发展专业化气象保障，优化定向能武器效能

Optimizing the Effectiveness of Directed Energy Weapons with Specialized Weather Support (English)

利昂 •C• 纳西斯，美国空军少校（Maj De Leon C. Narcisse, USAF）
史蒂芬 •T• 菲奥里诺，美国空军中校（Lt Col Steven T. Fiorino, USAF）
理查德 • 巴泰尔，美国空军预备役上校（Col Richard J. Bartell, USAFR）*

疾雷不及掩耳，迅电不及瞑目。

— 孙子（编注：似应来自《六韬 • 龙韬 • 军势》。）

精确描述大气环境特征对优化定向能武器效能至为关键。开发、采办和维护定向能武器需要投入艰巨的努力，既然投入部署，就应实现其最优效能。这些武器系统必须在大气环境中运作，而大气是一种高度动态的介质，在很大程度上会影响武器的效能，因此我们必须具备了解大气环境和预测大气变化的能力。定向能武器系统，特别是用于低空环境的高能激光，在不同的层域、时段和年段会呈现重大的性能差异。空军气象界以空军气象局为统一渠道，根据指令向参谋长联席会议、空军、陆军、联合司令部、国家情报界和其它部门提供陆地和空间气象支持。[1] 本文简要介绍大气环境对定向能武器产生的独特影响，讨论专业化气象保障可如何加强作战能力和武器功效。

在 2001 年 9 月 11 日发生恐怖袭击以后，空军气象界和国防部其它部门共同承担起预测战争性质变化的责任。空军气象界不能坐等定向能武器系统发展成熟后才开始被动应付。2006 年《四年防务评估报告》指出，“作战指挥官需要新的能力应对非对称威胁。”[2] 在这里，“新的能力”并不是总是指武器本身；定向能武器领域中科技能力的提升，在许多方面还涉及到高保真建模和模拟能力及其向作战使命策划工具的转化。它们作为决策辅助工具，辅之以及时和精确的环境评估，能够帮助定向能武器专家优化武器运用战略。空军气象界通过准确判定和优化利用目标地区气候条件信息，指导武器专家在各种环境中明智应用定向能武器，这种能力对控制未来作战空间至关重要。利用气象信息的一个实例，就是为低空运行的高能激光确定最佳时机、攻击航向和攻击高度。

定向能武器的主要种类

本文探讨两种定向能武器系统：高能激光与高功率微波。高能激光是将一束聚焦能量精确对准目标的一点，实施损坏或摧毁。高功率微波不产生物理摧毁，而是侵入目标的电子系统，扰乱其内部的组件、电路和开关；此外，高功率微波还能使生物机体心生恐惧而改变行为。高功率微波不象高能激光那样需要精确瞄准，它是一种面积打击武器，其功效取决于频率、视野、目标距离范围和涉及面的大小。[3]

这两种武器互为补充，各具优点和缺点。高功率微波武器不能象高能激光武器那样聚高能于一点，但能有效地穿透云雾，在云雾条件下它的衰减性（即由于吸收和散射而损

* 提交本文时，Narcisse 少校任马萨诸塞州汉斯科姆空军基地第 651 电子系统中队运作主任；Fiorino 中校为空军理工学院大气物理专业助理教授；Bartell 上校为空军理工学院定向能研究中心物理学家。

失能量）要比高能激光低两个数量级。高功率微波武器会在整个目标区域上方产生高电场，这与激光以强能量集中射向某特定和精确挑选的点目标形成鲜明对照。[4] 另外，它还能够影响敌方的电力系统，无论这些系统处于工作或关闭状态。[5] 例如，高功率微波能够停止正常运行的机载、陆基或舰载系统。再者，高能激光和高功率微波武器由于以光速传播，因此能够几乎瞬时同时打击多个目标。[6] 还有，定向能武器拥有取之不尽的“深弹夹”，就是说，只要维持充电和冷却，它就能保持火力不断。[7] 因为定向能武器只消耗能量，所以每次发射的成本只相当于为装置补充动力的成本。靠电产生自由电子束的激光只需接通电源即可，与常规武器相比，它无需考虑运输、储存和装填弹药等问题，并把对后勤保障的需求降到最低程度。制造化学激光器的工厂能够直接补充货源，故而排除长期库存的需要。[8] 高能激光武器能够提供近乎外科手术般的精准度，因此大幅降低连带毁伤的风险。

和大气层相关的问题

在真空中，电磁波在传导中不会衰减，因此从理论上讲，可保持最大能量直到击中目标。但是地球的大气层中含有损耗因素，会减弱定向能武器抵达目标的强度。这些因素包括大气层中的线性及非线性效应，会从总体上影响定向能武器或电磁能的传播。线性效应是指定向能射束在运行中不改变大气层特征 — 例如由分子、悬浮微粒、雨滴或其它颗粒造成的散射。非线性效应指能热扩散等现象，即由于射束在运行路径中吸收而发热从而造成散焦，是定向能射束自身存在及其强度所导致的。[9] 线性和非线性效应共同削弱了射束抵达目标的强度。

因为大气层密度随高度增加而急剧变稀薄，其对高能激光和高功率微波传播的影响在垂直方向上变化最大，我们据此可界定出大气层的垂直结构。在本文中，大气层由接地层、低 / 中 / 高层、高空层（按空军的定义）和太空域组成（见图 1）。[10] 大气层的不同层域不仅影响在其内运行的定向能武器的能力，而且影响这些武器的保障需求。

军事武器系统取得成功至关重要的一点，是使用者了解这些武器运作的环境条件。定向能武器在接地层内水面或陆面上空的运动行为不同于在大气高层内的运动行为，因为大气环境的不同层域会以不同的方式施加影响（图 1）。即使一种武器系统在同样的接地层内运作，但是这同一层域中仍有许多不同的气候（如沙漠气候、热带气候、丛林气候等），更不消说与四季相关的气候变化。为军事用途开发或规划定向能武器系统时，必须充分考虑此武器所将运行的环境。

定向能武器系统与环境

我军各军种根据不同的使命开发适用的定向能武器系统。陆战与海战及空战相比，作战范围相对较小。陆军、空军、海军和海军陆战队必须根据各自独特的环境调整对定向能武器的要求。

陆军武器系统及其预期的运行环境

移动战术高能激光器是美国陆军与以色列合作研制的武器，用于击毁火箭弹 / 火炮弹 / 迫击炮弹（RAM）、巡航导弹、短程弹道导弹和大气接地层内的无人飞行器。[11] 除了击毁 RAM 炮弹之外，陆军还可能考虑使用定向能武器来对付路边炸弹和便携式防空导弹。[12] 移动战术高能激光器研制计划虽然已被搁置，但为诸如“天空卫士”（Skyguard）

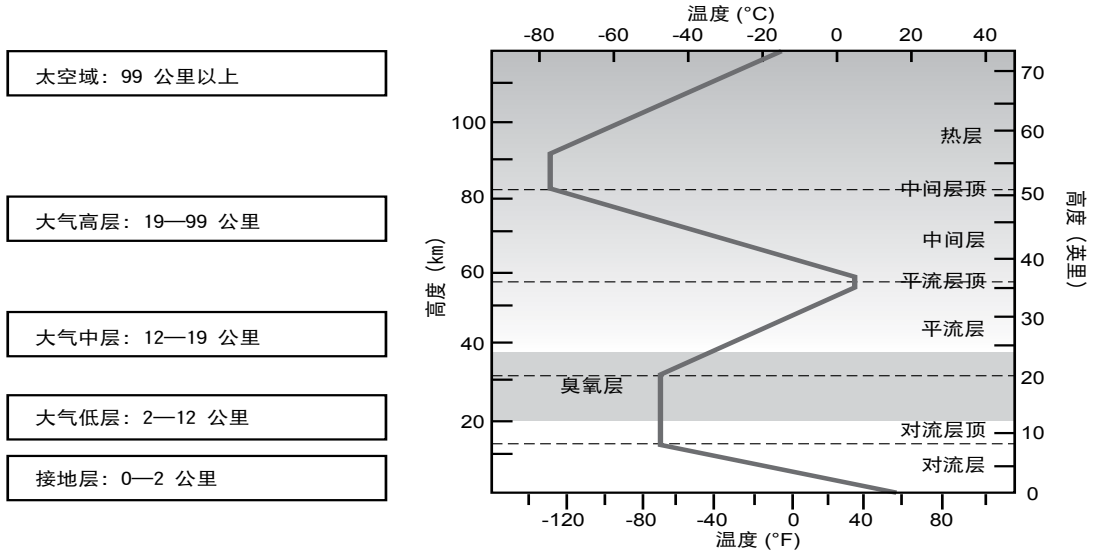

图 1：大气层结构（修改自《大气层：定向能专业协会高能激光武器系统速成课程》["The Atmosphere," Directed Energy Professional Society, High-Energy Laser Weapon Systems Short Course], sec. 6, p. 50.）

等武器项目提供了借鉴。“天空卫士”是由诺格公司生产的陆地战车，配备激光防空武器，可打击来袭的短程弹道导弹、RAM 炮弹、无人飞行器和巡航导弹。[13]“天空卫士”为飞机提供大约 20 公里(12.4 英里)范围的保护，击落进入此范围的便携式防空导弹；对于更坚固的 RAM 目标，它的有效打击范围为 5 公里（3.1 英里）。[14] 另外，一些“悍马”战车上配有激光销毁弹药系统，叫做“宙斯神”(Zeus)，已投入伊拉克战场，用于摧毁地雷和未爆弹药。还有一种由移动战术高能激光器衍生的武器，称为“高能激光反火箭火炮迫击炮”战车，也由诺格公司生产，作为一种高能激光武器安装在卡车上，用于摧毁 RAM 威胁。[15]

预期在未来，陆军定向能武器既能在数十公里范围内摧毁大型武器，也可在数百米的范围内打击小型火器，其打击的目标主要是在大气接地层内的长距离及近乎水平轨迹的来袭武器。随着定向能武器向模块化和小型化发展，将可能进一步配备到陆军的其它平台（如履带车、轮式车和直升机）上。高能激光以其精准和速度，可能成为反狙击或者狙击行动中的兵器选择；又以其隐蔽特性(高能激光发出的光束肉眼看不见，而且没有声音)，可以达成以往战争中无法实现的战术奇袭效果。[16]

陆军的高能激光武器将立足于陆地，激光成斜角射入大气层，在接地层中长距离运行击中目标，故而受到浓密大气的强大影响。另外，悬浮微粒和光学湍流会在高能激光器发射孔周围造成大气扭曲，这种应力效应最难处理，容易导致光束弯曲或能量散射，极可能降低激光武器的打击效能。[17] 因此，气象作战预报和战术决策援助很可能在陆军使用高能激光武器的过程中发挥关键作用。

空军武器系统及其预期的运行环境

空军的机载激光系统是由改装的波音 747-400 飞机携带高能碘氧化学激光器，用

于击毁处于助推段的来袭弹道导弹。机载激光主要在 12—16 公里高度中运行，这个高度范围非常适合高能碘氧化学激光武器，因为这个层域中基本无云，水蒸气量也大量减少，气压只及海平面的大约 20%，因此进一步减少大气吸收。在此范围中，激光能射出数百公里。在 2007 年 1 月，机载激光平台向 NC-135E“大乌鸦”靶机发射了两束固态照射激光，以验证其跟踪空中目标的能力并测量大气湍流。[18] 在 2008 年 9 月 8 日加州爱德华兹空军基地的地面试验中，机载激光飞机发射高能化学激光首次成功击毁目标。[19] 机载激光试验计划进一步预定在 2009 年进行拦截飞行中弹道导弹的首次试验。[20]

空军的先进战术激光系统是在改装的 C-130 飞机上安装碘氧化学激光器，主要用于支援特种作战行动，激光束穿透大气接地层，照射和打击地面目标。因此，悬浮微粒效应的昼夜变化，再加上大气层的低层和接地层的动态特征，对于照射范围为数十公里的先进战术激光的效能影响极大。

高能激光在大气接地层中运行会发生衰减，衰减效应随任意一天中相对湿度的变化（图 2）而不同。并且，接地层的厚度和光学湍流的强度也是昼夜变化的。有时，相对高湿度加重散射而导致衰减更加严重，但如接地层相对较薄或光学湍流较弱的话，可在一定程度上抵消这种负面影响。如何量化这些效应以提升高能激光的打击效能，可能是最重要的工作。

先进战术激光先进概念技术演示项目主任曾经表示，波音公司正在考虑设计携带先进战术激光的固定翼平台系列。2007 年后期，该公司将碘氧化学激光器安装到 C-130H 飞机上。在 2008 年 8 月 7 日的一次试验中，飞机通过其光束控制系统发射高能化学激光，并且遵照先进战术激光作战管理系统的指令，锁定并导引激光束射中地面目标。[21]

空军研究实验室开发了“阻止人员和刺激反应”便携式激光点穴武器，这是一种非致命性的阻遏手段，用来保护军队和控制敌对人群。这种武器的操作环境是大气接地层的最低部分，用激光照射意图攻击者，使对方“眼花缭乱”，无法看到激光源和附近区域，从而短时制服对方。[22] 但在雨雪或者大雾中使用这种武器，可能发生偏离光轴的连带伤害，但这种效应至今没有完全量化。

还有一种非致命性高功率微波定向能武器，称为主动拒止系统，专门设计用来对付人，它将毫米波光束聚焦于人体皮肤，产生难以忍受的焦灼感。主动拒止系统安装在车上，主要在大气接地层内沿水平路径射向地面目标。根据 2007 年 1 月在美军佐治亚州穆迪空军基地向媒体举行的演示，战车的两名乘员锁定并射灼到 500 多米以外的目标。这种武器的批量生产预定在 2010 年开始。[23] 有关气候对主动拒止系统的战术影响，还需开展进一步的量化研究，因为在热带的许多地方，主动拒止系统光束能量可能在 1 公里距离内损耗 30%。鉴于这种严重的衰减，主动拒止系统操作员可能不得不根据环境湿度调整能量输出。

海军和海军陆战队武器系统及其预期的运作环境

海军正在集中力量研究定向能武器系统的若干潜在用途，比如保护舰队。研究的定向能武器打击范围包括空射和海射巡航导弹、快艇、遥驾飞机、火箭、漂浮水雷、直升机、固定翼飞机，以及其它新出现的威胁。[24] 任何设计用于海军水面作战舰船的武器系统都

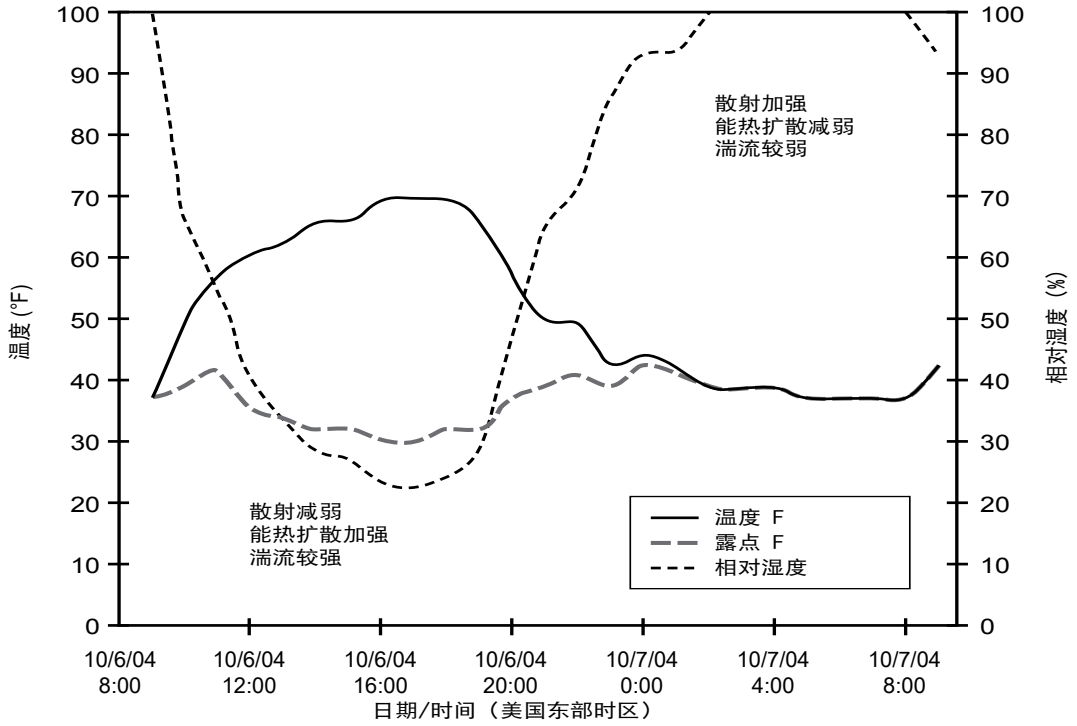

图 2:一个中纬度站点（美军俄亥俄州赖特—帕特森空军基地）在一个典型好天气（2004 年 10 月 6—7 日）中温度、露点和相对湿度的变化。图中标出相对湿度较低和较高时段，同时标出与之相应的悬浮微粒散射强弱变化和由此形成的能热扩散效应强弱变化。（能热扩散效应 [Blooming] 是指强激光束穿入吸收介质 [比如空气] 过程中，能量被吸收而产生密度变化，由此可能改变光束的强度分布，使其偏离预期的传播方向。能热扩散是大气被加热后形成的一种效应。取自《大气层：定向能专业协会高能激光武器系统速成课程》, sec. 6, p. 50。）图中还标出阳光热量和光学湍流较强的时段，主要在下午和傍晚。

必须在充满水蒸汽和潮湿的海洋环境中运作，为舰船提供保护和向地面部队提供间接火力支持。[25] 这些系统从海面舰船向陆地或者空中目标照射。如果定向能武器系统进一步安装到海军和海军陆战队用于支持地面部队和提供舰队保护的飞机中，也将经常在大气接地层的最低层域，即衰减效应最严重的层域中运行。

海军陆战队按照各种规模陆地作战和近距离作战需要所研制的定向能武器系统，可能与陆军拟用于战术环境的系统相似。因此，他们可能有机会借鉴其它军种的研究成果。

气象保障的几点考虑

为了正确使用和发挥定向能武器的效能，对气象的描述和预测可能需要精确到前所未有的水平。我们必须更充分了解大气层与定向能武器的相关性，不仅要利用对环境问题的研究成果，还必须认识定向能武器对气象的要求。

准确描述大气层特征

定向能武器要求我们准确描述传感器和目标之间的大气路径的气象特征。传统武器也有同样的要求，但远不需要如此精确，这

是因为一枚炸弹在从其投射平台到预期目标之间的路径中，大气层特征对武器轨迹的影响不是发生在分子层面。例如，风能够将从高空落下的炸弹吹离几百米，但是炸弹仍会落在地上爆炸。定向能武器光束则不然，其在传播过程中的每一段都可能因大气层的影响而改变强度、杀伤力和整体效能。显然，这类武器对气象描述精确程度的依赖超过其它任何武器。

激光武器要求我们更全面地了解激光束在射向目标的过程中可能发生的各种情况，现行的预测能力难以满足这种要求，因此精确描述定向能武器可能传播路径的特征具有重要意义，必须不断强调。为充分分析交战距离和环境变化，空军气象局现有的建模和模拟能力都欠不足，需要升级。目前的许多研究都是围绕和机载激光相关的光束控制问题，而这种机载激光的运行环境主要是相对有利的大气中、高层域。空军应同等重视对小型定向能武器在大气接地层中运行的研究。根据空军气象局的转型指南，我们必须“预期和管理日益发展的建模技术，从地面到近太空的纵向区域，以及新入库武器系统的物理要求（即机载激光）。”[26] 眼下，空军气象局担忧其气象保障能力难以满足定向能武器使用的预期要求。

利用别人的成果

由陆军装备司令部领导的战场环境部是国防部研发专供陆军使用的接地层武器的主要机构。空军气象局应可与陆军研究实验室合作，充分利用他们对陆军定向能战场武器大气影响的研究成果。这项成果不仅有助于空军气象局了解大气层对陆军这类战术武器的影响；而且还可支持专项气象预报产品的研发，以满足目前尚未列入议程的现行和预期的需求。[27]

按定向能武器要求做好气象备战

和高能激光及高功率微波武器相关的战术很可能不同于常规武器系统使用的战术。常规武器系统喜欢的“好天气”不一定适合定向能武器。仍以图 2 为例，好天气白天中的时段对低空定向能武器的打击效果有巨大影响。气象员在支持诸如低空、战术、高能和固态激光攻击行动时，需要平衡一些气象状态下的相互抵消效应，比如，下午时段光学湍流剧增而悬浮微粒散射较弱；上午时段悬浮微粒散射较强而光学湍流明显减弱。尽管图 2 描述的是平静天气，如果没有对大气接地层昼夜不同高度的高精确预报，就无法对高能激光在接地层内产生预期效果所需要的驻留时间做出准确评估。[28] 对这类显然不是“坏天气”的情况，仍需做出如此详尽的气象预报，这和传统的空军和陆军气候保障要求大不相同，但也不是没有先例。1970 和 1980 年代红外传感器和成像系统的出现和广泛使用，促使研制出供气象员使用的光电战术决策助手工具，此工具基于研发所用的早期辐射传输建模算法，配备直观的图形用户界面，经重新组合，便成为作战决策辅助手段。[29] 这些辅助工具有多种用途，包括作为红外寻的系统的“热交叉网络”，通过突出冷热背景的反差来帮助识别目标。随着高能激光和高功率微波武器进入武库，我们将需要立足当今的先进建模、模拟和研究技术手段，研制出定向能武器的作战决策辅助工具。

建议

在我们开始为定向能武器提供气象保障时，可利用许多目前正在开展的项目和活动，

空军气象局可在许多方面改进气象保障。我们必须继续现有的研究，争取更多资金投入对大气层的特征描述研究，除了研究课题和资金等关键问题以外，我们还必须得到各军种最上层领导的支持。

利用空军目前的气象教育科研能力

作为起步，空军气象局可以选择密西西比州基斯勒空军基地第 335 训练中队，加强对新预报员的教育和训练，增加一个关于气象对定向能武器传播的影响的学习单元。例如，增加一份“供您参考”文档或者“空军气象局技术说明”，这对本专业领域的预报员会有所帮助。定向能专业协会在其主办的大部分会议和研讨会上，都提供高能激光传播和高功率微波的速成课程，由专家授课。[30] 开展建模与模拟代码的研究，比如由空军理工学院定向能中心开发和管理的“高能激光端至端作战模拟”(HELEEOS)，以及由空军研究实验室太空飞行器部管理的“定向能环境模拟工具”(DEEST)，都可用于研发作战与战术决策辅助工具。[31] 安排国防部高层领导人参加相关汇报会或短期课程，推动他们逐步了解气象的影响。简言之，空军气象局应开始抓教育，一方面培养预报员，另一方面教育国防部内外的高层领导人。领导人了解了气象预报对定向能武器效能的影响之后，就会支持科研和技术开发，做出有利的资金分配。研究中应用高保真建模代码，如 HELEEOS 和 DEEST，将有助于把气象影响和定向能传播挂钩，覆盖从紫外线到无线电频率的所有频谱。这些现有的代码程序作为气象作战部门的决策辅助软件，是经过实践验证的优良建模工具，已在研究界赢得好评。

借鉴当前的研究活动

空军气象局必须审查由“高能激光联合技术办公室”主管的现有项目，从大气层影响评估和定向能武器发展预测的角度，判定当前研究活动的方向是否正确。高能激光联合技术办公室成立于 2000 年，任务是全面管理国防部属下的高能激光科技开发工作。该办公室最近几年的年度经费超过 7000 万美元，所支持的研究项目散布于工业界、学术界和政府部门。[32] 这些项目包括：空军理工学院的“高能激光端至端作战模拟”项目和空军研究实验室的“定向能环境模拟工具”部分项目。借鉴空军研究实验室定向能研究部、海军研究局和陆军太空与导弹防御司令部等部门目前开展的研究，也可能对高能激光和高功率微波的大气传播研究提供有用的支持。

争取研究资金

资金有助于支持许多方面的研究。一个重要的研究课题是：当今气象观察对定向能武器系统的保障是否达到了要求的程度。我们可能需要开发新气象产品，比如：光学湍流图、分子和悬浮微粒吸收图、散射图、激光能热扩散图，等等。这些环境研究活动将涉及学术界、私营界以及国防部。

我们必须敦促国防部和国会的高层领导人意识到：继续支持定向能和环境对定向能影响的技术研发和测试具有重大的意义。要对环境的影响加以量化，就必须对环境进行准确的特征描述和预测。定向能武器的优点很多，如光速攻击、精准打击摧毁、大面积打击瘫痪、每发弹药的平均废药筒量低（深弹仓）和每发弹药成本低。[33] 与此同时，美国的对手也在迅速发展定向能武器（尤其是高能激光）。[34] 如果我军能够深化理解气象环

境如何影响这种武器的效能，即使对手拥有先进硬件，我们也将占据一项重大的优势。

推动各方支持

空军气象界和空军气象局通过作战能力气象需求委员会，必须继续与采办部门合作，共同预测和确定独特的气象保障需求。[35] 新定向能武器系统的应用需要各种预报信息，比如光学湍流预报、悬浮微粒浓度分析、大气接地层高度预测，等等，而这些情报的研究将需要空军气象局的政策支持与协调。正在研发的许多系统还可能需要更多气象产品的支持。

空军装备司令部、情报与需求总部（AFMC/A2/5）可能是解决气象研究与空军定向能武器系统相关的采办问题的最佳机构，有助于促进定向能武器从实验室向实战过渡。对空军来说，空军装备司令部可以成为这项努力的主导部门。AFMC/A2/5 总部必须负责在任何空天系统投入实战之前，解决和大气研究相关的问题。空军研究实验室定向能研究部、陆军太空与导弹防御司令部、海军海上系统司令部、采办专业人士以及作战部门之间的密切合作，亦必不可少。

这项努力中还涉及到政治考量。选错和打错目标会产生巨大的地缘政治后果，甚至影响到可能改变战争方式的新型武器的接受与使用。

结语

空军气象界具有雄厚实力，如能加强努力，继续获得研究资金和高层领导支持，将能为定向能武器研究和应用提供卓越的气象保障。高能激光联合技术办公室、主要军事司令部和陆军都可提供资金，帮助我们探索如何最大程度地削弱或者最终利用大气层的影响，来发挥定向能武器的效能。在各司令部和机构都在争夺宝贵资源的现状下，我们要努力取得各方面的支持。必须使高层领导人明白，如果不支持这些研发努力，可能产生严重的后果（例如：由于没有全面预测环境影响，定向能武器未能达到预期效能）；以及如果不提供充分支持，可能导致对未来作战不利的意外战略 / 政治后果。我们应鼓励当前的研究努力，支持这些努力迅速转化成用于大气特征描述和评估的实用决策辅助工具。我们还要组织高层领导人和空军气象界各级相关人员接受定向能武器方面的教育和训练，确保我军的定向能武器能有效对付潜在敌人。美国的对手不会等到明天；他们已经开始行动。[36]

我们预期空军气象界不需做重大调整，但可能需要派遣气象专业人员进入高能激光联合技术办公室、空军研究实验室定向能研究部或者海军海上系统司令部等机构担任关键职务，这样做才能推动和主导对大气层特征的研究。高能激光联合技术办公室、空军研究实验室定向能研究部、学术界和私营界必须开展合作，才能保持立足于军用科研技术发展的前沿。空军理工学院和空军研究实验室应该得到资金，以继续升级和改进高能激光端至端作战模拟和定向能环境模拟工具等软件代码程序；进一步，我们必须充分利用这些研究工具，在其基础上开发出作战任务层级的决策辅助工具。在目前的财政环境下，要求增加人力难以如愿，可能的替代方式就是加强运用决策辅助工具来精确描述大气层特征，这也是可以接受的解决方案。空军气象界必须今天就行动起来，为明天的定向能武器及其效能发挥提供强大的气象保障。♣

注释:

1. Air Force Mission Directive, Air Force Weather Agency [空军任务指令 52 号：空军气象局] March 2004, 1.
2. Quadrennial Defense Review Report [四年防务评估报告], (Washington, DC: Department of Defense, 6 February 2006), 1, http://www.defenselink.mil/qdr/report/Report20060203.pdf.
3. Col Eileen M. Walling, High Power Microwaves: Strategic and Operational Implications for Warfare, [高功率微波：对战争的战略和战役意义] , Occasional Paper no. 11 (Maxwell AFB, AL: Center for Strategy and Technology, Air War College, February 2000), 6, http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/csat11.pdf.
4. USAF Scientific Advisory Board, New World Vistas: Air and Space Power for the 21st Century—Directed Energy Volume [新世界远景：21 世纪空天力量 — 定向能卷], (Washington, DC: USAF Scientific Advisory Board, 1995), 7.
5. 见注释 3，第 2 页。
6. 高功率微波（HPM）是一种能量形式，能“拒绝、中断、破坏和摧毁”电子。HPM 武器的目的是使机器而非人丧失能力。参看注释 3，第 1, 20 页和注释 4，第 8 页。
7. Richard J. Dunn,“Operational Implications of Laser Weapons”[激光武器的战役意义], Analysis Center Papers (Los Angeles: Northrop Grumman Analysis Center, 2005), 19.
8. 同上，第 20 页。
9. Capt De Leon C. Narcisse,“Comparison of the Refractive Index Structure Constant Derived from Numerical Weather Prediction (NWP) Models and Thermosonde Data”[数值气象预报模型与所归纳之折射率结构常数与热探仪数据之比较], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, March 2003), 17.
10. Air Force Space Command News Service,“Near-Space Programs to Provide Persistent Space Capability”[近太空项目提供持续太空能力], SpaceRef.com, 15 March 2005, http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=16403 (accessed 9 January 2009).
11. Northrop Grumman Corporation,“Mobile Tactical High Energy Laser (MTHEL)”[移动战术高能激光], Defense Update: International Online Defense Magazine, July 2006, 1, http://www.defense-update.com/ news/MTHEL.htm (accessed 8 January 2009).
12. C. Lamar, briefing, High Energy Laser Joint Technology Office Annual Review [高能激光联合技术办公室年审报告], Monterey, CA, subject: US Army Space and Missile Defense Command, 3 May 2005.
13. 见注释 11。
14. Jefferson Morris,“Northrop Unveils Skyguard Laser Air Defense System”[诺斯罗普推出空中哨兵激光防空系统], Aviationweek.com, 13 July 2006, http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_channel.jsp?channel=defense&id=news/LASE07136. xml (accessed 8 January 2009).
15. Marc Selinger,“U.S. Army Studying Guns, Lasers, Interceptors to Destroy RAMs”[美陆军研究枪炮、激光、拦截器旨在击毁炮弹], Aviationweek.com, 28 October 2004, http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_generic.jsp?channel=aerospacedaily&id= news/RAM10284.xml (accessed 8 January 2009).
16. 见注释 7，第 21 页。
17. George Y. Jumper and Robert R. Beland,“Progress in the Understanding and Modeling of Atmospheric Optical Turbulence”[大气光学湍流的理解与建模进展], AIAA-2000-2355 (paper presented at 31st American Institute of Aeronautics and Astronautics Plasmadynamics and Lasers Conference, Denver, CO, 19 — 22 June 2000). 光学湍流的定义是：“由大气湍流引发的、以折射率表示的时空波动。”
18. TSgt Eric M. Grill,“Airborne Laser Returns for More Testing”[机载激光返回基地做进一步测试], Air Force News, 26 January 2007, http://www.af.mil/news/story.asp?id=123038913 (accessed 8 January 2009).
19. “Boeing, Airborne Laser Team Begin Firing High-Energy Laser on ABL Aircraft”[波音机载激光团队开始在载运飞机上发射高能激光], Boeing, 8 September 2008, http://www.boeing.com/ids/news/2008/q3/080908a_nr.html (accessed 8 January 2009).

20. “Boeing-Led Airborne Laser Team Fires Tracking Laser at Airborne Target”[波音主导机载激光团队向机载目标发射跟踪激光], Boeing, 16 March 2007, http://www.boeing.com/news/releases/2007/q1/070316d_nr.html (accessed 8 January 2009); 和 “Boeing-Led Airborne Laser Team Actively Tracks Airborne Target, Compensates for Atmospheric Turbulence and Fires Surrogate High-Energy Laser”[波音主导机载激光团队积极跟踪机载目标，补偿大气湍流，发射替代高能激光], Boeing, 16 July 2007, http://www.boeing.com/news/releases/2007/ q3/070716c_nr.html (accessed 8 January 2009).

21. Dave Ahearn, “Boeing Laser Weapon Development Achieves Major Advances”[波音激光武器开发取得重大进展], US Air Force AIM Points, 16 October 2006, http://aimpoints.hq.af.mil/display.cfm?id=14435&printer=no (accessed 8 January 2009); 和 “Boeing Tests Entire Weapon System on Advanced Tactical Laser Aircraft”[波音在先进战术激光飞机上测试整个武器系统], Boeing, 13 August 2008, http://www.boeing.com/ids/news/2008/q3/080813a_nr.html (accessed 8 January 2009).

22. Eva D. Blaylock, “New Technology ‘Dazzles’ Aggressors”[新技术让侵略者‘眩晕’], Air Force Print News, 2 November 2005, http://www.af.mil/news/story.asp?storyID=123012699 (accessed 8 January 2009).

23. Elliott Minor, “Ray Gun Makes Targets Feel As If on Fire”[射线枪使目标感觉犹如全身着火], Air Force Times, 25 January 2007, http://www.airforcetimes.com/news/2007/01/apRayGun070125/ (accessed 9 January 2009).

24. B. Tait, briefing, High Energy Laser Joint Technology Office Annual Review [高能激光联合技术办公室年审报告], Monterey, CA, subject: Naval Sea Systems Command, PMS 405, 3 May 2005.

25. CAPT William J. McCarthy, USN, Directed Energy and Fleet Defense: Implications for Naval Warfare, [定向能与舰队防御：对海军战争的意义], Occasional Paper no. 10 (Maxwell AFB, AL: Center for Strategy and Technology, Air War College, May 2000), 21, http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/occppr10.htm.

26. Air Force Weather Strategic Plan and Vision, FY 2008 — 2032 [空军 2008—2032 财年气象战略计划和远景], (Offutt AFB, NE: Air Force Weather Agency, August 2004), 2.

27. The Federal Plan for Meteorological Services and Supporting Research, Fiscal Year 2008 [联邦 2008 财年气象服务与支持研究计划], (Washington, DC: US Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of the Federal Coordinator for Meteorology, August 2007), 145, http://www.ofcm.gov/fp-fy08/pdf/entire-fedplanFY2008.pdf.

28. The dwell time is the time the laser spot is maintained on the target for the desired effect. 驻留时间指按预期效果使激光焦点停留在目标上的时间。参看 Directed Energy Professional Society, High-Energy Laser Weapon Systems Short Course [定向能专业协会高能激光武器系统速成课程], sec. 8, p. 3.

29. Maj K. G. Cottrell et al., Electro-Optical Handbook, Volume 1: Weather Support for Precision Guided Munitions [光电手册第一卷：精确制导武器的气象保障], Air Weather Service Technical Report AWS/TR-79/002 (Scott AFB, IL: Air Weather Service, May 1979).

30. Directed Energy Professional Society, “DEPS Short Courses”[定向能专业协会高能激光武器系统速成课程], http:// www.deps.org/DEPSpages/shortCourses.html (accessed 9 January 2009).

31. “High Energy Laser End-to-End Operational Simulation (HELEEOS)”[高能激光端至端作战模拟], Air Force Institute of Technology, Center for Directed Energy, http://www.afit.edu/de/Default.cfm (accessed 8 January 2009).

32. Lt Col John B. Wissler, “Organization of the Joint Technology Office: Finding the Right Model for an Integrated, Coordinated Investment Strategy”[联合技术办公室组织结构：寻找综合协调投资策略的模式], Program Manager Magazine, November — December 2002, 26, http://www.dau.mil/pubs/pm/pmpdf02/Nov_Dec/wis-jf3.pdf; and US Government Accountability Office to Congressional Committees, memorandum GAO-05-933R High Energy Laser Transition Plans, subject: Department of Defense's Assessment Addresses Congressional Concerns but Lacks Details on High Energy Laser Transition Plans, 28 July 2005, 5, http://www.gao.gov/new.items/d05933r.pdf (accessed 9 January 2009).

33. 见注释 4，第 8 页。

34. Shaveta Bansal, “Pentagon Confirms China's Anti-Satellite Laser Test”[五角大楼证实中国的反卫星激光试验], All Headline News, 6 October 2006, http://www.allheadlinenews.com/articles/7005096999 (accessed 28 February 2007).

35. 同上。

36. 整合 / 计划 / 需求部主任 M. D. Zettlemoyer 上校 2007 年 2 月 12 日致 AF/A3O-WR/RP, MAJCOM A3Ws 信件。

免责声明

凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。