

极光——日地对话的电影

Aurora: A Movie on the Dialogue between the Sun and the Earth

汤克云

(中国科学院地球物理研究所, 研究员 北京 100101)

刘瑞源

(中国极地研究所, 研究员 上海 200129)

极光, 顾名思义, 是指一种发生于地球两极地区的发光现象。地球上, 除日落日出、星辰隐耀和苏轼老先生所称“月有阴晴圆缺”的美丽景象之外, 极光是最壮观、最重要的光学现象。我国是世界上最先作极光观测的国家之一。据《通鉴外记》记载, 周昭王元年(约公元前 11 世纪), 有光五色贯紫微。这大概是人类文明史上对极光的最早记载。汉光武帝建武八年三月庚子(公元 32 年 4 月 11 日), “夜月晕五重, 紫微青黄似虹, 有黑气如云, 月星不见, 丙夜乃解”(《伏候古今注》天文第 1 页)。1 000 多年后, 法国哲学家、数学家和天文学家伽桑狄于 1621 年借用古罗马神话中黎明女神的名字 Aurora 来描述中纬度地区看到的北方的极光。他将北半球的极光称为北极光(aurora borealis), 而将南极地区的极光称为南极光(aurora australis)。后来, 科学家们不再区分北极光和南极光, 将北极光和南极光通称为极光(aurora)。现代极光的观测已从目视记录、照像机照像发展到用全天空极光摄像机连续摄像, 又发展到用彩色和数字全天空极光摄像机连续摄像; 从地面观测发展到从火箭和卫星上观测。现代极光的研究已从极光光谱分析发光的原子离子成分发展到由极光的演化研究极光的发电机过程和日地之间的能量传输过程。

一、绚丽多姿的极光

极光主要出现于地球两极地区, 生活于中低纬度地区的人们亲眼目睹壮观绚丽的极光的机会是极少的。从地面观察, 极光可分为 4 种几何形状: (1) 均匀的较稳定的光带。它们沿地球磁场纬线方向分布, 厚度几公里至几十公里, 长达 1 000 公里, 移动速度慢。(2) 带有射线式结构的光帘幕、光弧、光柱和光带等, 有些呈冠冕状。它们沿磁力线方向分布, 平均厚度为 200 米, 并随亮度增加而变薄, 长数十至数百公里, 移动速度快达 50 公里/秒。(3) 弥

漫状极光, 主要指云形斑块群。沿磁纬方向分布, 每块光斑面积在 100 平方公里左右, 亮度一般很低, 只有很强的弥漫状极光, 才能被肉眼看见。(4) 大的均匀发光面。常见的红色极光光面属于这一类。如果从卫星上观测, 通常只能分辨出两种极光: 结构状极光和弥漫状极光。前者包括射线状光弧、光带、光柱和帘幕, 后者指云形斑块和弱的光弧、光带。

极光的形态是变化的。极光开始时常常是均匀弧状, 后来亮度逐渐明显增加, 均匀弧分裂成射线式结构, 而后形成帘幕状或冠冕状, 此后又往往出现快速向上移动的火焰式极光。有些极光则是脉动式的。当极光活动迅速变化, 也就是极光亚暴开始时, 位于极光椭圆赤道一侧的静止的极光弧, 突然增亮并转变成射线式光弧光带, 接着向极区猛烈移动并产生大尺度折叠, 形成帘幕状极光。在当地时间的前半夜, 会出现西行浪涌。午夜时分, 极光亚暴发展到最强盛, 帘幕状极光分裂成数个射线或光弧。下半夜, 极光椭圆靠极区一侧的极光向极区移动, 而极光椭圆靠赤道一侧的极光变成云形斑块群。

当您有幸直面壮观绚丽、变幻多姿的极光时, 仿佛在欣赏一部日地对话的动人影片, 又仿佛置身其中, 亲自同天地对话, 体会唯有身历其境方可领略的神趣。这大概是多少空间物理学家、地球物理学家, 离妇别雏、远离都市、不远万里、为伍冰雪、甘忍寂寞、属情极地而自得其乐的缘由吧。对于暂时无法奔赴两极一睹极光芳容的读者, 可否以下列数言, 聊喻极光美姿:

飘忽黄山雾, 壮观匡庐瀑。

绚丽雨后虹, 多姿晨曦曙。

根据极光的英文发音和极光形态的婀娜多姿, 目前在阿拉斯加大学地球物理研究所工作的旅美中国学者孙纬博士建议将 aurora 一词译为“婀娜娆”, 从文字的角度, 笔者以为是甚为传神, 又极具意韵的。

二、可以伸缩的极光椭圆

大致说来,极光出现在围绕地球磁极并离极约23°的椭圆带状区,科学家称之为极光椭圆。卫星观测表明,地球南北磁极附近各有一个极光椭圆。当地磁活动减弱时,极光椭圆向内收缩,背阳面午夜区在磁纬70°的110~120公里上空盘旋,向阳面在磁纬75°的170公里上空盘旋。地磁活动增强时,极光椭圆向赤道方向扩大,它的背阳面可伸到磁纬60°甚至50°以南,向阳面可伸到磁纬70°。有趣的是,极光椭圆不随地球旋转,而地球在它下面每天转动一圈。一般称夜间极光椭圆经常居留其上空的地带为极光带。北极光带穿过斯堪的纳维亚和冰岛北部、格陵兰南部、哈得逊湾北部、阿拉斯加中部和西伯利亚北部海岸。南极光带大略围绕南极洲海岸。因为极光发生在100公里以上高空,在良好气象条件下,最远可在1000公里远处望到,所以位于磁纬67°~76°的人,在每个晴朗的傍晚和凌晨都可以看到极光。76°以上极区,每天中午都有极光,但是,只有在白昼最短的冬季的一些晴朗日子才能用肉眼看见,称为日照极光。

纬度较低的地区也有可能观测到极光。当地磁活动增强时,地磁纬度在41°~60°的中纬度地区可以观测到极光红弧。红弧强度的最大值在400公里附近,是一个南北长600公里、东西长1000公里以上的围绕地球的均匀弧,一般肉眼看不见,只有当红弧较强时才看得见。据《史记·封禅书》记载:汉文帝十四年(公元前166年),“长安东北有神气,成五彩,若人冠冕焉”。鉴于公元前166年,长安应属中低磁纬地区,故这可能是历史上对非极区冕状极光的最早记录了。我国黑龙江省的漠河地区,4月份仍可看到极光。只是强度较弱,用肉眼不容易识别出来。当地磁活动异常激烈时,纬度更低的新加坡、印度孟买甚至印度尼西亚雅加达都有极光观测的记录。

观测表明:极光在每日的地方时23点左右最强,在每年的春秋分季节(3~4月和9~10月)极光活动最频繁,对我国南极中山站来说,每年的4~5月份,极光最为常见。研究表明,极光活动有27天周期和11年周期变化,这说明极光的出现是同太阳活动紧密相关的。

三、绿与红——极光的光谱

除了壮观神秘之外,极光的绚丽多彩对众多地球、空间物理学家和业余爱好者也极具吸引力。常见的可见极光有3种基本色彩:红色、绿色和兰紫色。其中绿光最为强烈。直到1925年,多伦多大学

的麦克伦南和施拉姆在实验室里从原子氧成功地激发出了和极光绿光一样的绿光,才弄清楚了极光的强烈绿光是由氧原子发出的,其波长为5577埃。后来的大量研究发现,极光的各种颜色几乎都是从大气的主要成分氮、氧的分子和原子以及它们的离子发出来的。此外,观测发现,极光发出的高度在离地面约80~1000公里的范围内,而由于在不同的高度上,大气密度、成分等条件不一样,致使辐射光谱也不同。例如,氧原子的绿光的最大强度在110公里的高度,而氧原子的红光的最大强度在200~400公里范围内。

现在的问题是,大气中的氮、氧的分子和原子以及它们的离子发光的机制是什么?一般认为,极光是由太阳喷发出来的太阳风(包括电子和质子)在地磁场磁力线的引导下进入地球高层大气并与那里的原子和分子相互碰撞而激发出来的光。长期的实验研究发现:激发态的氧原子可以发射出波长分别为5577埃的绿光以及6300埃、6364埃和6392埃的红光;激发态的中性氮分子可以发射出波长为3998埃和4059埃的紫光以及从6500埃到6800埃的一些深红色的光;离子态的氮分子发出的一般是波长为3914埃、4278埃、4708埃和5225埃的紫光和蓝光等等。根据实际探测的结果,5577埃的氧发射和3914埃的氮发射主要在距地面110公里左右的高度处,而6300埃、6364埃的氧发射主要在距地面200~400公里高度。至于极光看起来大部分显示白色则是由于各种波长的辐射叠合作用的结果。从理论上讲,上述各类激发过程在极光区都是存在的,各种颜色的极光都应当看到。但由于实际情况十分复杂,例如,在距地面100公里左右的高度处,氧原子要在受到激发后200秒钟才能发出波长为6300埃的红光,而在这样长的时间里,一个处于受激态的原子氧就很可能与另一原子或分子发生碰撞而失去一部分能量,使其在发射出辐射之前又恢复到基态。另一方面,波长5577埃的绿光的自然发射大约只要0.7秒。所以,在较低的高度上产生的红光往往会被绿光所淹没。在更高的大气层中,氧原子很少,所以能激发出6300埃的红光的机会也就少些,因此这里的红光很弱,只有在外来的带电粒子能量很高并足以激发相当多的氧原子时,才会显现出红光来。所以最常见的是白绿极光,红色极光比较少见。

如前所述,极光是由太阳喷发出来的太阳风(包括电子和质子)在地磁场磁力线的引导下进入地球高层大气并与那里的原子和分子相互碰撞而激发出来的光。这里,地球高层大气中的原子和分子是靶子,太阳风中的电子和质子则是子弹。按激发极光的粒子(子弹)类型可分为电子极光和质子极光。

四、为什么要研究极光?

如同我们在上面所作的那样,对于绝大多数非极光专业人员而言,把极光解释为来自太阳的高能量粒子直接撞入极区的结果似乎已经足够清楚了。为什么还要继续观测研究极光?对于极光专业的科学家,上述解释显然过于简单。我们对极光产生的许多深刻背景了解得还是太少了。自从用卫星作极光观测以来,我们已发现,高达几百万安培的电流沿着极光流动,极光还与高达100万兆瓦的全球放电过程相联系。极光的产生过程应当用全球发电机过程来描述。

美籍日裔空间物理学家赤祖父俊一(Syun-ichi Akasofu)等提出下列模型来描述极光发电机过程。当太阳风的磁力线抵达地球的磁层边界时,它们与地磁场的力磁线相互作用,彼此交联。由于太阳风是沿着磁层边界面吹动的,故穿过彼此交联的场线,即相当于太阳风中的自由电子和质子所构成的导体在磁场中运动,这一过程就形成了一个发电机。太阳风—磁层发电机能产生超过100万兆瓦的功率,电压达20~150千伏。在工业上和实验室所用的磁流体发电机亦是按同样的原理工作的,也是让电离气体—等离子体高速通过磁场来发电。在充满磁场的稀薄等离子体中,带电粒子只能沿着磁力线自由运动,磁力线的作用类似于导线,可以携带电流。太阳风和地球磁层交联的场线与以磁极为中心的环状区域相连,可以认为是太阳风—磁层发电机的两极由磁力线连到了极光区的边界。因此由极光发电机所产生的放电过程将是如此进行:由磁层边界层的早晨侧(正极),经过地球极区极光区的晨侧边界,然后很可能是沿着极光椭圆,最后从极光区黄昏侧边界出来抵达磁层边界层的黄昏侧(负极)。这一体系是初级放电电路,称之为一区电流体系。一区电流体系感应起的次级电流系称之为二区电流体系。它是一区电流体系中的一部分从极光椭圆晨侧部分的赤道通过向边界放电回到磁层,以及从磁层向极光椭圆黄昏侧部分的赤道向边界放电。于是,在北极的晨侧和晚侧有一对电流,一个沿磁力线流动的电流是向下流向电离层,另一个沿磁力线流动的电流是向上流出电离层。沿磁力线流动的电流称之为场向电流。向下流动的电子激发了离子和分子,将能量贮存在高层大气中,其中一些以可见光的形式释放出来,这就是极光。

是什么造成了极光的移动?让我们用电视机的电子枪和屏幕来说明极光的移动。高层大气相当于电视机屏幕,极光相当于电视机屏幕上的图像,太阳风粒子相当于电子枪射出的电子束。电视机图像是由电子束轰击在屏幕上形成的。当电子束撞击到

屏上的点子的移动时,电视机屏幕上的图像也就移动。而电子束的移动是由电子枪中的电场和磁场变化造成的。基于这一类比,许多极光物理学家由观测到的极光运动来推断磁层中电场和磁场的变化。太阳大耀斑爆发后,太阳风增强,携带着较强的磁场。如果强太阳风朝向地球,并且磁场的方向是南向,与磁层赤道向边界面上地磁场的方向相反,那么将会使发电机的功率增加上百倍。这么强的功率将会产生更强的放电电流和更亮的极光。这种放电电流产生强的快速变化的磁场,我们称之为地磁暴。这就是为什么强烈的极光活动会伴随着有强烈的地磁暴。它会对远距离电力传播线、输油管道、通讯线路和某些防御雷达系统等带来复杂的问题。除了极光本身之外,这是我们观测和研究极光的重要原因之一。

第二,极光的产生需要3个条件:太阳风、磁场、星体上的大气层。所有的行星都经受着太阳风。水星有类似于地球的磁场,但是没有大气层,因此没有极光。金星和火星没有磁场,因此在这两颗行星上也没有极光。月球没有磁场也没有大气,更不会有极光。木星有很强的磁场和主要由氢气构成的大气层,已观测到木星上由氢原子的辐射所形成的粉红色极光。天王星和海王星有磁场和大气层。天王星的极光图片已由旅行者(Voyager)宇宙飞船拍摄到。极光的研究包括地球磁层和电离层中等离子体环境下的发电和放电过程。类似的环境可能还存在于太阳、恒星、脉冲星大气中。因此,一些极光物理学家认为太阳耀斑也可能是一种太阳极光,另一方面一些太阳物理学家认为极光亚暴是一种地球耀斑。研究极光现象有助于理解许多天文物理问题,包括太阳耀斑的产生机制。

五、我国的极光观测研究

自1957年第一个地球物理年开始,美、英、俄罗斯、澳大利亚、日本、挪威、瑞典等国在北极和南极地区开展了大规模的极光观测和研究。其中著名的从事极光观测的研究机构有美国阿拉斯加地球物理研究所、英国地调局、日本国立极地研究所、瑞典空间研究所(Kiruna)等。

1990年初,我国在南极建立了第二个南极科学考察站——中山站。中山站的地理经纬度为69.4°S,76.4°E,地磁经纬度为77.1S,121.3E,正处于极光带的极向边缘,而日本的南极昭和站正处于极光带之下,中山站和昭和站的联合观测正好可用来观测南极极光的整体形态和研究南极极光的动力学过程。1993年,中国和日本两国的极地研究所达成了在南极中山站和昭和站作极光联合观测研究的协议。1995年和1996年先后在中山站部署了

(下转第51页)

(5)信息服务。信息是制订和实施节能政策的基石,包括公众宣传、能源统计、信息网络、咨询服务、能效标示等。我国这方面的工作一直十分薄弱。

(6)技术进步。节能技术创新和扩散在体制、资金、管理等方面存在许多障碍,突出的问题是:节能新技术研究成果转化资金极度缺乏,企业节能技术改造筹资困难,节能设备质量差(如高效照明器具),关键技术和设备过度依赖进口,缺乏统一规划和有效管理。

2. 节能与开发能否平等竞争是实施节能优先战略的关键

为实施节能优先战略,需研究制订适应市场经济的节能政策和法规,并强化政府的管理,包括:能源价格合理化,实行企业能源审计,采取经济和财政刺激手段促进节能,推行需求侧管理(DSM)和综合资源规划(IRP),加强信息服务等。

由于提高能效和节能是高度分散的二次投资活动,以市场为基础的能源价格不能反映长期前景或长远利益,外部成本(与能源生产利用有关的环境成本,能源安全保障的代价)通常不计入能源价格,使得节能与开发处于不平等的地位。因此,在市场经济条件下,实施节能优先战略的关键,是创造节能与开发平等竞争的环境,促使节能在竞争中发挥其自身固有的优势。

(上接第16页)

由日方提供的极光全天空电视摄像机、多波段扫描光度计、极光分光光度计和单色极光电视摄像机等4台套极光观测设备并获得了观测资料。中方的配套观测设备有数字式电离层测高仪、地磁绝对测量和相对测量仪器、脉动仪、甚低频等离子体波观测仪等观测设备。此外还有成像式宇宙噪声接收机。在对这些观测资料作综合分析的基础上,可能对极光的生成和演化过程、太阳风与极区电离层及大气层的作用、磁层—电离层的能量耦合特征有一个定量的了解。同时,中山站的地磁共轭区位于北极的斯伐尔巴特群岛附近,该群岛的Ny—Alesund站是北极地区日地物理观测的集中地,许多国家包括日本在内都在此设有地磁、极光、电离层等包括非相干散射雷达等在内的大型设备;中山站、昭和站的联合观测研究以及中山站—Ny—Alesund站共轭观测研究,将有助于我们提出太阳风—极区磁层—电离层—大气层能量耦合模型。

美妙多姿的极光光带犹如一条无尽的通天之路,路那头的仙山美景吸引了众多的空间物理、地球物理学家的的好奇和向往。科学之路,漫漫其修远,吾辈将上下而求索。极光过程中蕴含着的实实在在的高达数百万安培的电流和百万兆瓦的电功率,使

实践表明,需求侧管理和综合资源规划,是实现节能优先的有效措施。

IRP是美国在电力需求侧管理的基础上发展起来的一种资源规划方法,现已风靡世界。其要旨是把能源的开发和节约,以及环境都当作资源,使各种资源参与平等竞争,经过优选,以最低成本为用户提供能源服务。在美国,已有30多个州采用IRP,使负荷增长率削减了20~40%,而单位节电成本仅为新建电厂成本的1/10~1/2。

实施IRP,可以真正做到节能优先,实现能源与环境和环境相协调。但IRP涉及多方的利益,需要克服体制、政策和技术上的一系列障碍,才能顺利推行。我国现已引进这一方法,正在进行试点的前期工作。

许多国家通过能源服务公司(ESCO)来实施DSM和IRP。ESCO是一种全新的节能运行机制,成立ESCO的资本金,通常得到政府、银行或企业的支持。其运作以效益分享为基础。先由ESCO对企业进行节能诊断,提出方案,签订合同后,由ESCO为项目筹资、采购并安装设备、培训人员、投产运行,企业按合同规定,用节能效益向ESCO支付项目费用。这种方式对企业有强烈的吸引力。我国已在辽宁、北京和山东组建ESCO进行试点。

(责任编辑 蔡德诚)

极光电能造福人类,这也正是万千极光科学工作者为之奋斗、为之献身的科学之梦。

参考文献

- [1]A Steen et al., ALIS—a Multi—Station Imaging System at High Latitudes with Multi—Disciplinary Scientific Objectives, Abstracts of 8th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposium, Uppsala, Sweden, August, 1997
- [2]Syun—ichi Akasofu, EOS Vol. 73 No. 19, May 12, 1992
- [3]S—i Akasofu edited: Physics of Auroral Arc Formation AGU Geophysical Monograph 25, Washington D. C., 1981
- [4]涂传诒等编著,日地空间物理学(行星与磁层),科学出版社,1988
- [5]曾治权等编著,日地关系,地震出版社,1989
- [6]中国大百科全书,地球物理空间科学,科学出版社,1993
- [7]庄威凤、王立兴主编,中国古代天象记录总集,极光部分(分科主编:曾治权、金立兆),江苏科学技术出版社,1988
- [8]刘瑞源、汤克云,极区电离层—磁层耦合和极光动力学,国家自然科学基金委重点项目建议书,1996

(责任编辑 肖庆山)