTibetan Plateau[J]. Journal of GeophysicalResearch: Atmospheres, 2019, 124, 3143–3167.

[35] HAO Jianguo, TANG Tianming, LI Derui. Advancement of the study on taking the anomaliesof static atmospheric field as index of short- term and imminent earthquake prediction[J]. *Earthquake*, 1998(3): 245-256 (郝建国, 唐天明, 李德瑞. 大气电场异常作为地震短临预报标志研究进展[J]. 地震, 1998(3): 245-256)

最新录用

[36] 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

[37] HOBARA Y, WATANABE M, MIYAJIMA R, *et al*. On the spatio-temporal dependence of anomalies in the atmospheric electric field just around the time of earthquakes[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(10): 1619

[38] 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

[39] 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

[40] MINAMOTO Y, KADOKURA A. Extracting fair-weather data from atmospheric electric-field observations at Syowa station, Antarctica[J]. *Polar Science*, 2011, **5**(3): 313-318

[41] LI L, CHEN T, TI S, *et al*. Surface atmospheric electric field variability on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2023, **135**(2): 17

[42] SILVA H G, LOPES F, PEREIRA S, *et al*. Measurements of the atmospheric electric field through a triangular array and the long-range Saharan dust electrification in southern Portugal[OL]. arXiv preprint arXiv: 1608.02494, 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1608.02494

[43] SMIRNOV S, PULINETS S, BYCHKOV V. Some effects of the Shiveluch volcano eruption of the 10 April 2023 on atmospheric electricity and the ionosphere[J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(12): 1467

[44] WANG Shihan, LI Lei, CHEN Tao, *et al*. Characteristics of fair-weather atmospheric electric field in Tibetan Ngari prefecture[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1137-1144 (王诗涵, 李磊, 陈涛, 等. 西藏阿里地区的晴天大气电场特征[J]. 空间科学学报, 2022, **42**(6): 1137-1144)

[45] LUO Fushan, HE Yuhui, ZHANG Jian, *et al*. The new inverted electric field mill[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(6): 470-474 (罗福山, 何渝晖, 张健, 等. 新型倒装式旋转电场仪[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(6): 470-474)

[46] LI Lei, CHEN Tao, WANG Shihan, *et al*. Chinese Meridian Project near-surface atmospheric electric field observations[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 138-143 (李磊, 陈涛, 王诗涵, 等. 子午工程二期大气电场仪及其初步观测[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2024, **55**(1): 138-143)

[47] 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)

[48] SELLARS M. Electric Field Mill for the Simultaneous Measurement of Electric Field Strength and Ion Current Diensity[D]. Cape Town: University of Cape Town, 1995

[49] NICOLL K A. Measurements of atmospheric electricity aloft[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, **33**(5): 991-1057

[50] MARSHALL T C, STOLZENBURG M, RUST W D. Electric field measurements above mesoscale convective systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D3): 6979-6996

[51] AFREEN S, VICTOR N J, NAZIR S, *et al*. Fair-weather atmospheric electric field measurements at Gulmarg, India[J]. *Journal of Earth System Science*, 2022, **131**(1): 7

[52] 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

[53] CHEN Tao, ZHANG Xiaoxin, ZHANG Xuemin, *et al*. 2021. 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)

[54] LI Lei, SU Jianfeng, CHEN Tao, *et al*. Design of a comprehensive observation equipment for atmospheric electric field[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 933-940 (李磊, 苏建峰, 陈涛, 等. 大气电场综合观测设备的设计[J]. 空

最新录用

间科学学报, 2022, **42**(5): 933-940)

作者简介:

闫召爱（第一作者），男，1981 年 10 月出生于山东省菏泽市，现为中国科学院大学博士生导师，中国科学院国家空间科学中心天气-临近空间应用中心研究员，主要研究方向为激光雷达、临近空间环境光电遥感探测技术和光电探测技术。E-mail:yanza@nssc.ac.cn



李文（通信作者），男，1984 年 7 月出生于安徽省池州市，2007 年于西安电子科技大学获得通信工程专业工学学士学位，2011 年于中国科学院研究生院获得信号与信息处理专业工学硕士学位，2022 年开始攻读中国科学院大学地球与空间探测技术专业理学博士学位，现为中国科学院国家空间科学中心项目主管/工程师，主要研究方向为空间物理大气电场。E-mail: liwen@nssc.ac.cn



孙志斌（通信作者），男，1978 年 4 月出生于山西省运城市，现为中国科学院大学博士生导师，中国科学院国家空间科学中心复杂航天系统电子信息技术重点实验室研究员，主要研究方向为信息光电子学与空间科学仪器技术。
E-mail：zbsun@nssc.ac.cn



最新录用