

地-电离层波导 VLF 截止频率提取方法比较研究

董轩¹² 赵庶凡^{1*} 廖力^{3*} 申旭辉¹

1 (中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 地-电离层波导第一截止频率可用于反演低电离层 D 区等效反射高度, 但现有卫星提取方法缺乏系统评估。本文基于 DEMETER 卫星 2006-2009 年夜间 VLF 功率谱数据, 在全球 19 个 5°×5° 网格内, 系统比较了 Toledo 局部极小值法与 V 形判据法、Det-Avg 与 Avg-Det 两种统计顺序及连续点合并策略的影响。结果表明: V 形判据法在保持高检出率(81.04%)的同时显著提升准确率(71.99%, F1 值 0.762), 有效抑制伪检测; Avg-Det 方法在多个低纬区域完全失效且截止频率估计偏低; 连续点合并对均值影响有限(0.7-19.3 Hz), 主要削弱样本相关性。V 形判据法结合 Det-Avg Merge 策略更适用于 VLF 截止频率及 D 区反射高度的气候学研究, 为理解 D 区空间结构与季节变化提供可靠观测约束。

关键词 地-电离层波导; 极低频(VLF); 截止频率; 电离层 D 区

中图分类号 (高层大气物理 P351, 电离层物理 P352, 高层大气探测 P356)

Comparative Study of VLF Cutoff Frequency Extraction Methods for the Earth-Ionosphere Waveguide

Xuan Dong¹² Shufan Zhao^{1*} Li Liao^{3*} Xuhui Shen¹

1 (State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing, China)

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

3 (Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China)

Abstract The first cut-off frequency of the Earth-ionosphere waveguide can be used to infer the effective reflection height of the lower ionospheric D region, but existing satellite-based extraction methods lack systematic evaluation in identification criteria and statistical strategies. Based on nighttime VLF electric field power spectrum data from the DEMETER satellite (2006-2009), this

*通讯作者: 赵庶凡, 邮箱: zhaoshufan@nssc.ac.cn 廖力, 邮箱: liaoli@cea-igp.ac.cn
中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”自主部署项目(E4PD30101S); 中国科学院国家空间科学中心国家重点实验室专项研究基金(批准号: E5262FA1); 中国科学院国家空间科学中心人才启动研究基金(批准号: 2023000034、E3RC2TQ41S、E3RC2TQ51S); 国家自然科学基金(批准号: 42174212)

study defines nineteen $5^\circ \times 5^\circ$ grids within 60°N - 60°S over three representative oceanic regions (western Pacific 120°E - 125°E , Atlantic 25°W - 30°W , and central Pacific 175°W - 180°W), and systematically compares the Toledo local minimum method and the V-shape criterion, two statistical orders (detect-then-average, Det-Avg; average-then-detect, Avg-Det), and a consecutive-point merging strategy. Comparative analysis based on 1,900 manually verified samples shows that the V-shape criterion, which requires the power recovery on both sides of the local minimum (H_{left} and $H_{\text{right}} \geq 0.15$), significantly improves precision to 71.99% (F1 score: 0.762) while maintaining a high recall rate of 81.04%, effectively suppressing false detections caused by noise and weak local minima. The Toledo method, despite achieving comparable recall, yields an overall precision of only 31.48%, making it prone to spurious detections under complex spectral backgrounds. Regarding statistical ordering, the Avg-Det method fails completely in multiple low-latitude and highly variable regions, where transient disturbances prevent a stable V-shaped minimum from surviving spectral averaging; even in detectable regions, cut-off frequencies are systematically underestimated. The Det-Avg strategy preserves the natural variability of cut-off frequency and yields statistically clearer estimates. The consecutive-point merging strategy produces modest differences in mean cut-off frequency (0.7-19.3 Hz), with its primary role being the reduction of sample correlation introduced by continuous along-track satellite sampling. These results demonstrate that the V-shape criterion combined with the Det-Avg Merge strategy ensures physical reliability and detection completeness while effectively addressing spatiotemporal sample correlation. This method combination is better suited for climatological studies of VLF cut-off frequency and D-region reflection height, providing reliable observational constraints for understanding the spatial structure, seasonal variations, and physical control mechanisms of the lower ionospheric D region.

Key words: Earth-ionosphere waveguide; very low frequency (VLF); cutoff frequency; ionospheric D region

0 引言

低电离层（电离层 D 区，约 60-90 km）位于中性大气向等离子体过渡的关键高度范围，处于强碰撞控制区，电离过程与中性成分化学、动力学耦合显著，其电子密度结构受太阳辐照、粒子沉降、宇宙线通量以及中性大气动力学等多种因素共同调制，呈现复杂的时空变化特征¹⁻⁵。然而，该区域的直接探测面临特殊困难：高度过低（60-90 km）无法进行卫星原位探测，又过高而难以被常规气球触及⁶⁻⁸。传统探空火箭虽可穿越该区域，但观测时间短且成本高昂。极低频（ELF，约 3 Hz-3 kHz）和甚低频（VLF，约 3-30 kHz）波在地-电离层波导（Earth-Ionosphere Waveguide, EIWG）中可进行长距离传播，其传播模态、衰减与色散特征对电离层 D 区有效电导率与反射条件高度敏感，因此 VLF 技术逐渐成为低电离层遥感监测的核心手段之一⁹⁻¹¹。

传统地基 VLF 监测通常利用已知发射源的相位/幅度扰动或窄带传播参数来反演电离层 D 区的等效反射高度与电离变化，具有高时间分辨率、对突发事件（如太阳耀斑、粒子沉降、雷暴强扰动）响应快等优势，但其观测受台站分布与传播路径几何限制，难以获得全球覆盖且不同传播路径之间的对比常受下边界电导率差异与路径几何影响¹²⁻¹⁵。随着天基电磁场探

测的发展，卫星平台能够在夜间低背景条件下直接观测到 EIWG 泄漏到电离层上方的 ELF/VLF 频谱结构，使得在全球尺度上用“频谱形态”反演电离层 D 区电子密度等效参数成为可能：在 EIWG 中，截止频率附近常出现稳定的谱凹陷/极小值；在简化的平行板波导近似下，第一截止频率 f_1 与等效反射高度 h 之间满足 $f_1=c/(2h)$ ，因此可将频谱中可识别的截止特征直接转化为低电离层“等效反射高度”的统计估计^{16,17}。

Toledo-Redondo, *et al.*¹⁶ 基于 DEMETER 卫星数据首次系统地提出了 VLF 截止频率的卫星提取方法，并给出了全球等效反射高度的季节变化分布图，揭示了电离层 D 区等效反射高度的纬度依赖性和季节变化规律。此后，该方法被应用于地震电离层异常等研究领域^{18,19}。但需要指出的是，截止频率自动提取链条通常包含多个可调环节——例如频谱预处理（线性化、归一化、平滑等）、极小值/形态判据、阈值与边界效应处理、统计顺序（先检测后平均或先平均后检测），以及沿轨连续样本相关性的处理策略等。由于截止凹陷往往叠加在宽带背景之上并受噪声及自然辐射源（如雷电脉冲）影响，不同研究在上述细节上的选择可能显著改变截止频率的检出率、系统偏差与空间分布一致性，从而给不同结果之间的对比与产品可靠性评估带来困难。因此，有必要对截止频率提取过程中的关键方法选择进行系统、定量的对比评估，建立在全球统计与复杂谱形条件下更稳健、可复现的自动化提取方案。

基于此，本文旨在系统比较 VLF 截止频率提取过程中的关键方法选择，定量评估其对最终结果的影响。具体而言，本文比较：（1）两种截止频率识别方法——Toledo 局部极小值法与 V 形判据法；（2）两种统计处理顺序——先检测后平均(Det-Avg)与先平均后检测(Avg-Det)；（3）连续点合并策略对统计结果的影响。本文在全球设置 21 个代表性网格（7 个纬度带×3 个经度带）开展实验；受卫星数据覆盖限制，其中 2 个网格未能获得有效样本，最终在 19 个网格上开展统计分析，以定量评估不同方法的适用性，并据此提取 VLF 等效反射高度的全球分布特征。网格的经度带用于刻画不同地球物理环境差异：中太平洋（175°W-180°W）主要为海洋背景，大西洋（25°W-30°W）邻近南大西洋异常区，而西太平洋（120°E-125°E）在赤道附近对应全球闪电活动高发区；纬度带则覆盖北半球高中低纬、赤道以及南半球低中高纬（55°N-60°N、35°N-40°N、15°N-20°N、2.5°S-2.5°N、15°S-20°S、35°S-40°S、55°S-60°S），以确保结论具有全球代表性。

1 数据与方法

1.1 DEMETER 卫星与 VLF 数据

DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) 是法国 MYRIADE 系列首颗科学微卫星，于 2004 年 6 月发射，主要科学目标是研究地震前电离层中的电磁前兆现象²⁰⁻²²。卫星运行于近圆形太阳同步轨道，倾角 98°，轨道高度最初为 710 km，2005 年 12 月调整至 660 km。该轨道的上行半轨对应夜间（地方时 22:30），下行半轨对应白天（地方时 10:30），即无论纬度或轨道编号如何，所有观测均在固定的地方时进行。卫星每天运行约 14 圈，在地磁不变纬度±65°范围内获取科学数据^{23,24}。

DEMETER 搭载的 ICE (Instrument Champ Électrique) 电场传感器由四个球形电极组成, 通过可伸缩杆部署在距卫星本体约 4 m 处, 可实现 DC 至 3.5 MHz 范围内的三分量电场测量²⁵。VLF 通道频率范围为 15 Hz-17.4 kHz, 采样率 40 kHz, 传感器灵敏度约 $0.05 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。VLF 功率谱在星上以 19.53 Hz 的频率分辨率计算, 并以 40 个频谱为一组进行平均, 得到 2.048 s 的时间分辨率; 平均后的频谱归一化至其最大值, 转换为 8 位分辨率后通过遥测传回地面。VLF 工作模式下, 巡测模式中仅有一个电场分量被传输至地面。在本研究所涉及的年份 (2006-2009) 中, 该分量始终为 E_{12} , 其方向大致与地球上的东西向平行。

本研究使用 2006-2009 年 ICE 仪器巡测模式下的夜间 VLF 频谱数据, 对应约 20000 个 DEMETER 轨道周期。选取夜间数据基于以下考虑: 白天电离层物理条件复杂, 自然噪声 (主要为 hiss) 强度显著增高, 且闪电产生的球状放电信号 (sferics) 因电离层密度增加而受到强烈衰减²⁶; 此外, 所选时段太阳活动整体处于较低水平, D 区背景电离状态相对稳定。

1.2 研究区域与实验网格设置

本研究在全球范围内设置 21 个代表性格 (7 个纬度带 $\times$ 3 个经度带), 受卫星数据覆盖限制, 其中两个网格未能获得足够个数的有效样本 (样本数量小于 1000), 最终在 19 个网格上开展统计分析 (图 1)。经度方向选取三条具有不同地球物理背景且经向分布互补的海域带: 中太平洋 (175°W-180°W) 作为典型海洋背景区, 大西洋 (25°W-30°W) 邻近南大西洋异常区²⁷, 西太平洋 (120°E-125°E) 位于赤道附近、对应全球闪电活动高发纬带; 纬度方向在 60°N-60°S 范围内设置 7 个 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格 (55°N-60°N、35°N-40°N、15°N-20°N、2.5°S-2.5°N、15°S-20°S、35°S-40°S、55°S-60°S), 用于覆盖北半球高中低纬、赤道及南半球低中高纬条件下的地-电离层波导差异。受闪电产品时间覆盖限制, 图 1 中叠加的 2019 年闪电分布仅用于背景表征, 用以指示不同经度带雷暴激励的相对强弱而不参与定量计算²⁸。此外, $5^\circ \times 5^\circ$ 的空间网格划分方式在以往 VLF 波导与电离层统计研究中被广泛采用¹⁶, 被证明能够在空间分辨率与样本数量之间取得较好的平衡, 适合对多轨卫星数据进行综合统计分析。在本研究中, 每个网格内均包含约 5300-5600 条有效功率谱样本, 样本规模满足 VLF 截止频率统计分析的可靠性与稳定性要求。

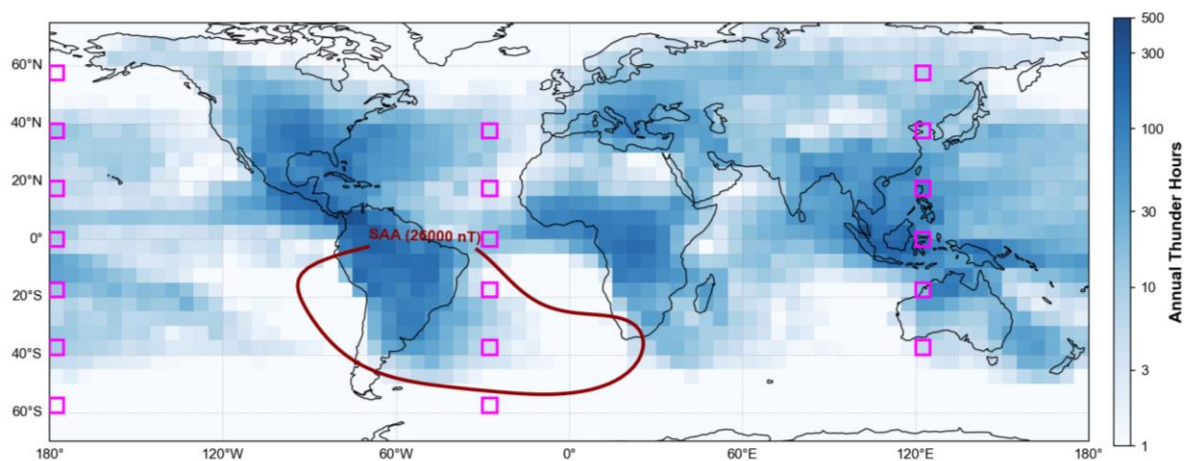


图 1 全球研究区域与实验网格分布示意图，底图为 2019 年全球闪电活动分布，紫色方框为 19 个有效 $5^\circ \times 5^\circ$ 统计网格，深红色曲线为 IGRF-13 模型计算的 26000 nT 等值线（SAA 范围）。

Fig. 1 Global distribution of study regions and experimental grids, with the background showing 2019 lightning climatology, purple boxes indicating the nineteen $5^\circ \times 5^\circ$ statistical grids, and the dark red contour representing the 26000 nT isoline from the IGRF-13 model delineating the South Atlantic Anomaly (SAA).

1.3 VLF 功率谱处理与截止频率识别

为提高截止频率识别的稳定性与一致性，本文参照 Toledo-Redondo, *et al.*¹⁶ 的方法对原始 VLF 功率谱进行统一预处理。DEMETER 1 级 VLF ICE 数据以 $\log(\text{mV}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 形式存储，首先将其线性化；随后在 500-5000 Hz 分析频段内对每条频谱进行归一化处理，以消除不同轨道与空间位置造成的绝对功率差异，增强截止频率处相对能量极小的谱特征。对归一化频谱采用零相位低通滤波器进行平滑处理²⁹。该滤波器为 48 点数字 FIR 滤波器，阻带衰减 60 dB，通带归一化上限频率为 0.075，阻带起始于 0.175，采用前向-后向滤波实现零相位响应。滤波的目的是抑制频谱中的高频噪声，使截止频率处的局部极小值特征更加显著，便于后续自动识别。

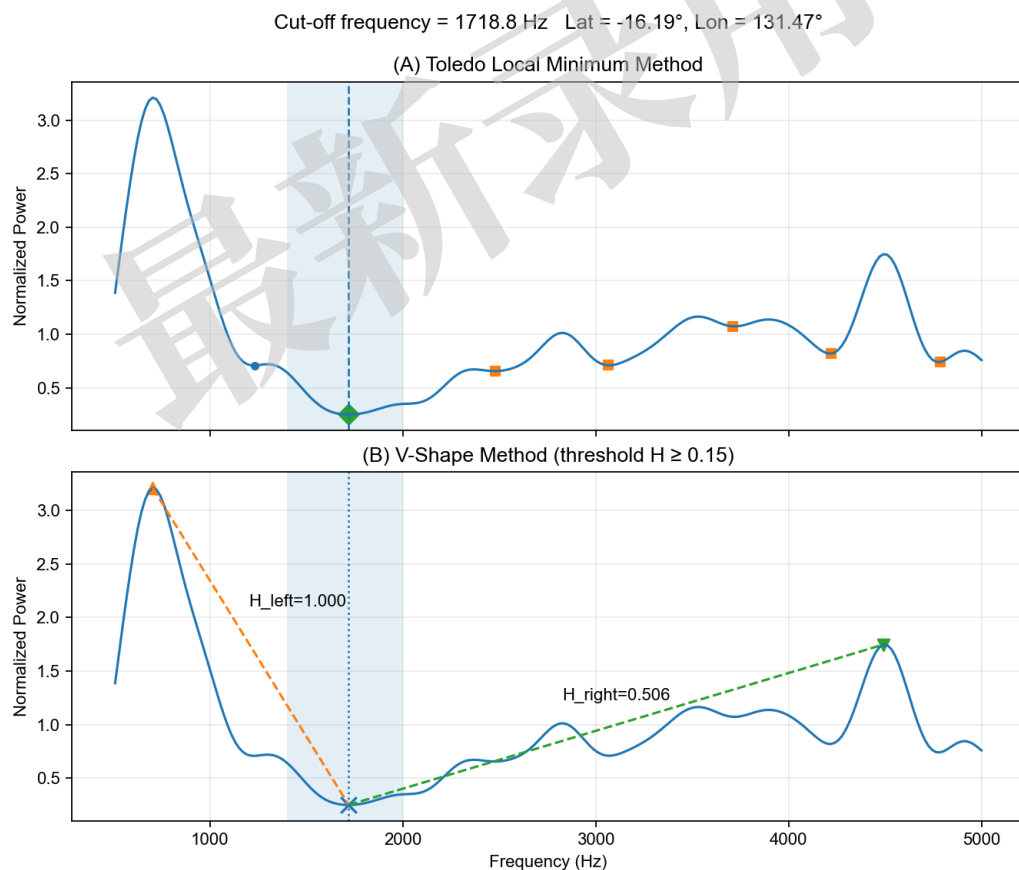


图 2 Toledo 局部极小值法（图 A）与 V 形判据法（图 B）的截止频率自动识别对比示例。

Fig. 2 Comparison of cut-off frequency identification between the Toledo local minimum method (Panel A) and the V-shape criterion method (Panel B).

在此基础上, 本文比较两种截止频率自动识别方法。图 2 给出了两种方法在同一条典型频谱上的对比示例。图 2A 中, 浅蓝色阴影标示 1.4-2.0 kHz 搜索窗口, 橙色方块为自动检测到的局部极小值点, 最终选取的有效极小值对应的截止频率以竖虚线标出。图 2B 展示 V 形判据法的识别过程: 以全谱全局最小值作为“谷底”, 分别在谷底左侧与右侧寻找归一化功率最大值点作为两侧“峰值”, 并将左峰—谷底、谷底—右峰连接形成两段斜率线, 用于刻画截止频率处典型 V 形凹陷的两侧回升结构; 斜率数值标注在对应线段附近, 同时给出左右回升幅度指标 H_{left} 与 H_{right} 。该示例中两种方法得到一致的截止频率, 说明当频谱凹陷形态清晰时, 两类判据可相互验证, 增强识别结果的可靠性。

Toledo 局部极小值法采用 Toledo-Redondo, *et al.*¹⁶ 提出的判定规则: 对平滑后的频谱, 通过将每个采样点的数值与其相邻点比较, 自动识别所有局部极小值 (满足 $P_i < P_{i-1}$ 且 $P_i < P_{i+1}$)。检测到的极小值按频率位置分为两类: 1.4 kHz 以下的极小值直接舍弃, 因为第一截止频率的理论下限约 1.5 kHz, 对应波导高度上限 100 km²⁹。若 1.4-2.0 kHz 区间内存在多个局部极小值, 或首个有效极小值位于该区间之外, 则判定该频谱的截止频率检测无效; 否则, 该极小值对应频率即为截止频率。

V 形判据法是本文基于截止频率处功率谱呈现的典型 V 形凹陷特征而设计的替代筛选方法。该方法在 500-5000 Hz 范围内搜索归一化功率谱的全局最小值点, 若最小值位于频率范围的前 10%或后 10%区域则排除该频谱, 以规避频谱截断及滤波器边缘效应的影响。截止频率需满足 1.4-2.0 kHz 的频率约束, 与 Toledo 方法保持一致。V 形判据的核心是量化极小值两侧的功率回升幅度: 分别计算极小值点左侧归一化功率最大值与极小值之差 H_{left} 、右侧归一化功率最大值与极小值之差 H_{right} , 当且仅当两者均 ≥ 0.15 时判定为有效 V 形特征。该阈值通过对多个测试网格的频谱数据进行经验性调优确定: 阈值过低 (如 0.10) 会引入过多噪声伪极小值, 过高 (如 0.20) 则会排除部分有效的弱 V 形特征, 0.15 在检测率与误检率之间取得较好平衡。

1.4 截止频率统计方法

针对同一空间网格内大量连续观测数据, 本文比较两种统计处理策略。先平均后检测方法首先对网格内所有归一化功率谱进行平均, 再对平均谱进行截止频率识别, 该方法计算效率高, 但无法提供不确定性估计。先检测后平均方法则对每条功率谱独立进行截止频率识别, 并对所有有效结果进行统计平均, 同时可获得截止频率的离散程度³⁰。考虑到 DEMETER 卫星沿轨道进行连续采样, 相邻有效检测结果在时间和空间上可能具有较强的相关性, 本文在“先检测后平均”的框架下进一步引入相关性处理, 对是否合并时间连续的有效检测点进行了比较分析, 以评估时空相关性对统计结果的影响。具体而言, 当相邻有效检测点的记录索引差不超过 1 (即时间间隔 ≤ 2.048 s) 时, 将其归并为同一组, 并以该组的平均截止频率作为一个独立样本参与统计分析, 从而减弱相邻样本间相关性对统计结果的潜在影响。

2 结果

2.1 Toledo 方法与 V 形方法比较

为了定量评估 Toledo 局部极小值法与 V 形判据法在截止频率 (f_1) 自动识别中的稳健性与准确度, 本文对 (西太平洋、大西洋、中太平洋) 共 19 个代表性经纬度网格内的全部功率谱数据进行了算法对比实验。从每个网格中随机抽取 100 条频谱 (共计 1900 条样本) 进行人工判读, 作为对两种算法行为特征的参考。需要说明的是, 人工判读结果主要用于表征算法在不同谱型下的响应特征, 而非作为绝对的物理“真值”。

为了实现不同区域及谱型下检测效果的定量化评估与横向可比性, 本文引入了机器学习领域通用的准确率(Precision, P)、检出率(Recall, R)及 F_1 值作为性能评价指标^{31,32}。算法性能评估基于以下三个基本统计量:

- N_{det} (算法检出总数量): 算法识别出的截止频率 f_1 总数
- N_{valid} (有效样本数): 经人工判读确认存在物理意义的样本总数
- N_{TP} (N_{det} 与 N_{valid} 的交集): 算法识别结果与人工判读一致的正确检出数

基于上述统计量, 三个性能指标定义如下:

- 准确率 $P = N_{\text{TP}}/N_{\text{det}}$, 表示算法检出结果中真正有效的比例, 用于衡量算法的可靠性。准确率越高, 说明算法误检率越低, 检出结果越可信。
- 检出率 $R = N_{\text{TP}}/N_{\text{valid}}$, 表示算法成功识别出的有效样本占全部有效样本的比例, 用于衡量算法对真实物理特征的捕获能力。检出率越高, 说明算法遗漏的有效特征越少。
- F_1 值 $F_1 = 2PR/(P+R)$, 即准确率与检出率的调和平均数, 综合反映算法在准确性与完整性之间的平衡水平。相比算术平均, 调和平均对低值更敏感, 只有当准确率和检出率都较高时, F_1 值才会较高, 因此能更客观地评价算法的综合性能。

表 1 汇总了各网格随机抽取样本 (共计 1900 条) 的人工校验评估结果。从总体性能指标来看, Toledo 方法展现出了极高的检测灵敏度, 其总体检出率达到了 80.44%, 能够捕捉到绝大多数潜在的频率特征, 为研究提供了广泛的候选样本。然而, 由于该算法主要基于局部极小值的搜索逻辑, 其对频谱中的微弱波动较为敏感, 在某些复杂背景环境下容易受到随机噪声的干扰, 导致总体准确率维持在 31.48%左右。相比之下, V 形方法在保持了相近的检测广度 (检出率 81.04%) 的基础上, 通过引入形态学约束, 显著提升了识别结果的可靠性, 其总体准确率优化至 71.99%, 综合性能评价指标 F_1 值也从 0.452 提升至 0.762, 在识别的精度与完整度之间取得了较好的平衡。

深入分析各观测区域的算法行为发现，Toledo 方法在不同纬度带的适应性呈现出一定的波动，特别是在低纬度及赤道等谱型较为复杂的区域，其准确率在 16.44%至 38.81%之间变化，这反映出在信噪比较低时，单纯依赖极小值判据可能面临区分物理特征与背景波动的挑战。而 V 形方法通过设定极小值点两侧的功率回升幅度，有效增强了算法的抗噪性，使其在几乎所有研究区域的 F1 值均优于对比方法。特别是在大西洋及中太平洋区域，V 形方法的准确率普遍稳定在较高水平，且在西太平洋赤道网格等极端环境下，通过更为审慎的识别策略确保了检出结果的高度物理一致性。尽管这种形态约束在极少数样本中可能导致识别门槛的上升，但对于需要高置信度数据的全球尺度统计研究而言，这种对“可靠性”的提升具有重要的科学意义。

表 1 Toledo 局部极小值法与 V 形判据法在截止频率 f_i 自动识别中的性能对比。

Table 1. Performance comparison of the Toledo local minimum method and the V-shape criterion for automatic identification of cutoff frequency f_i .

区域	纬度	Toledo 准确率	Toledo 检出率	Toledo F1	V 形 准确率	V 形 检出率	V 形 F1
西太平洋	高纬-N	49.32%	87.80%	0.632	86.11%	75.61%	0.805
	中纬-N	27.94%	79.17%	0.413	67.86%	79.17%	0.731
	低纬-N	16.44%	75.00%	0.270	84.62%	68.75%	0.759
	赤道	30.30%	86.96%	0.449	100.00%	26.09%	0.414
	低纬-S	20.00%	68.42%	0.310	63.16%	63.16%	0.632
	中纬-S	21.21%	60.87%	0.315	59.38%	82.61%	0.691
大西洋	中纬-N	54.32%	97.78%	0.698	79.17%	84.44%	0.817
	低纬-N	45.24%	90.48%	0.603	78.72%	88.10%	0.831
	赤道	38.81%	81.25%	0.525	72.97%	84.38%	0.783
	低纬-S	37.18%	74.36%	0.496	64.91%	94.87%	0.771
	中纬-S	33.82%	76.67%	0.469	62.22%	93.33%	0.747
	高纬-S	33.96%	75.00%	0.468	80.77%	87.50%	0.840
中太平洋	高纬-N	29.51%	78.26%	0.429	78.26%	78.26%	0.783
	中纬-N	25.40%	76.19%	0.381	60.71%	80.95%	0.694
	低纬-N	22.73%	88.24%	0.361	56.52%	76.47%	0.650
	赤道	32.79%	76.92%	0.460	78.57%	84.62%	0.815
	低纬-S	22.06%	75.00%	0.341	70.37%	95.00%	0.809
	中纬-S	26.47%	69.23%	0.383	78.57%	84.62%	0.815
	高纬-S	17.65%	90.00%	0.295	69.23%	90.00%	0.783
	合计	31.48%	80.44%	0.452	71.99%	81.04%	0.762

为直观展示两种方法在不同谱型条件下的响应特征，图 3 给出了四条具有代表性的功率谱示例。图 3a 所示谱线在 1.4-2.0 kHz 范围内具有清晰、对称的 V 形凹陷结构，左右两侧功率显著回升，信噪比较高。在此类典型谱线中，Toledo 方法与 V 形方法均给出了相同的截止频率结果。图 3b 中谱线整体变化较为平缓，仅存在一个较浅的局部极小值，其功率回升

幅度不足以满足 V 形方法的形态约束，因此 V 形方法未给出检测结果，而 Toledo 方法仍识别出对应的截止频率。该类谱型体现了 Toledo 方法在弱特征条件下较高的灵敏性。

图 3c 所示谱线在 1.4-2.0 kHz 区间内存在多个局部极小值，依据 Toledo 方法的判据，该谱线被整体判定为无效；然而其中一个极小值具有清晰的左右功率回升结构，满足 V 形方法的判定条件，因此被成功识别。该示例表明，在多个极小值共存的情况下，两种方法对有效特征的筛选策略存在差异。图 3d 中谱线整体趋势并不完全呈现标准 V 形，但在分析频段内存在一个显著的深凹结构，左右功率回升明显，因此两种方法均识别出有效截止频率。

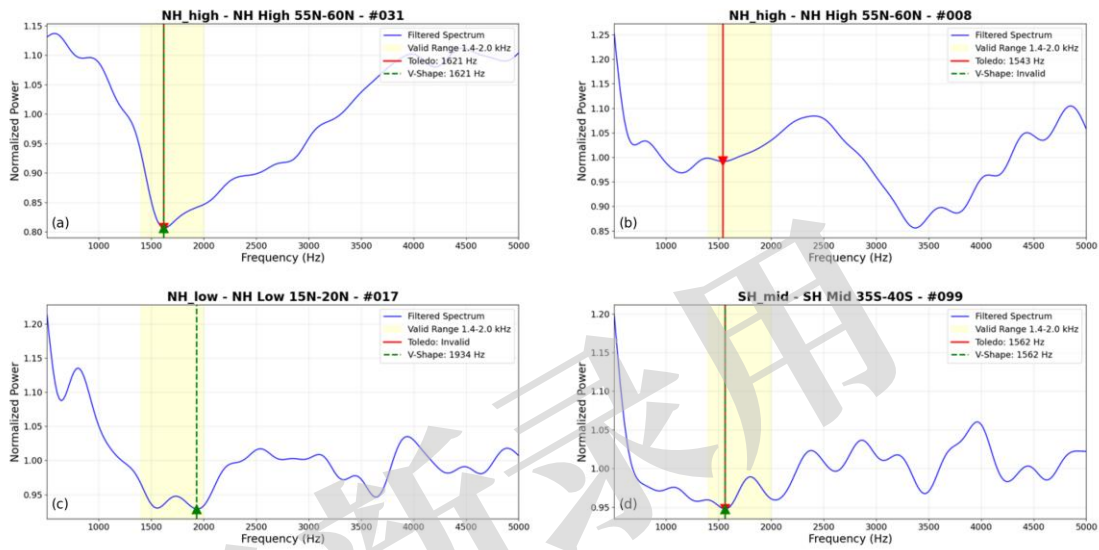


图 3 Toledo 方法与 V 形方法在四种典型 VLF 功率谱形态下的截止频率识别示例：(a)典型 V 形；(b)弱极小值；(c)多重极小值；(d)非标准 V 形。

Fig. 3 Examples of cut-off frequency identification by the Toledo and V-shape methods for four representative VLF spectral types: (a) typical V-shape; (b) weak local minimum; (c) multiple local minima; (d) non-standard V-shape with a prominent minimum.

综上所述，Toledo 方法作为一种灵敏的探测手段，在全面搜寻微弱信号方面具有独特价值，而本文提出的 V 形方法则更侧重于在复杂电离层环境下提取稳健的物理特征。在后续针对南大西洋异常区(SAA)各向异性传播特性以及全球波导演化规律的统计分析中，V 形方法所提供的高准确率结果能够为构建更精确的空间物理模型奠定坚实的数据基础。这种算法上的优化，不仅提高了自动处理大规模卫星数据的效率，也为深入理解地-电离层波导的复杂动态过程提供了更加清晰的观测视角。

2.2 统计处理策略对截止频率估计的影响

截止频率 f_1 的统计估计主要受到两个方面的影响：第一，DEMETER 卫星沿轨道连续采样使得相邻功率谱在时间与空间上具有显著相关性，若将这些相关样本等权计入统计，将改变网格统计量对“独立观测事件”的代表性；第二，截止频率 f_1 的提取属于非线性谱特征识

别过程，在多条功率谱参与统计时，“先提取后统计”与“先统计后提取”的处理顺序可能导致本质不同的物理量。基于上述考虑，本节在统一采用 V 形形态判据法提取 f_1 的前提下，本文对三种统计处理策略进行了对比分析。

前两种策略均在单条功率谱层面先完成截止频率识别，区别仅在于是否处理连续样本的相关性。Detect-then-Average (Det-Avg)表示“先检测、后统计”：对每条功率谱独立判断是否存在有效 V 形凹陷并给出 f_1 ，随后在网格尺度对所有有效 f_1 进行统计。其子策略 No Merge(Det-Avg No Merge)不对有效结果的时空邻近关系做任何处理，所有有效 f_1 直接进入统计；Merge (Det-Avg Merge)则在进入网格统计前，将时间上连续、空间位置相邻的有效检测点合并为一个代表性事件，从而削弱轨道连续采样带来的“重复计权”，再对合并后的事件集合进行统计。

与之不同，第三种策略改变了处理顺序：Average-then-Detect (Avg-Det)表示“先平均、后检测”。在该策略中，先在每个空间网格内对所有功率谱进行平均，得到一条平均功率谱，再仅在该平均谱上应用相同的 V 形判据以给出截止频率估计。需要强调的是，Avg-Det 提取的是“平均谱线中的极小结构位置”，而非“单次观测事件的 f_1 集合”的统计量，因此其物理含义与 Det-Avg 并不等价。

表 2 Det-Avg No Merge、Det-Avg Merge 与 Avg-Det 三种统计策略的截止频率 f_1 估计结果对比。

Table 2. Comparison of cutoff frequency f_1 estimates among three statistical strategies: Det-Avg No Merge, Det-Avg Merge, and Avg-Det.

区域	纬度	Det-Avg No Merge f_1 均值 (Hz)	Det-Avg No Merge f_1 标准差(Hz)	Det-Avg Merge f_1 均值(Hz)	Det-Avg Merge f_1 标准差(Hz)	Avg-Det f_1 值(Hz)	Det-Avg Merge 减 Det-Avg No Merge f_1 的差值(Hz)
西太平洋	高纬-N	1620.6	120.5	1630.2	115.9	NaN	9.6
	中纬-N	1601.8	129.7	1602.5	117.3	1543	0.7
	低纬-N	1647.7	145.2	1643.3	137.4	NaN	-4.4
	赤道	1643.1	146.1	1648.5	141.1	NaN	5.4
	低纬-S	1606.9	130.1	1612.8	128.1	1543	5.8
	中纬-S	1598.9	128.2	1604	119.2	1582	5.1
大西洋	中纬-N	1643.8	126	1655.3	119.5	1660.2	11.5
	低纬-N	1697.6	134.7	1706.7	122.1	1718.8	9.1
	赤道	1710.3	137.2	1720.8	123.6	1738.3	10.5
	低纬-S	1638.4	116.1	1645.7	104.6	1640.6	7.3
	中纬-S	1635.5	133.1	1640	123.1	1621.1	4.5
	高纬-S	1658.3	147	1667	141.6	NaN	8.6
中太平洋	高纬-N	1616.7	137.1	1630.4	132.5	NaN	13.7
	中纬-N	1614.2	132.6	1616.5	128	1601.6	2.3
	低纬-N	1643.7	139.2	1649.5	128.7	1621.1	5.8

赤道	1679.2	151.5	1689.5	139.4	1660.2	10.4
低纬-S	1633	138.8	1644.7	132.9	1621.1	11.8
中纬-S	1600.1	125.3	1611.8	124.4	NaN	11.7
高纬-S	1727.6	165.9	1746.9	153.5	NaN	19.3

表 2 对比展示了 19 个代表性纬度网格中三种统计策略得到的截止频率估计结果。从截止频率估计值来看，Det-Avg Merge 策略得到的 f_i 均值普遍高于 Det-Avg NoMerge 策略，差值约为 0.7-19.3 Hz，表明合并操作对截止频率均值的影响整体有限。然而，在西太平洋低纬北半球网格中，Det-Avg Merge 反而比 Det-Avg No Merge 低约 4.4 Hz，说明合并操作的影响具有区域依赖性，并非在所有区域都单向抬高 f_i 估计值。这一局部反向差异可能与该区域的电磁环境扰动有关。低纬、尤其是赤道附近是全球闪电活动最活跃的纬度带，频繁而强烈的闪电辐射显著增强了 VLF 波场的非平稳性。在此背景下，地-电离层波导的传播条件快速变化，截止频率在时间上呈现更大的波动。此时，连续检测到的 f_i 值并不集中于某个频率区间，合并操作在减少重复计权的同时，可能改变了不同频率子样本的权重分配，导致合并后均值略有下降。

上述推断也得到了 Avg-Det 结果的间接支持。表 2 显示，在上述扰动较强的低纬（西太平洋赤道、低纬）及其相邻区域中，Avg-Det 方法未能识别出满足 V 形判据的有效截止频率，表现为结果缺失(NaN)。这表明在这些区域内，截止频率特征在时间上的不稳定性已强到足以使频域平均后的功率谱难以保留清晰、稳定的 V 形凹陷结构，从而导致基于平均谱的识别方法失效，进一步说明截止频率在该类区域更容易受到瞬态扰动和传播条件变化的影响。

从整体统计结果来看，连续点合并对截止频率均值的影响量级明显小于不同统计顺序（Det-Avg 与 Avg-Det）之间所表现出的系统性差异，其主要作用在于调整连续观测样本的统计权重并削弱样本间的相关性，而非引入方向性的系统偏移。相比之下，Avg-Det 方法在多个扰动较强或自然变异性较大的区域中直接失效，且在可检测区域中给出的 f_1 整体偏低，表明统计顺序对截止频率估计结果具有更为根本的影响。基于上述分析，本文在后续研究中采用 Det-Avg Merge 作为主要统计策略，以在尽可能保留截止频率真实变异特征的同时，降低连续采样及强扰动环境对统计结果的影响。

3 讨论

基于 V 形判据法并采用 Det-Avg Merge 统计策略，本文计算得到了 2006-2009 年 DEMETER 夜间 ICE-VLF 数据对应的 VLF 等效反射高度全球分布。反射高度由截止频率通过公式 $h=c/2f_1$ 计算得到。图 4 展示了全年平均分布以及北半球夏季（5-9 月）和北半球冬季（11-3 月）的反射高度空间分布特征，用于展现全年平均状态及季节变化规律。

从全年平均分布（图 4a）来看，VLF 反射高度在全球尺度上呈现出显著的空间非均匀性。总体而言，海洋区域的反射高度普遍低于陆地区域，多数大洋区域集中在约 85-95 km，而非洲、亚洲和南美洲等大陆区域的反射高度则普遍高于 90 km。这种海陆差异的物理机制尚不完全清楚。反射高度主要由 D 区电子密度控制，但地表电导率差异（海水约 4 S/m，陆地 <0.01 S/m）会影响地-电离层波导中的模式结构和传播特性^{33,34}。需要指出的是，本研究基于截止频率提取的“等效反射高度”是一个综合参数，反映了波导整体的电磁特性而非单一物理高度。海洋表面的高电导率使其接近理想导体边界，这可能使波导模式结构与陆地上空有所不同，进而影响截止频率及由此推算的等效反射高度。海陆之间观测到的系统性差异表明不同地表条件下地-电离层波导的电磁特性存在可观测的区别，但其确切的物理成因及各因素的相对贡献仍需结合电离层模型和波导传播模拟进一步研究。

最新录用

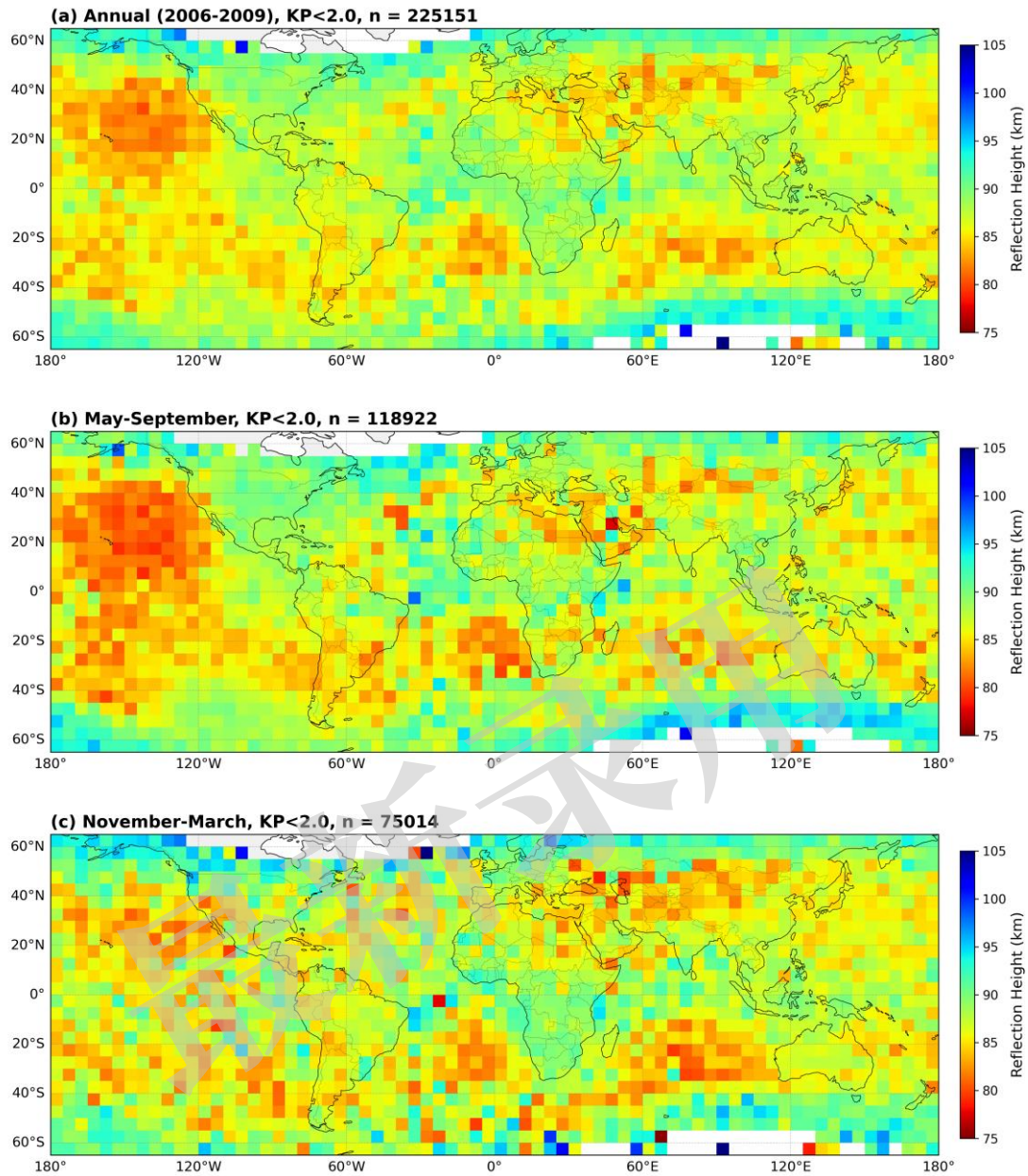


图 4 基于 V 形判据法与 Det-Avg Merge 策略由 DEMETER 卫星 2006-2009 年夜间 VLF 数据反演的等效反射高度全球分布：(a)全年平均；(b)北半球暖季（5-9 月）；(c)北半球冷季（11-3 月）。

Fig. 4 Global distribution of VLF effective reflection height derived from DEMETER nighttime observations (2006-2009) using the V-shape criterion and Det-Avg Merge strategy: (a) annual mean; (b) Northern Hemisphere warm season (May-September); (c) Northern Hemisphere cold season (November-March).

值得注意的是，北美西部及北太平洋东部的部分中纬度区域（约 30°N - 50°N , 120°W - 160°W ）表现出与典型季节变化相反的模式。在北半球夏季（图 4b），该区域反射高度反而相对升高，部分网格达到 95-100 km；而在北半球冬季（图 4c），等效反射高度相对降低至

85-92 km。这种反常的季节性变化可能与该区域夏季强烈的对流性雷暴活动密切相关²⁸。这一现象可以用闪电对 D 区电子密度的特殊调制机制来解释。Shao, *et al.*³⁵ 的研究表明, 强闪电放电产生的准静电场能够驱动 D 区氧原子吸附自由电子, 形成长寿命的负离子 O^- , 从而降低局地电子密度。北美西部在夏季是北半球中纬度地区雷暴活动最活跃的区域之一, 特别是在下午至傍晚时段, 对流性雷暴频繁爆发。DEMETER 卫星的夜间观测时段 (地方时约 22:30) 恰好处于雷暴活动的衰减期或刚结束后不久, 此时闪电诱导的电子吸附效应可能仍在持续影响 D 区电子密度分布。

电子密度的降低直接导致 VLF 波等效反射高度上升。因此, 在该区域的夏季, 虽然太阳辐照增强会通过光化学电离提高电子密度、降低反射高度, 但强闪电活动通过电子吸附机制产生的反向效应可能部分抵消甚至超过太阳辐照的作用, 最终表现为夏季反射高度的相对升高。这种闪电诱导的电子密度调制效应在雷暴活跃区域可能被显著放大, 从而形成与常规季节变化相反的局地特征。需要指出的是, DEMETER 卫星的观测时段相对固定 (地方时约 22:30), 可能恰好捕捉到了雷暴活动后闪电效应的残余影响。这种时间上的"采样效应"可能放大了闪电对观测结果的贡献, 使得该区域的季节性异常特征更加显著。

在高纬地区, 尽管极光带相关的 VLF 噪声 (如 auroral hiss 和 chorus) 仍会对截止频率识别造成干扰³⁶, 图 4 中仍可看到部分网格存在缺测或不连续现象, 但总体而言, 本文方法在较大范围内获得了有效的反射高度估计, 使高纬区域的空间覆盖率得到明显改善。相较于基于平均功率谱的方法, V 形判据结合 Det-Avg Merge 统计策略在高噪声背景下对物理有效极小值结构具有更强的保留能力, 从而提高了高纬区域可用数据的比例。

总体来看, 本文获得的 VLF 等效反射高度空间分布在全球尺度结构、低纬稳定特征以及中高纬季节变化方面表现出清晰而一致的空间形态, 能够可靠刻画低电离层 D 区的主要空间与季节特征。较高的有效样本数量和连续的空间覆盖也为后续分析反射高度的区域差异及其物理成因提供了稳健的数据基础。

4 总结

本文基于 DEMETER 卫星 2006-2009 年夜间 VLF 电场功率谱数据, 系统比较了地-电离层波导截止频率提取过程中的关键方法选择, 主要结论如下:

(1) 截止频率识别方法比较: 基于 19 个代表性网格共 1900 条样本的对比分析表明, V 形判据法通过引入极小值两侧功率回升幅度 (H_{left} 和 H_{right} 均 ≥ 0.15) 的形态学约束, 在保持高检测覆盖度 (检出率 81.04%) 的同时, 显著提升了识别结果的可靠性 (准确率 71.99%, F1 值 0.762)。该方法有效抑制了噪声和弱极小值导致的伪检测, 在保证物理可解释性方面具有明显优势。

(2) 统计处理策略比较: Det-Avg (先检测后统计) 与 Avg-Det (先平均后检测) 两种策略产生本质不同的物理量。Avg-Det 方法在多个低纬及高变异性区域完全失效, 在可检测区域给出的截止频率值也整体偏低。相比之下, Det-Avg 策略保留了截止频率的自然变异性信息, 能够体现不同观测时刻的物理过程差异, 统计意义更为明确。

(3) 连续点合并策略的影响: 在 Det-Avg 框架下, Merge 策略 (合并时间连续检测点) 与 NoMerge 策略的截止频率均值差异为 0.7-19.3 Hz, 影响量级有限。合并操作的主要作用是削弱轨道连续采样引入的样本相关性, 使统计结果更接近独立观测事件的物理平均。

综上所述, 对于 VLF 截止频率的气候学统计研究, 本文推荐采用 V 形判据法结合 Det-Avg Merge 统计策略。该方法组合在保证检测结果物理可靠性和检测完整性的同时, 有效处理了样本时空相关性问题, 能够提供具有明确统计意义的截止频率估计, 为理解低电离层 D 区的空间结构、季节变化及其物理控制机制提供了可靠的观测约束。

参考文献

- [1] FRIEDRICH M, POCK C, TORKAR K. FIRM-2018, an updated empirical model of the lower ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(8): 6737-6751. DOI: 10.1029/2018JA025437
- [2] XU W, MARSHALL R A. Characteristics of energetic electron precipitation estimated from simulated bremsstrahlung X-ray distributions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(4): 2831-2843. DOI: 10.1029/2018JA026273
- [3] LIAO L, ZHAO S F, LI Q C, *et al.* CSES satellite observation of nightside bremsstrahlung X-ray distributions induced by energetic electron precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(4): e2024JA033700. DOI: 10.1029/2024JA033700
- [4] YANG Muping, HUANG Jianping, ZHANG Xuemin, *et al.* Analysis on dynamic background field of ionosphere ELF/VLF electric field in Northeast Asia[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, **33**(6): 2285-2294 (杨牧萍, 黄建平, 张学民, 等. 东北亚地区电离层 ELF/VLF 电场的动态背景场研究[J]. *地球物理学进展*, 2018, **33**(6): 2285-2294)
- [5] THOMSON N R, CLILVERD M A, RODGER C J. Ionospheric D region: characteristics near dawn and dusk[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(4): e2024JA033610. DOI: 10.1029/2024JA033610
- [6] CUMMER S A, INAN U S, BELL T F. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics[J]. *Radio Science*, 1998, **33**(6): 1781-1792. DOI: 10.1029/98RS02381
- [7] THOMSON N R, CLILVERD M A, MCRAE W M. Nighttime ionospheric D region parameters from VLF phase and amplitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A7): A07304. DOI: 10.1029/2007JA012271
- [8] THOMSON N R, CLILVERD M A, RODGER C J. Ionospheric D region: VLF-measured electron densities compared with rocket-based FIRM-2018 model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(11): e2022JA030977. DOI: 10.1029/2022JA030977
- [9] WANG Y P, LU G P, CHENG Z W, *et al.* Virtual reflection height of nighttime equatorial ionosphere estimated with low-frequency magnetic sferics measured in malacca[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, **129**(18): e2023JD040099. DOI: 10.1029/2023JD040099
- [10] RICHARDSON D K, COHEN M B. Seasonal variation of the D-region ionosphere: very low frequency (VLF) and machine learning models[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(9): e2021JA029689. DOI: 10.1029/2021JA029689
- [11] ZHAO S F, LIAO L, SHEN X H, *et al.* Solar cycle variation of radiated electric field and ionospheric reflection height over NWC transmitter during 2005-2009: DEMETER spacecraft observations and simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(3): e2023JA032282. DOI: 10.1029/2023JA032282
- [12] KUMAR S, KISHORE A, RAMACHANDRAN V. Higher harmonic tweek sferics observed at low latitude: estimation of VLF reflection heights and tweek propagation distance[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(6): 1451-1459. DOI: 10.5194/angeo-26-1451-2008
- [13] BLAKE J B, LOOPER M D, BAKER D N, *et al.* New high temporal and spatial resolution measurements by SAMPEX of the

precipitation of relativistic electrons[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **18**(8): 171-186. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00969-8

- [14] CHENG W, XU W, GU X D, *et al.* A comparative study of VLF transmitter signal measurements and simulations during two solar eclipse events[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(12): 3025
- [15] GROSS N C, COHEN M B. VLF remote sensing of the *D* region ionosphere using neural networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(1): e2019JA027135. DOI: 10.1029/2019JA027135
- [16] TOLEDO-REDONDO S, PARROT M, SALINAS A. Variation of the first cut-off frequency of the Earth-ionosphere waveguide observed by DEMETER[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A4): A04321. DOI: 10.1029/2011JA017400
- [17] DONG X, ZHAO S F, LIAO L, *et al.* Quantitative analysis of nighttime effects of radiation belt energetic electron precipitation on the *D*-region ionosphere during lower solar activity periods[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2025, **25**(16): 9183-9198. DOI: 10.5194/acp-25-9183-2025
- [18] NĚMEC F, SANTOLÍK O, PARROT M. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A4): A04303. DOI: 10.1029/2008JA013972
- [19] PIŠA D, NĚMEC F, SANTOLÍK O, *et al.* Additional attenuation of natural VLF electromagnetic waves observed by the DEMETER spacecraft resulting from preseismic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(8): 5286-5295. DOI: 10.1002/jgra.50469
- [20] CUSSAC T, CLAIR M A, ULTRÉ-GUERARD P, *et al.* The Demeter microsatellite and ground segment[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 413-427. DOI: 10.1016/j.pss.2005.10.013
- [21] LAGOUTTE D, BROCHOT J Y, DE CARVALHO D, *et al.* The DEMETER science mission centre[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 428-440. DOI: 10.1016/j.pss.2005.10.014
- [22] GRENINGER P T, COLMAN J J. The seasonality of VLF attenuation through the ionosphere verified by DEMETER satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2020JA028383. DOI: 10.1029/2020JA028383
- [23] PARROT M, BENOIST D, BERTHELIER J J, *et al.* The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 441-455. DOI: 10.1016/j.pss.2005.10.015
- [24] YAN R, PARROT M, PINÇON J L. Statistical study on variations of the ionospheric ion density observed by DEMETER and related to seismic activities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(12): 12421-12429. DOI: 10.1002/2017JA024623
- [25] BERTHELIER J J, GODEFROY M, LEBLANC F, *et al.* ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 456-471. DOI: 10.1016/j.pss.2005.10.016
- [26] KUMAR A, KUMAR S. Solar flare effects on *D*-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 29. DOI: 10.1186/s40623-018-0794-8
- [27] ALKEN P, THÉBAULT E, BEGGAN C D, *et al.* Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1): 48. DOI: 10.1186/s40623-020-01281-4
- [28] CECIL D J, BUECHLER D E, LANG T J, *et al.* Lightning climatology datasets from TRMM LIS, ISS LIS, and OTD[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2026, **65**(1): 51-72. DOI: 10.1175/JAMC-D-25-0110.1
- [29] CHAND A E, KUMAR S. VLF modal interference distance and nighttime *D* region VLF reflection height for west-east and east-west propagation paths to Fiji[J]. *Radio Science*, 2017, **52**(8): 1004-1015. DOI: 10.1002/2016RS006221
- [30] MCCORMICK J C, COHEN M B. A new four-parameter *D*-region ionospheric model: inferences from lightning-emitted VLF signals[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): e2021JA029849. DOI: 10.1029/2021JA029849
- [31] POWERS D M W, AILAB. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation[J]. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, **2**(1): 2229-3981. DOI: 10.9735/2229-3981
- [32] SOKOLOVA M, LAPALME G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks[J]. *Information Processing & Management*, 2009, **45**(4): 427-437. DOI: 10.1016/j.ipm.2009.03.002
- [33] SAID R K, COHEN M B, INAN U S. Highly intense lightning over the oceans: estimated peak currents from global GLD360 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(13): 6905-6915. DOI: 10.1002/jgrd.50508

- [34] WAIT J R. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, F, 1964 [C].
- [35] SHAO X M, LAY E H, JACOBSON A R. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(1): 29-33. DOI: 10.1038/ngeo1668
- [36] GURNETT D A. A satellite study of VLF hiss[J]. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 1966, 71(23): 5599-5615. DOI: 10.1029/JZ071i023p05599

作者简介



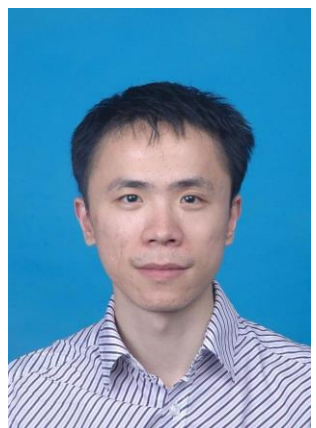
董轩 男, 1998 年出生, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生。主要研究方向为辐射带高能电子沉降对低电离层的影响及其响应机制。

E-mail: dongxuan21@mailsucas.ac.cn



赵庶凡 (通信作者) 女, 1985 年出生, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电磁波跨圈层传播计算及其在圈层耦合研究中的应用。

E-mail: zhaoshufan@nssc.ac.cn



廖力 (通信作者) 男, 1983 年出生, 现为中国地震局地球物理研究所副研究员, 主要研究方向为电波传播和地震电离层电磁异常。

E-mail: liaoli@cea-igp.ac.cn