小型运载火箭引发的电离层空洞的数值建模与全球导航卫星系统观测

G. W. Bowden [1], **M. Brown** [1]

[1]新南威尔士大学堪培拉分校工程与信息技术学院，澳大利亚首都领地坎贝尔

arXiv:2303.17869v1 [physics.space-ph] 31 Mar 2023

要点：

- 研究了 Rocket Lab Electron 于 2021年3月22日 发射所产生的电离层效应
- 使用全球电离层-热层模型进行数值建模，并结合导航卫星信号观测，显示出具有可比性的电离层空洞

通讯作者：George Bowden，g.bowden@adfa.edu.au

摘要

太空发射会产生电离层扰动，这些扰动可以通过全球导航卫星系统信号延迟等测量手段观测到。本文报告了由小型运载火箭引起的电离层耗减的观测结果和数值模拟。研究对象是Rocket Lab Electron 于2021年3月22日协调世界时22:30进行的发射。尽管运载火箭非常小，查塔姆群岛的地面站仍测量到发射后导航卫星信号视线总电子含量的下降。大气环流模式结果显示，电离层耗减与这些测量结果具有可比性。视线测量显示，垂直总电子含量最大下降了2.7总电子含量单位，而模拟下降了2.6总电子含量单位。尾气羽流因其初始速度产生的平流，以及中性风随后造成的影响，被认为是这种建模形式仍面临的一些挑战。

通俗摘要

电离层是高层大气中的一个区域，包含离子和电子的混合物。火箭穿过该区域时释放的化学物质会使离子和电子复合，从而降低其浓度。针对 Rocket Lab Electron 火箭的发射，测量到了这种降低。测量基于不同频率信号穿过电离层所需时间的差异，该差异反映了电离层的浓度。针对该案例开展了计算机模拟，结果显示，发射后电离层浓度的下降与测量结果相似。基于这项工作，提出了对模型进行一些潜在改进的建议。

1 引言

在太空发射期间，火箭释放废气，从而改变电离层。废气包括 CO_2 和 H_2O 等异核分子，它们与 F_2区中的 O^+ 发生快速电荷交换反应，形成分子离子（Mendillo，1981）。这些离子易于发生中和反应，从而降低电离层电子密度。火箭发射后的电离层空洞已通过多种方法观测到，包括电离层测高仪探测（Booker，1961年）、卫星信号的法拉第旋转（Mendillo 等，1975）、气辉图像（Mendillo 与 Baumgardner，1982）、非相干散射雷达测量（Wand 与 Mendillo，1984）、全球导航卫星系统（GNSS）信号延迟（Furuya 与 Heki，2008），以及卫星朗缪尔探针测量（Park 等，2016）。这些耗减可用于研究电离层物理过程，或用于探测和表征发射活动。

本研究探讨 Rocket Lab Electron 运载火箭发射所导致的电离层空洞。这种三级、部分可回收的小型运载火箭（SLLV）湿质量为 13，000 千克，可将至多 300 千克的有效载荷送入近地轨道（LEO）（Rocket Lab，2022）。两级均使用 RP-1/LOX 混合推进剂。首次观测到电离层空洞是在 Vanguard SLV-4 火箭发射期间；这是一种尺寸相近的小型运载火箭（Booker，1961）。然而，此类小型运载火箭对电离层的影响此前尚未通过数值模拟进行研究，也未在全球导航卫星系统数据中观测到。

此次发射（任务名称为“They Go Up So Fast”）于协调世界时22:30（2021年3月22日）进行，对应查塔姆标准时间（CHAST）11:15。火箭实验室1号发射综合体是发射场，位于 $39.262°$S、 $177.865°$E（新西兰的M$^-$ahia半岛）。运载火箭搭载了7颗小型卫星，目标高度为450 km–550 km，轨道倾角为 $45.0°$ 。第2节和第3节分别概述了数值电离层-热层系统建模和应用于此次“They Go Up So Fast”发射案例的全球导航卫星系统观测方法

。这些研究的结果详述于第4节，并在第5节中进一步讨论。

2 数值建模

采用 Bowden 等（2020）概述的方法，使用全球电离层-热层模型（GITM）（Ridley 等，2006）对火箭发射导致的电离层耗减进行了数值模拟。此次模拟覆盖 8 小时，从3月22日协调世界时22:30至3月23日协调世界时06:30。所选区域的纬度范围为 $50°$S 至 $30°$S，经度范围为 $170°$E 至 $155°$W，高度范围为 100 km 至 536.67 km。该区域在水平方向采用规则的 108×144 网格，并在垂直方向设置 50 个网格点。这些高度对应于热层（中性大气中）以及电离层中的 E 层和 F 层。模拟分别在加入和未加入火箭尾气的情况下运行。根据第 3 节所述来源提供的方位角和仰角数据，计算了 GNSS卫星的视线方向积分电子密度，即斜向总电子含量（STEC）。每隔 300 s 输出一次结果。

根据目标轨道、高度和速度数据估算了火箭轨迹。Rocket Lab 在其发射视频中提供了速度和高度数据（Rocket Lab，2021）。这些数据表明，火箭经过模拟域时，第二级正处于点火状态。根据标称推力 $T = 25.8$ kN 和比冲 $I_{sp} = 343$ s，使用 $\dot{m} = T/(I_{sp} g_0)$ 估算了第二级点火期间的总质量流率（Rocket Lab，2022）。假设完全燃烧，将该流率分配给 H_2O 和 CO_2。发射后 520 s 内，沿火箭轨迹各点均加入火箭化学源项（这大致对应于火箭在约 320 km 高度处的第二级关机）。在加入这些源项前，先延迟 300 s，在此期间以解析方法模拟扩散，以避免产生过大的浓度梯度，因为这会导致全球电离层-热层模型的 GITM 数值求解器出现问题（Bowden 等，2020）。

3 全球导航卫星系统观测

发射后总电子含量（TEC）的变化由查塔姆群岛参考站（CHTI）测量，该站位于 $43.735°$S、 $176.617°$E，海拔高度为 75.764 米。CHTI站的斜向总电子含量（STEC）数据取自 Madrigal CEDAR 数据库。这些数据涵盖全球定位系统（GPS）卫星（此处编号为 1 至 31）和格洛纳斯卫星导航系统（GLONASS）卫星（编号为 32 至 55）。数据还包括估算的穿刺点位置，这些位置绘于图1中，以及方位角和仰角数据。为近似计算垂直总电子含量（VTEC），将 STEC 数据乘以 sin（α），其中 α 是在地面站测得的卫星仰角。本文将该量称为伪垂直总电子含量（PVTEC）。数据以 30 秒为间隔记录，但时间序列中间歇性地存在短暂的数据缺失。

火箭的飞行轨迹从这些岛屿以北经过，如图1所示。发射后的90分钟内，识别出卫星15、卫星29和卫星55的穿刺点与火箭地面轨迹相交，并将其选作进一步研究对象。如图2所示，卫星15最先发生交叉，其次是卫星55，最后是卫星29。

为了与未扰动电离层进行比较，还分析了时间偏移为1天的数据（即3月23日同一时刻的数据）。这两天的太阳活动水平同样较低，发射当天和次日观测到的彭里斯顿 $F_{10.7}$ 太阳通量指数分别为80太阳通量单位和79太阳通量单位（Tapping，2013）。两天均未出现C级或以上耀斑。两天的地磁活动也较弱，波茨坦 K_p 指数均未超过 $3+$（Matzka等，2021）。由于GNSS卫星的轨道周期为半个恒星日，其地面轨迹

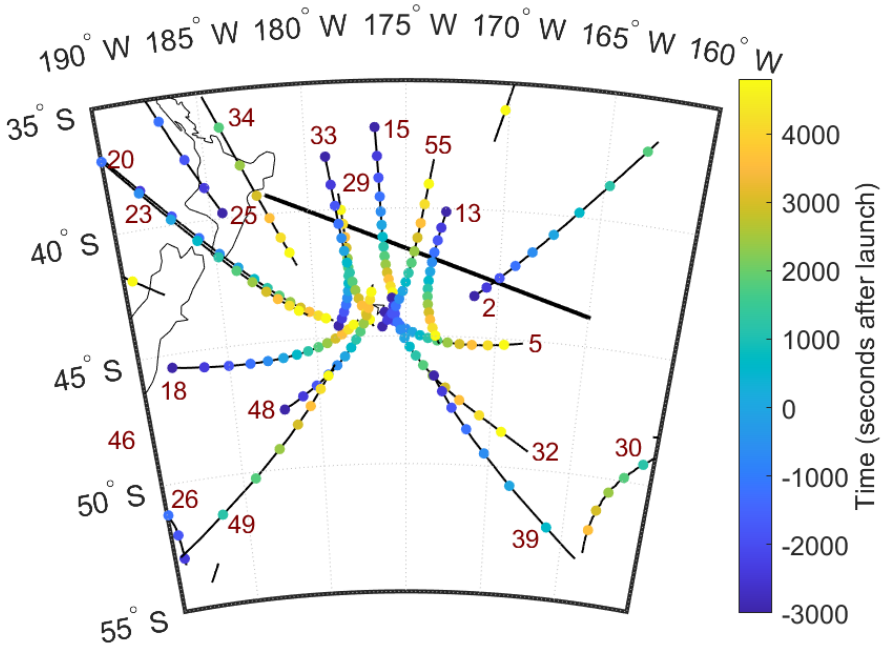


图1：21:40至24:00协调世界时期间，查塔姆群岛全球导航卫星系统地面站（CHTI）总电子含量测量的穿刺点。标记每隔10分钟绘制一次。第一、第二级点火期间估算的火箭地面轨迹以粗黑线表示。

每颗GPS卫星的地面轨迹大致会在次日重复。相比之下，格洛纳斯卫星的轨道周期与恒星日之比约为 8/17。由于每个轨道面上有8颗格洛纳斯卫星，一颗卫星大致会重复前一天前一颗卫星经过的地面轨迹。因此，可以将发射当天卫星55的数据与次日卫星48的数据进行比较。

还分析了位于 44.024°S、 176.369°E、海拔21.620米处的OWMG参考站的TEC数据。这些数据的特征与附近CHTI站的数据非常相似，支持相同的结论，但未提供额外信息。因此，此处不展示OWMG站的数据。

4 结果

模拟电离层空洞的初始扩展及随后衰减过程如图3所示。发射后不久，垂直总电子含量耗减呈高度拉长状，并与火箭地面轨迹对齐。随后，耗减区沿垂直于地面轨迹的方向扩展，同时其中心处的幅度减小。比较有火箭尾气和无火箭尾气的模拟结果，最大垂直总电子含量耗减为3.46总电子含量单位，发生于23:30。随着地方时从上午晚些时候推进到午后（11:15至14:45 CHAST），模拟中的背景垂直总电子含量增加，并变得更加均匀。

图4、5和6对比了全球电离层-热层模型的输出与在CHTI地面站获取的全球导航卫星系统测量数据。每种情况下，图中均显示了全球电离层-热层模型在有和没有火箭尾气时的输出，以及发射当天和次日的全球电离层-热层模型观测结果。在每种情况下，发射后全球导航卫星系统数据的斜向总电子含量耗减$\times \sin(\alpha)$均有证据表明

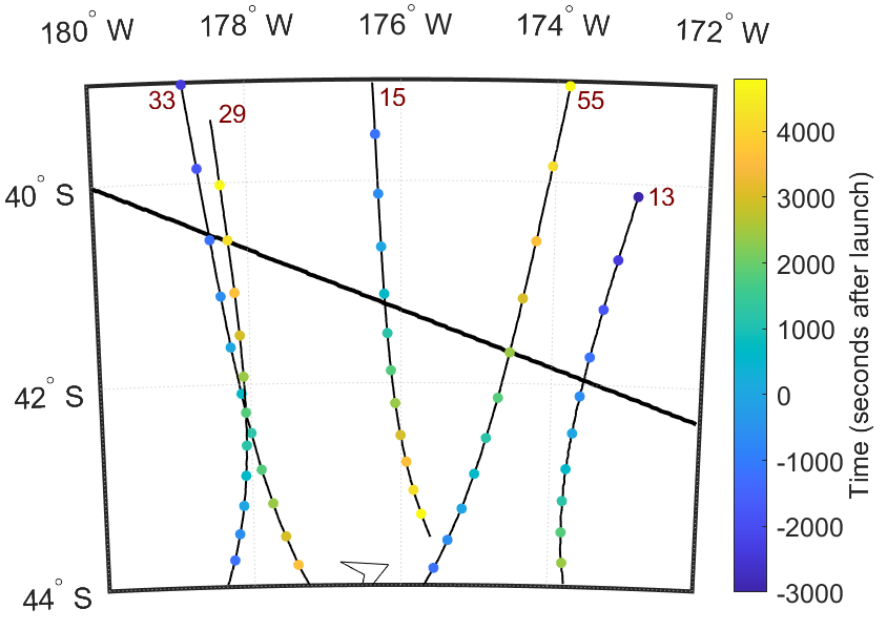


图2：与图1类似，放大显示地面轨迹与穿刺点交会处。

存在。卫星15的耗减最早出现，其次是卫星55，然后是卫星29。

卫星15观测对应的估计穿刺点约于协调世界时22:40穿越地面轨迹，并向南移动。因此，前后不久，火箭经过后，此时段附近的斜向总电子含量测量反映了尾气羽流中心附近的电离层变化。图4显示，约在协调世界时22:40，模拟的全球电离层-热层模型和真实全球导航卫星系统观测中，峰值垂直总电子含量的变化率均出现了突然变化。协调世界时22:40至22:50之间，观测量以约 -0.1总电子含量单位.min^{-1} 的速率变化。同期，有尾气与无尾气模拟量之间的差值以约 -0.05 总电子含量单位.min^{-1} 的速率变化。无尾气模拟中的峰值垂直总电子含量背景值稳步上升，而偏移1天的真实数据则略有下降。

对于卫星55的观测，穿刺点约在23:10 UTC穿越地面轨迹。图5显示，这次穿越时间与全球电离层-热层模型模拟中的峰值垂直总电子含量最低值大致重合。然而，实际的GNSS观测表明，最低值更早出现于23:02 UTC。模拟得到的最大耗减为2.6 总电子含量单位，而观测到的最大耗减（根据偏移1天的数据与发射后的数据之差确定）为2.7 总电子含量单位。在全球电离层-热层模型模拟中，模拟量的耗减在22:45至23:45 UTC期间较为明显（为最大值的$>$ 1%）。在大致相同的时段内，实际GNSS数据与偏移1天的数据之间存在显著差异。

对于卫星29，地面轨迹穿越约发生在23:40 UTC。然而，全球电离层-热层模型模拟中的峰值垂直总电子含量最低值更早出现于23:20 UTC。该量的观测值在23:14 UTC达到最低。模拟得到的最大耗减为0.9 总电子含量单位，而根据观测确定的最大耗减（按上述方法确定）为2.6 总电子含量单位。耗减出现在模拟的

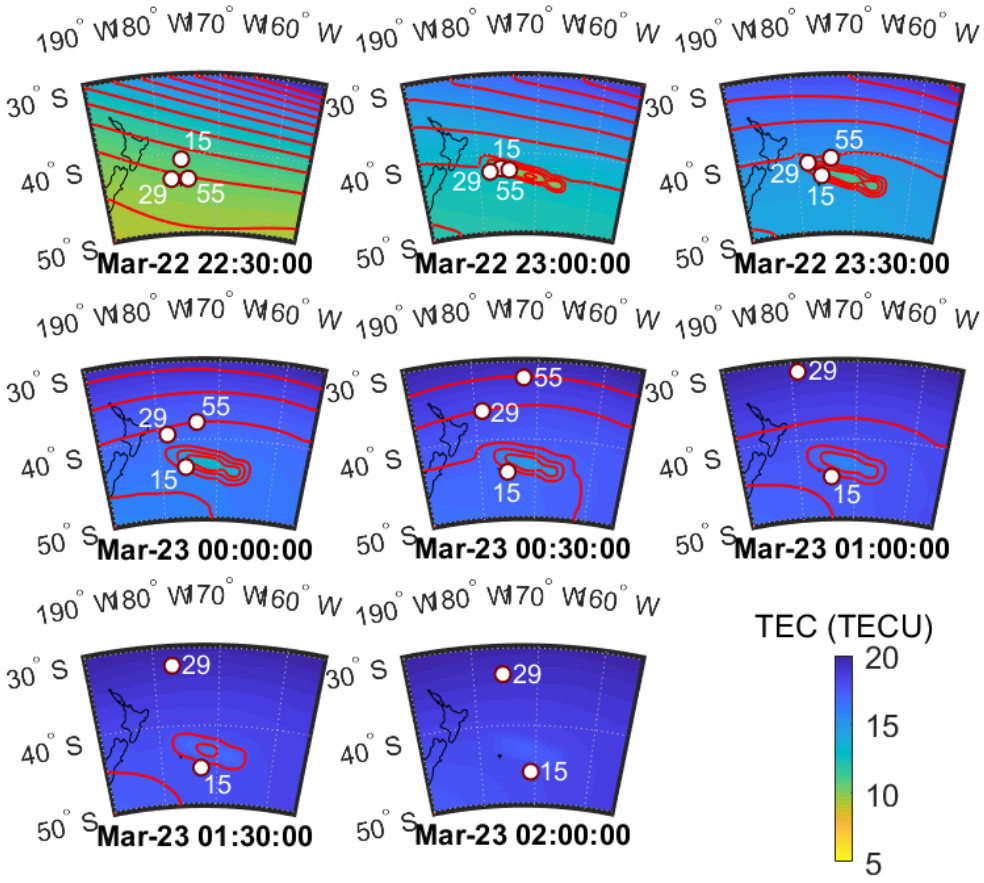


图3：全球电离层-热层模型对2021年3月22日协调世界时22:30 Electron发射的模拟垂直总电子含量图。红色等值线的间隔为1总电子含量单位 $\equiv$ 10^{16}电子.m^{-2}。图中叠加显示了卫星15、55和29的估计电离层穿刺点。

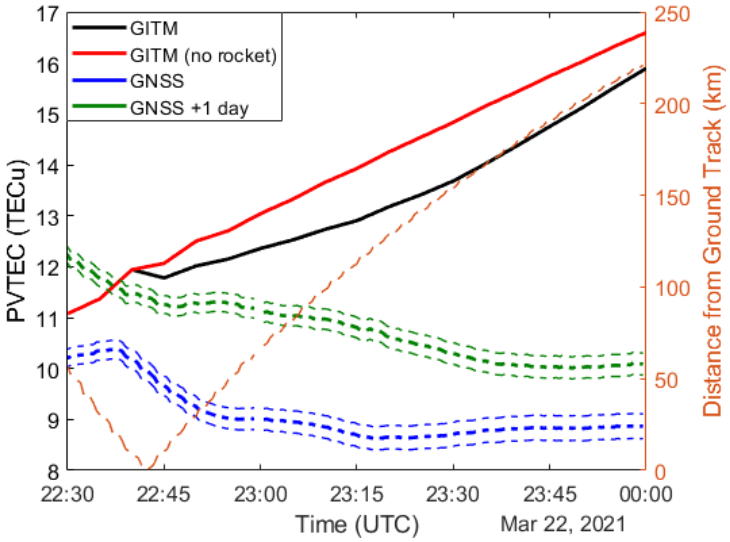


图4：CHTI地面站测得的GNSS卫星15的峰值垂直总电子含量。图中给出了发射后90分钟内，全球电离层-热层模型在加入火箭尾气（黑线）和未加入火箭尾气（红线）两种情况下的模拟结果。还给出了来自该卫星的全球导航卫星系统测量数据（蓝线）以及次日的可比测量数据（绿线）。全球导航卫星系统测量数据的平均值（粗线）以及上、下界（细线）均绘于图中。此外还标出了穿刺点到地面轨迹的估计距离（细橙线，右轴）

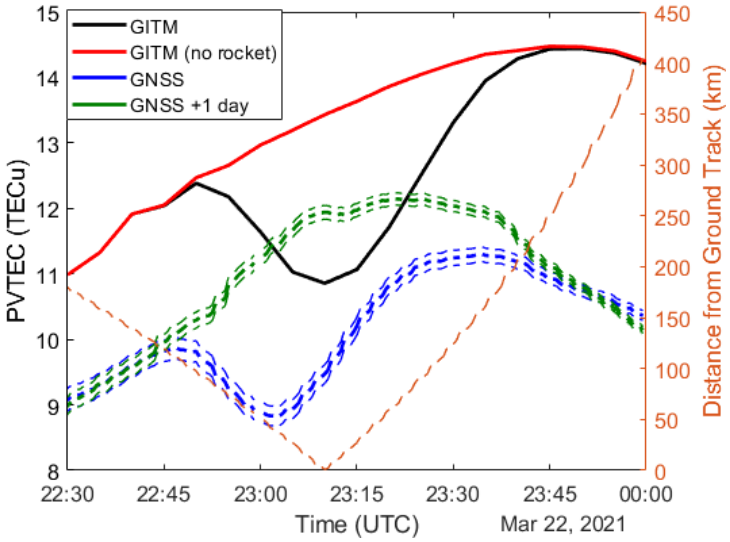


图5：GNSS卫星55（黑、红、蓝线）和卫星48（绿线）的结果，与图4类似。

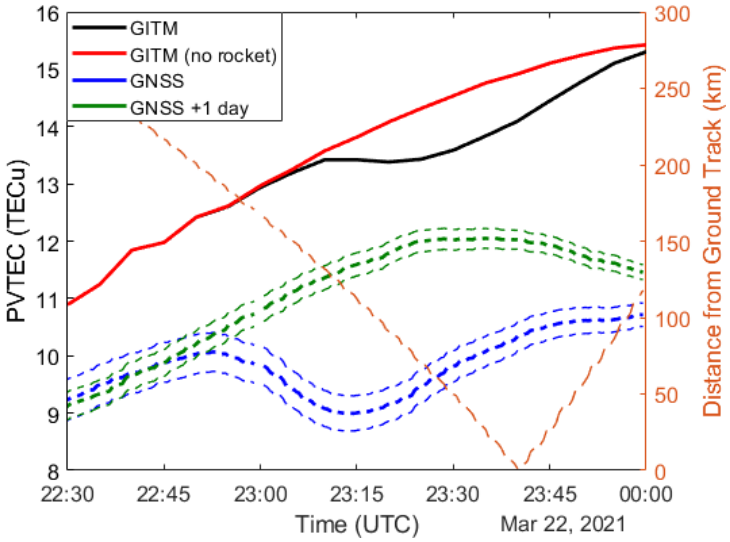


图6：与图4类似，展示全球导航卫星系统卫星29的情况。

从23:00协调世界时起的数据（达到最大值的 $> 1\%$）以及真实全球导航卫星系统数据与偏移1天的数据之间的显著差异，大约在此时出现。

通过绘制图7中尾气分子和电子总数的变化，展示了耗减的整体演化过程。我们将 $-\Delta N_e$、 ΔN_{CO_2}和ΔN_{H_2O}分别定义为加入火箭尾气所导致的电子、CO_2 分子和H_2O分子数量差异。由于显著的电离层空洞仅限于200 km以上区域，且全球电离层-热层模型会在100 km的下边界附近引入不切实际的浓度变化，因此仅考虑200 km以上的电子和分子（Bowden 等，2020）。沉积火箭尾气后， ΔN_{CO_2}和ΔN_{H_2O} 均从初始值开始迅速下降。这导致 ΔN_e 在3月23日00:05协调世界时达到约 8.2×10^{27} 的最大值。随后， ΔN_e 以 $\tau \approx 2$ 至3小时的特征时间（$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\delta n}\frac{d\Delta n}{\delta t}$）衰减。

图8展示了加入火箭尾气后，不同高度上尾气分子和电子数量的模拟变化。我们将 $-\lambda_e$、 λ_{CO_2} 和 λ_{H_2O} 定义为加入火箭尾气后，单位高度内电子、CO_2分子和 H_2O 分子数量的相应差值。CO_2 和 H_2O 浓度最初均在约 270 km 高度附近达到峰值，随后向较低高度扩散。电子浓度最初在相近高度范围内下降，之后数小时内逐渐向更高高度扩散。这些下降在较高高度持续的时间往往更长。

5 讨论

第 4 节所呈现的观测和模拟结果表明，即使是 Electron 这样的相对较小的运载火箭，其电离层效应也可以通过 GNSS观测 检测到。真实测量和模拟测量均显示，电离层耗减幅度大于这些测量的不确定度。这些结果表明，全球导航卫星系统地面站的观测具有足够的灵敏度，能够在大多数航天运载火箭穿越 F 层高度时对其进行检测。未来可以利用数值模拟为分类方案提供数据，以确定发射是否正在使用全球导航卫星系统观测进行。

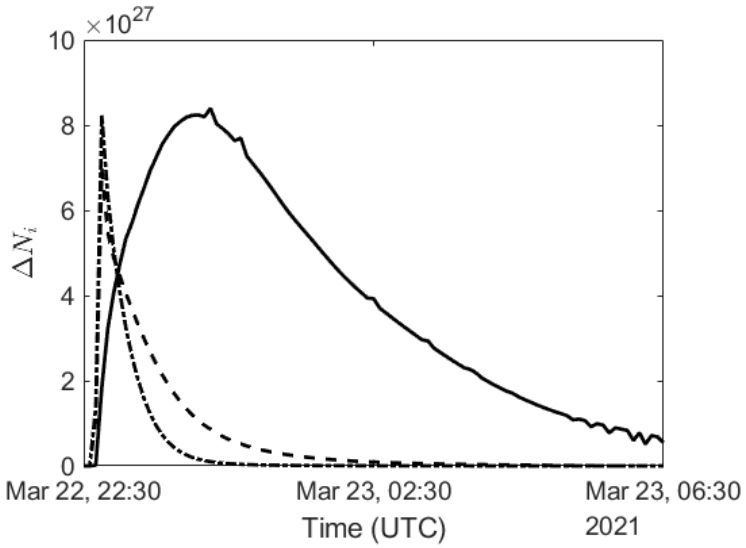


图7：火箭造成的全球电离层-热层模型模拟中，200 km 高度以上电子总数和尾气分子总数的变化。图中显示了 ΔN_e （实线）、 ΔN_{CO_2} （虚线）和 $\Delta N_{\mathrm{H_2O}}$ （点划线）。

用于分类方案，以利用全球导航卫星系统观测确定何时发生发射。

与此前研究的福卫五号猎鹰9号发射案例（Bowden 等，2020）相比，我们的方法对本案例 TEC 耗减幅度的模拟结果与观测更为吻合。这可归因于本文所述案例的爬升角较小。因此，Electron 案例中羽流速度的初始垂直分量较低，在模拟中忽略 CO_2 和 H_2O 分子的相应垂直平流也就更加合理。这些分子所处的高度较低，对应的热层驻留时间也较短。此外，在 F 层中，电离层生成率会随高度降低而增加。这些效应共同导致电离层耗减持续时间较短（比较图7与 Bowden 等（2020）中的图10(b)）。未来，基于卫星的 GNSS 无线电掩星观测或可为更直接地研究高空耗减的演变提供机会。

由于火箭尾气在水平方向上的初始速度而产生的平流，在Electron案例中可能十分重要。这或许有助于解释为何对于卫星29的观测，全球电离层-热层模型低估了耗减程度，而对于卫星55的观测却没有低估。图1显示，前一颗卫星的穿刺点经过的位置更靠近发射场。Electron I_{sp} 值对应于 $v_e = 3360$ m.s^{-1}的尾气速度。据估计，运载火箭在发射约297 s后、位于 40.88°S、 177.31°W时达到这一速度。在此之前，尾气的初始速度将与运载火箭的速度方向相反（在地心地固参考系中）。

Electron小型运载火箭的发射，相较于大型运载火箭的发射，更接近于我们将初始羽流膨胀模拟为一系列点释放的模型。较小运载火箭的羽流尺寸较小，近似解析处理表明，长度和最大半径均与$\sqrt{T}$ 成正比，其中 T 为推力（Jarvinen等人，1966）。此外，较小运载火箭施加在背部的力-

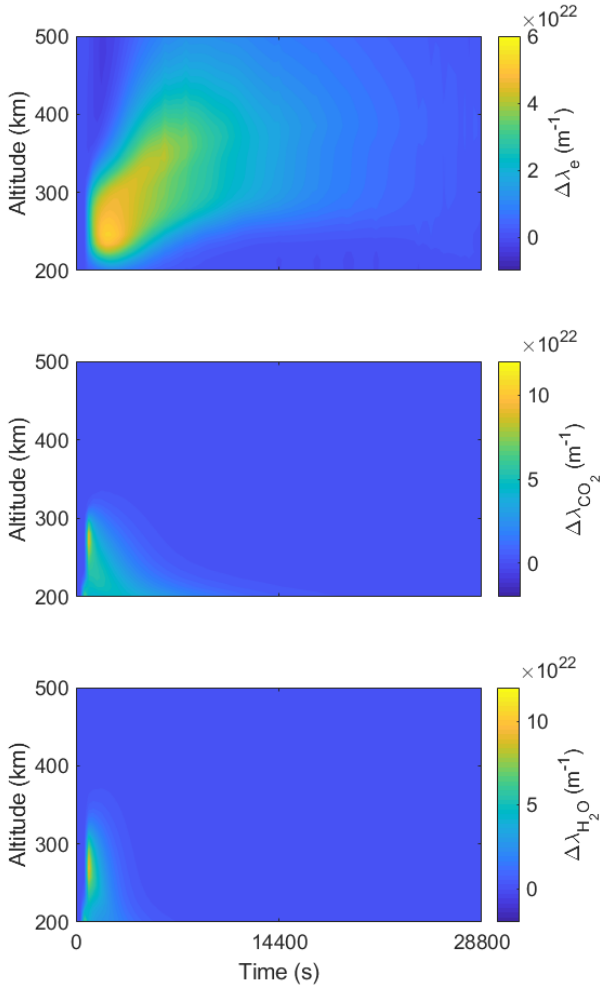


图8：随时间变化的（a）电子、（b）CO_2分子和（c）H_2O 分子数量变化的高度分布。

地面电离层和热层对背景状态的影响预计较小。因此，由此产生的扰动（例如“推土效应”，即羽流直接排开电离层）也会减弱。

对于较小型运载火箭，废气的初始高浓度较不容易使电离层达到饱和，从而将电子和离子浓度降至极低水平，进而抑制这些废气对耗减的进一步贡献。因此，在这种情况下，数值模型对羽流早期膨胀过程的处理方式不太敏感。这也会限制废气扩散到更高高度的机会，因为在那里废气可能导致持续时间较长的电离层空洞。图7显示，在 Electron 发射的模拟中，废气在热层内停留的时间较短，与耗减持续存在的时间相比尤其如此（ΔN_{CO_2} 和 ΔN_{H_2O} 分别在发射后95分钟和65分钟降至峰值的10%以下）。与 Bowden 等（2020）研究的两次猎鹰9号发射相比（参见该文献中的图10），这一案例的模拟中废气消散得更快。

卫星55和29的部分垂直总电子含量观测中的极小值，早于其穿刺点穿过卫星轨迹的时间出现。因此，由于热层风对火箭尾气的平流作用，电离层耗减似乎被推向南方，朝向CHTI地面站。全球电离层-热层模型估计极小值出现得较晚，这表明该模型低估了这些风的向南分量。

本研究中的区域全球电离层热层模型模拟未包括全球尺度的对流，而对流会影响中性风和离子漂移速度。这些模拟在纬度和经度的上下边界采用了开放边界条件，导致较长时间模拟产生不现实的结果。图3显示，耗减区域外的总电子含量纬向变化会随时间显著减小。未来可通过采用带有局部网格加密的全球全球电离层-热层模型运行来纠正边界条件问题；Zhao等（2020）描述了这种用于研究多尺度现象的能力。

6 结论

在Electron小型运载火箭发射后观测到了电离层空洞。由于这些空洞导致的斜向总电子含量变化，其观测结果与全球电离层-热层模型模拟在幅度和持续时间上具有可比性，表明全球环流模式有望用于模拟这些人为活动对电离层的影响。模拟表明，与由此产生的电离层耗减相比，废气的存留时间较短，这不同于Bowden等（2020）此前研究的FORMOSAT-5发射案例。在全球导航卫星系统观测中发现了电离层耗减向南平流的证据，而区域全球电离层热层模型模拟未考虑这一点。这些发现将为未来全球环流模式的发展提供依据，以模拟火箭与电离层之间的相互作用。

致谢

本研究获得美国空军科学研究办公室资助（资助编号 FA2386-22-1-4003）。研究使用了由澳大利亚政府支持的国家计算基础设施（NCI）资源。MAPGPS 总电子含量数据通过 Madrigal CEDAR 数据库获取，该数据库可通过万维网访问（网址：http://cedar.openmadrigal.org/index.html/）。

参考文献

Booker, H.（1961年）。导弹飞越导致F区电离局部减少。《地球物理研究杂志》，*66*(4), 1073–1079。取自 http://dx .doi.org/10.1029/jz066i004p01073 doi: 10.1029/jz066i004p01073

Bowden, G. W., Lorrain, P., & Brown, M.（2020）。使用一般环流模式对火箭发射造成的电离层空洞进行数值模拟。《地球物理研究杂志：空间物理》，*125*(6), e2020JA027836。Furuya, T., & Heki, K.（2008）。利用密集GPS阵列观测到的上升中的火箭后方电离层空洞。《地球、行星与空间》，*60*(3)，235–239。取自 http://dx.doi.org/10.1186/BF03352786 doi: 10.1186/BF03352786 Jarvinen, P. O., Hill, J. A. F., Draper, J. S., & Good, R. E.（1966）。高空火箭尾迹 （技术报告）。MITHRAS，剑桥。Matzka, J., Bronkalla, O., Tornow, K., Elger, K., & Stolle, C.（2021）。地磁Kp指数。德国地球科学研究中心*GFZ*，*11*。Mendillo, M.（1981）。火箭发射对电离层的影响。《空间研究进展》，*1*(2)，275–290。取自 http://dx.doi.org/10.1016/ 0273-1177(81)90302-1 doi: 10.1016/0273-1177(81)90302-1 Mendillo, M., & Baumgardner, J.（1982）。电离层空洞的光学特征。《地球物理研究快报》，*9*(3)，215–218。取自 http://dx.doi .org/10.1029/GL009i003p00215 doi: 10.1029/GL009i003p00215 Mendillo, M., Hawkins, G. S., & Klobuchar, J. A.（1975）。天空实验室发射导致电离层F层突然消失。《地球物理研究杂志》，*80*(16)，2217–2228。取自 http://dx.doi.org/10.1029/ JA080i016p02217 doi: 10.1029/JA080i016p02217 Park, J., Kil, H., Stolle, C., L¨uhr, H., Coley, W. R., Coster, A., & Kwak, Y. S.（2016）。Swarm卫星观测到的日间中纬度等离子体空洞：火箭尾气的顶部侧特征。《地球物理研究快报》，*43*(5)，1802–1809。取自 http://dx.doi.org/10.1002/2016GL067810 doi: 10.1002/2016GL067810 Ridley, A. J., Deng, Y., & T´oth, G.（2006）。全球电离层—热层模式。《大气与太阳—地球物理学杂志》，*68*(8)，839-864。取自 http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2006.01.008 doi: 10 .1016/j.jastp.2006.01.008 Rocket Lab。（2021）。*Rocket Lab*——他们升空如此迅速：*2021*年*3*月*22*日发射。 取自 https://www.youtube.com/watch?v= u5wmrGriVX0 Rocket Lab。（2022）。*Electron*。 检索于2022-12-6，取自 https://www .rocketlabusa.com/launch/electron/ Tapping, K.（2013）。10.7厘米太阳射电通量（f10. 7）。《空间天气》，*11*(7)，394–406。Wand, R. H., & Mendillo, M.（1984）。人工改造电离层的非相干散射观测。《地球物理研究杂志：空间物理》，*89*(A1)，203–215。取自 http://dx.doi.org/10.1029/ JA089iA01p00203 doi: 10.1029/JA089iA01p00203 Zhao, Y., Deng, Y., Wang, J.-S., Zhang, S.-R., & Lin, C. Y.（2020）。热带气旋引发的高层大气重力波扰动：GITM-R模拟。《地球物理研究杂志：空间物理》，*125*(7)，e2019JA027675。