



ZH-1卫星观测的VLF人工源信号 特征分析与全波模拟

赵庶凡¹ 申旭辉² 廖力³ 张学民¹ 欧阳新艳¹

1. 中国地震局地震预测研究所
2. 中国地震局地壳应力研究所
3. 中国地震局地球物理研究所

2018.9.26 北京•十三陵

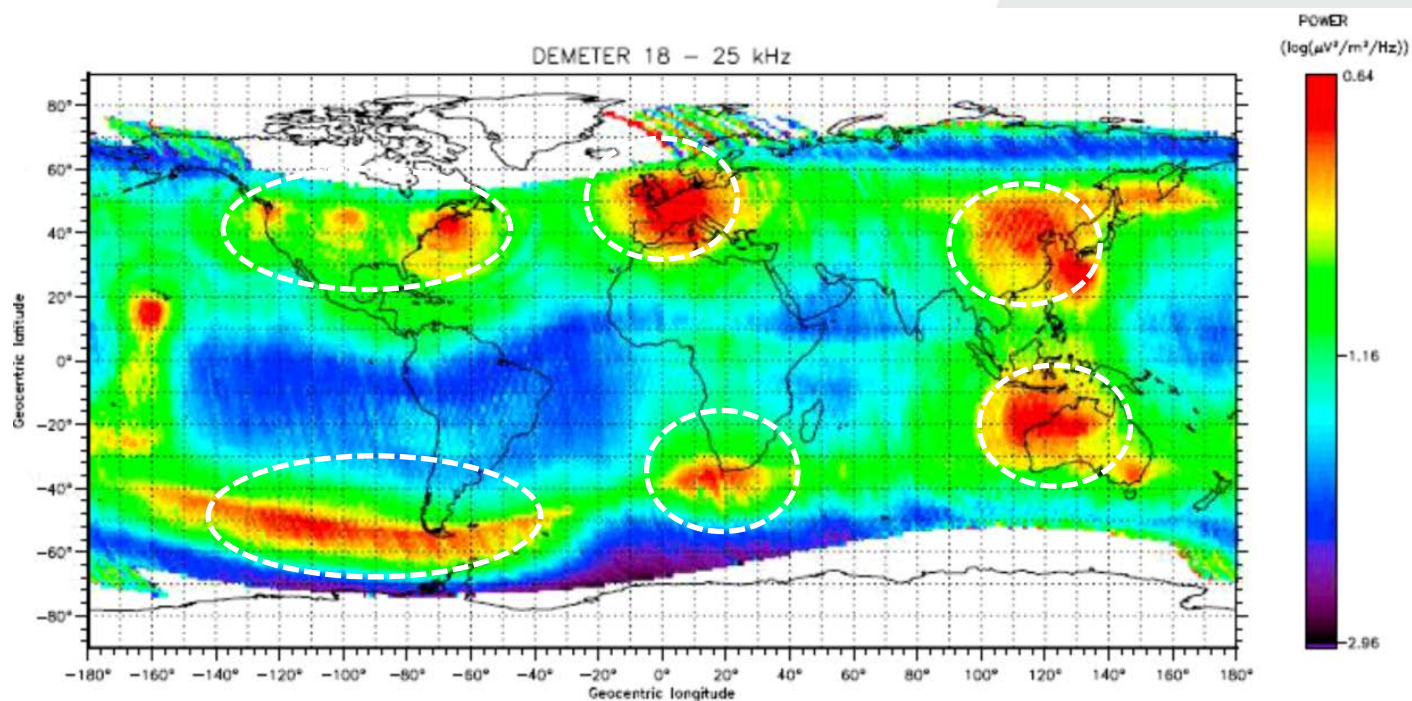


一、研究背景

- 中国地震电磁试验卫星(ZH-1)已于2018年2月成功发射，目前正在开展卫星数据在轨测试，需要对数据质量进行评价。
- 电离层电场缺少定量的理论和经验模型，而且无法进行地面遥感探测。如何进行数据质量检验？

一、研究背景

➤ 全球分布的VLF（Very Low Frequency, 3-30kHz）人工发射源持续辐射大功率的电磁信号，信号可以穿透电离层，在其上空和共轭区很大范围内激发较为稳定的电磁场。



二、研究内容



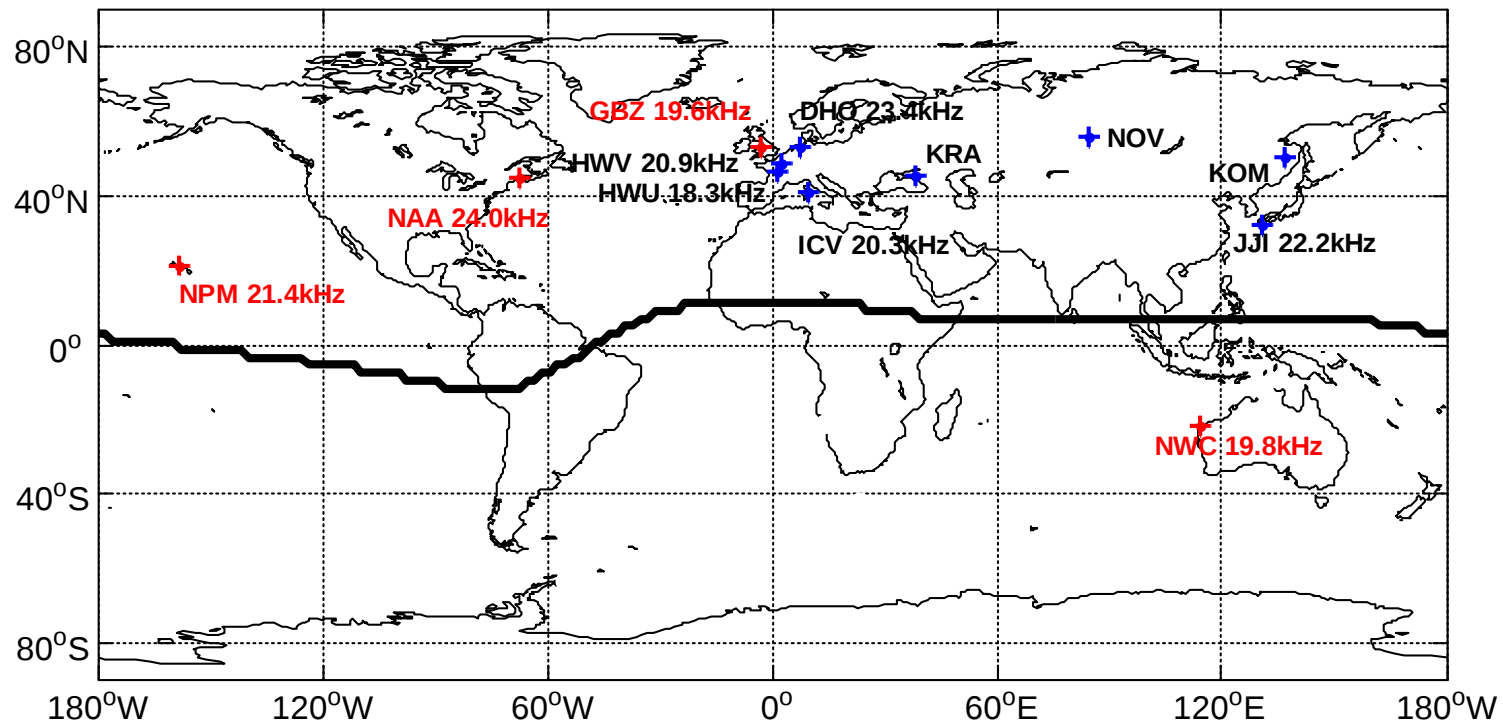
INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

1. 对比ZH-1卫星和DEMETER卫星记录的电离层中VLF人工源信号分布特征（有没有）
2. ZH-1卫星和DEMETER卫星重访轨道观测数据统计分析（数据稳定性）
3. 建立地面VLF电磁辐射向电离层传播的计算模型，计算结果与ZH-1卫星观测结果对比

2.1 卫星观测结果特征分析

全球VLF人工源分布

Location of the Terrestrial VLF Transmitters





2.1 卫星观测结果特征分析

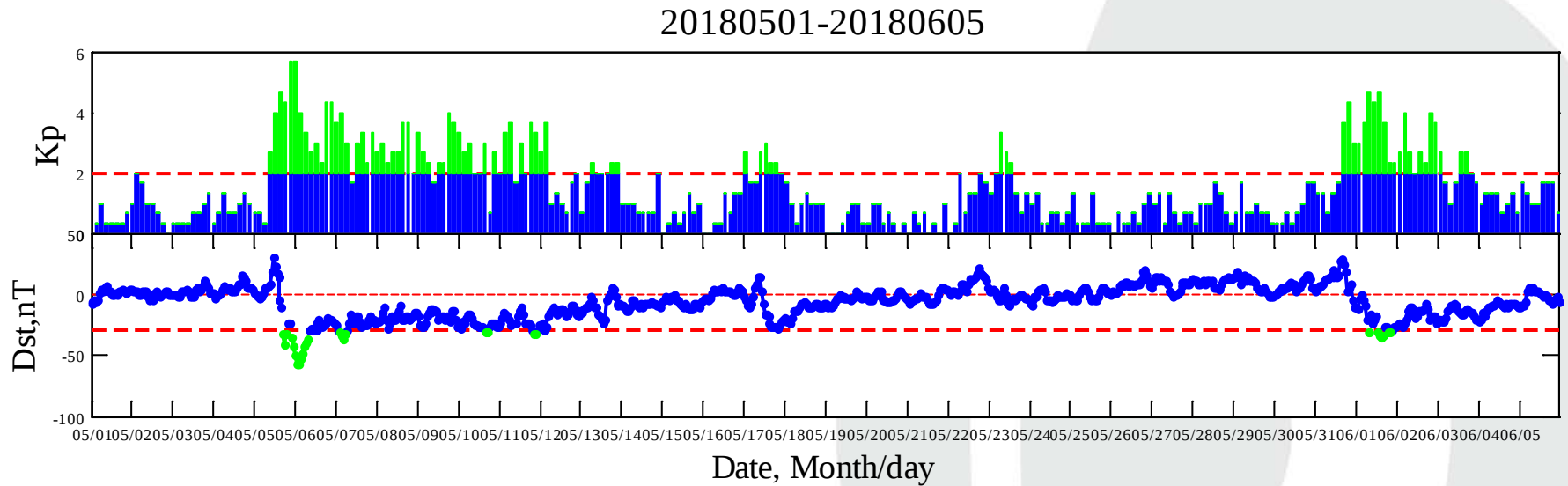
ZH-1于2018年2月2日发射，与DEMETER卫星相同采用准太阳同步圆形高倾角轨道。

	卫星高度	过顶地方时	载荷名称	频段名称	功率谱分辨率	时间分辨率
ZH-1	507km	14:30	EFD	VLF	19.53Hz	2s
DEMETER	710/660km	22:30	ICD	1132	24.4Hz	2s

选取2018年5月6日到2018年6月6日的卫星VLF谱数据，提取以发射源频率为中心 $\pm 200\text{Hz}$ 的频谱求其RMS电场值。

2.1 卫星观测结果特征分析

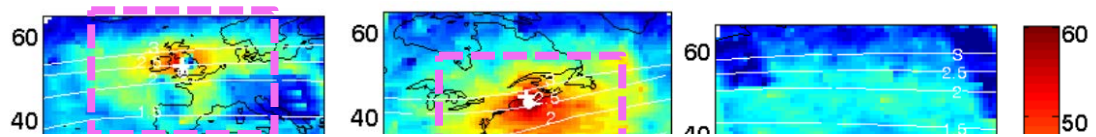
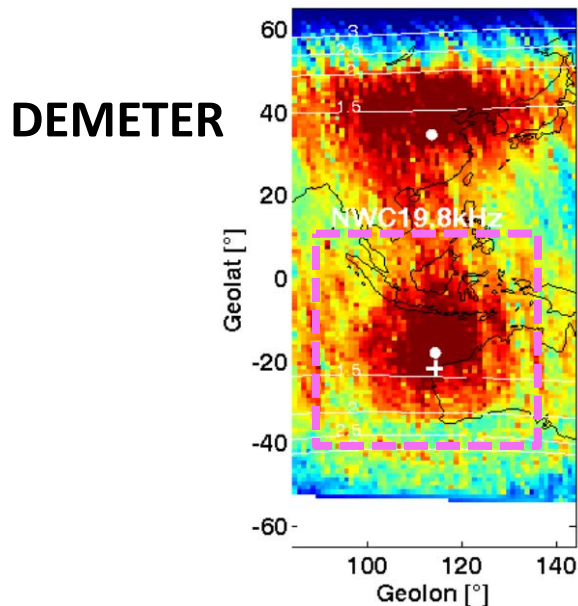
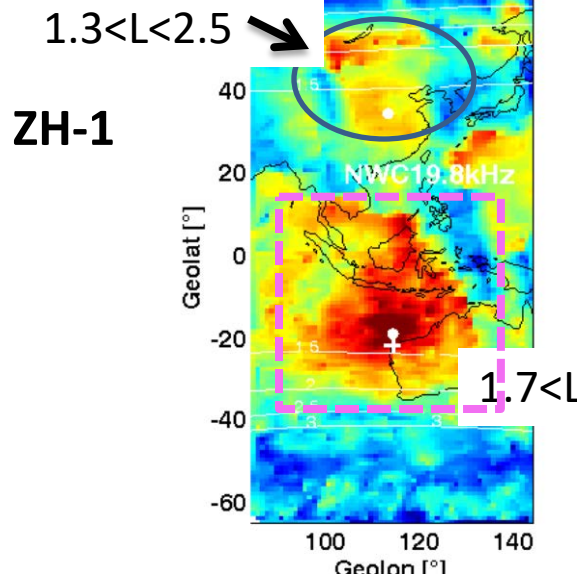
2018年5月6日到2018年6月6日的空间天气指数



剔除地磁活动强烈 ($K_p > 2$) 时间段的数据

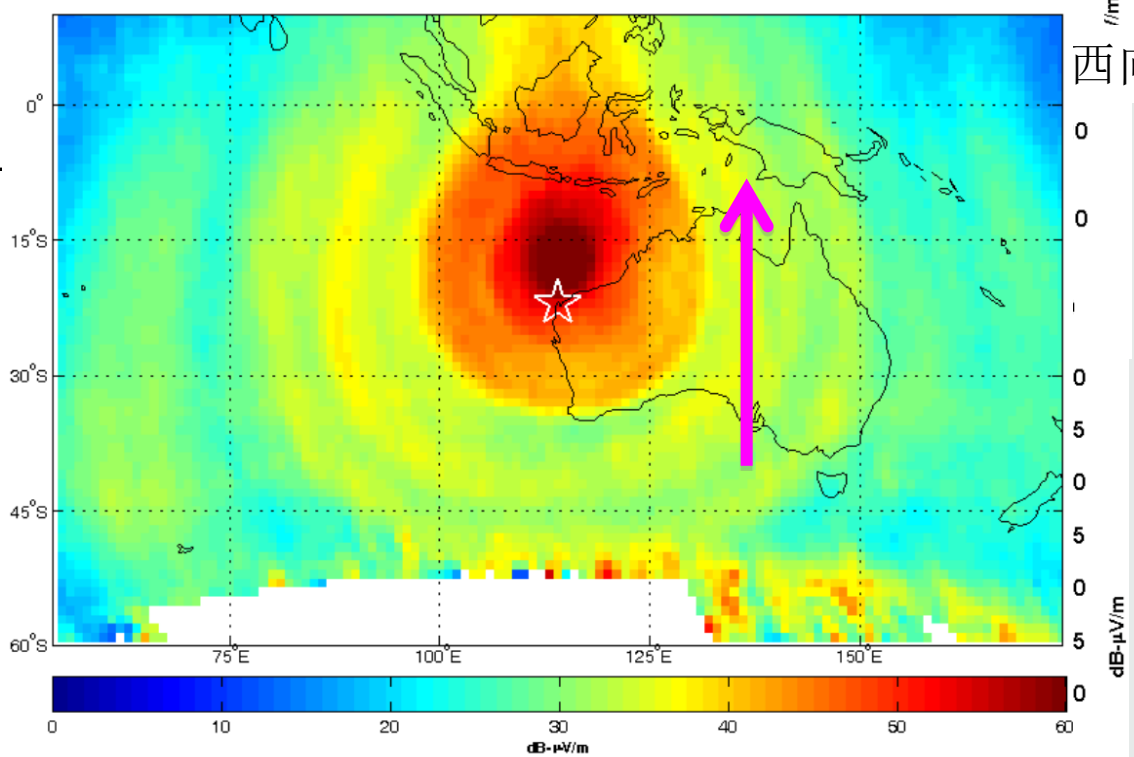
2.1 卫星观测结果特征分析

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

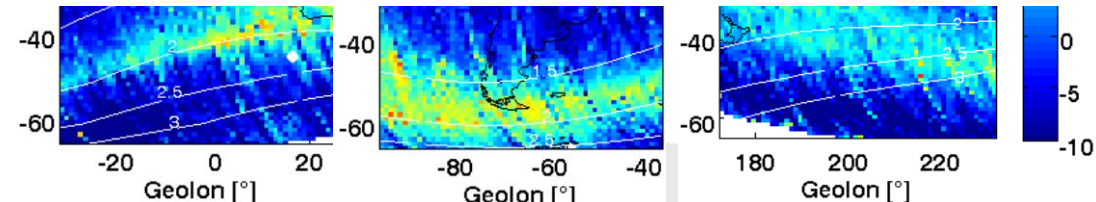


Electric field excited by NWC

Product type: 1132 Date Range: 2006-01-01 00:00:00
 Freq.Range: 19.8kHz±150Hz 2010-01-01 00:00:00
 Display mode: Avg Kp Index: 00-8+ Long. Grid: 1
 Up/Down: up AE Index: 0-999 Lat. Grid: 1



西向偏移



二、研究内容



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

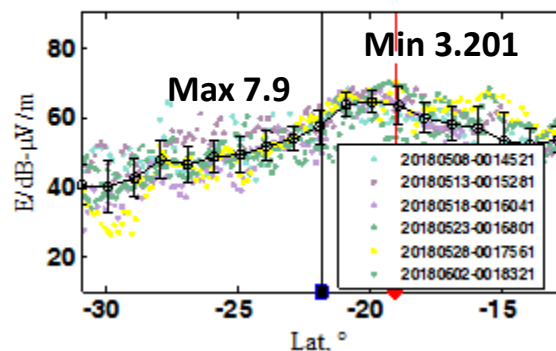
1. 对比ZH-1卫星和DEMETER卫星记录的电离层中VLF人工源信号分布特征（有没有）
2. ZH-1卫星和DEMETER卫星重访轨道观测数据统计分析（数据稳定性）
3. 建立地面VLF电磁辐射向电离层传播的计算模型，计算结果与ZH-1卫星观测结果对比

2.2 重访轨道统计分析

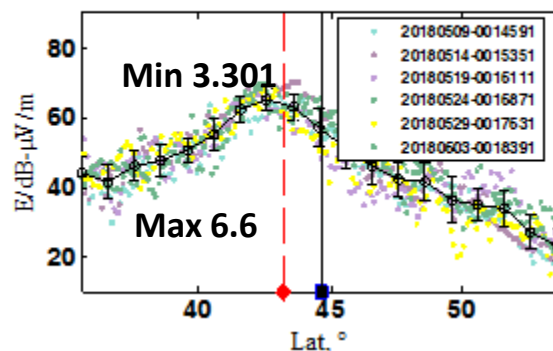


INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

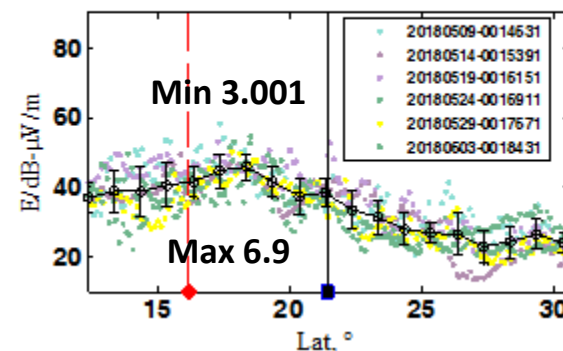
CSES electric field excited by NWC
19.8kHz±200Hz up/Night



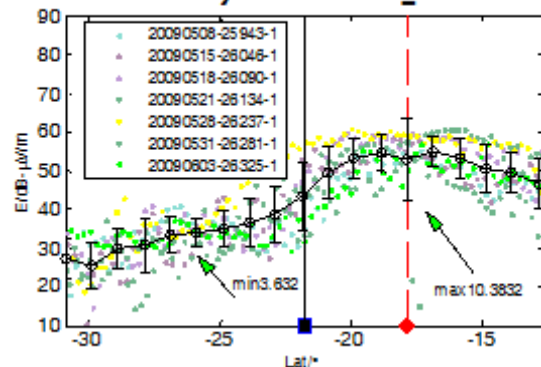
CSES electric field excited by NAA
24.0kHz±200Hz up/Night



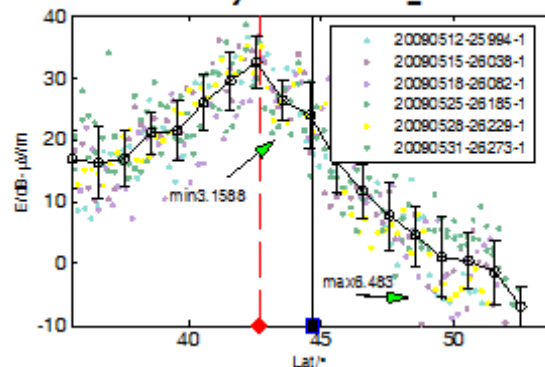
CSES electric field excited by NPM
21.4kHz±200Hz up/Night



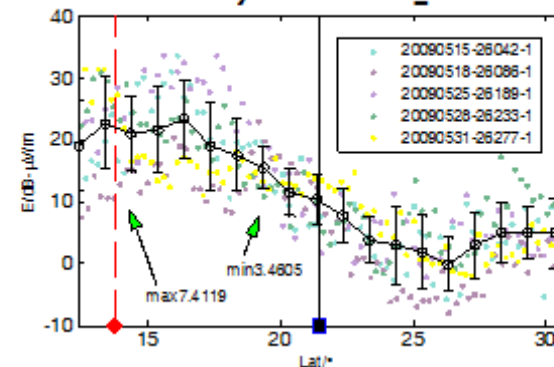
DEMETER Electric field up/Night
excited by NWC19.8kHz±200Hz



DEMETER Electric field up/Night
excited by NAA24.0kHz±200Hz



DEMETER Electric field up/Night
excited by NPM21.4kHz±200Hz



二、研究内容

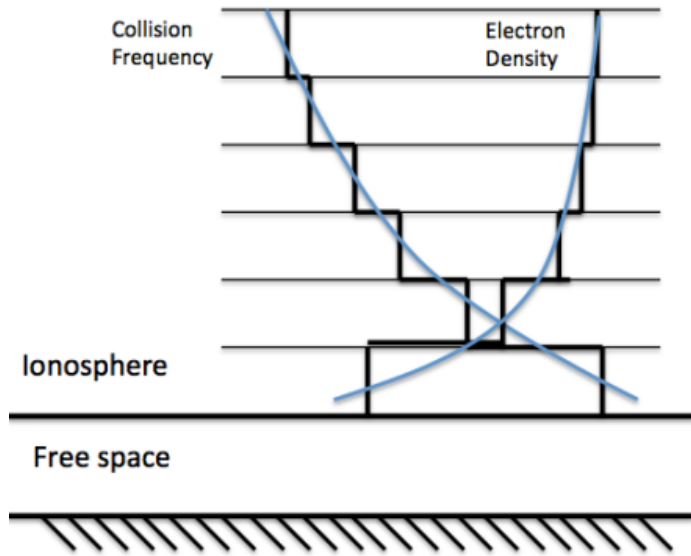


INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

1. 对比ZH-1卫星和DEMETER卫星记录的电离层中VLF人工源信号分布特征（有没有）
2. ZH-1卫星和DEMETER卫星重访轨道观测数据统计分析（数据稳定性）
3. 建立地面VLF电磁辐射向电离层传播的计算模型，计算结果与ZH-1卫星观测结果对比

3.1 全波有限元方法 —— 物理模型

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}_i = i\omega\mu_0\mathbf{H}_i \\ \nabla \times \mathbf{H}_i = -i\omega\epsilon_i\mathbf{E}_i \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{平面分层} \\ \text{碰撞频率} \\ \text{地磁场影响} \end{array}$$

$$\epsilon_i = \epsilon_0 \bar{\epsilon}_{ri} = \epsilon_0 (\bar{I} + \bar{M}_i)$$

$$\mathbf{M} = \sum \mathbf{M}_\alpha = \sum -\frac{X_\alpha}{U_\alpha (U_\alpha^2 - y_\alpha^2)}$$

(Yeh and Liu, 1972)

$$\begin{bmatrix} U_\alpha^2 - l_\alpha^2 y_\alpha^2 & -in_\alpha y_\alpha U_\alpha - l_\alpha m_\alpha y_\alpha^2 & im_\alpha y_\alpha U_\alpha - l_\alpha n_\alpha y_\alpha^2 \\ in_\alpha y_\alpha U_\alpha - l_\alpha m_\alpha y_\alpha^2 & U^2 - m_\alpha^2 y_\alpha^2 & -il_\alpha y_\alpha U_\alpha - m_\alpha n_\alpha y_\alpha^2 \\ -im_\alpha y_\alpha U_\alpha - l_\alpha n_\alpha y_\alpha^2 & il_\alpha y_\alpha U_\alpha - m_\alpha n_\alpha y_\alpha^2 & U^2 - n_\alpha^2 y_\alpha^2 \end{bmatrix}$$

电极化率矩阵由电离层电子密度碰撞频率和地磁场参数决定，这些参数是重要的计算参数。

3.1 全波有限元方法 —— 控制方程

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}_i = i\omega\mu_0\mathbf{H}_i \\ \nabla \times \mathbf{H}_i = -i\omega\varepsilon_i\mathbf{E}_i \end{cases}$$

引入
傅里叶变换



空间域

变波数域

$$\begin{aligned} ik_y \bar{E}_z - d \bar{E}_y / dz &= i\omega\mu_0 \bar{H}_x \\ -ik_x \bar{E}_z + d \bar{E}_x / dz &= i\omega\mu_0 \bar{H}_y \\ ik_x \bar{E}_y - ik_y \bar{E}_x &= i\omega\mu_0 \bar{H}_z \\ ik_y \bar{H}_z - d \bar{H}_y / dz &= -i\omega\varepsilon_0 (M_{11} \bar{E}_x + M_{12} \bar{E}_y + M_{13} \bar{E}_z) \\ -ik_x \bar{H}_z + d \bar{H}_x / dz &= -i\omega\varepsilon_0 (M_{21} \bar{E}_x + M_{22} \bar{E}_y + M_{23} \bar{E}_z) \\ ik_x \bar{H}_y - ik_y \bar{H}_x &= -i\omega\varepsilon_0 (M_{31} \bar{E}_x + M_{32} \bar{E}_y + M_{33} \bar{E}_z) \end{aligned}$$

$$\bar{\mathbf{E}}(k_x, k_y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-i(k_x x + k_y y)] \mathbf{E}(x, y, z) dx dy$$

$$\bar{\mathbf{H}}(k_x, k_y, z) = \frac{\eta}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-i(k_x x + k_y y)] \mathbf{H}(x, y, z) dx dy$$

偏微分
变微分

消去
垂直
分量



$$\frac{d\mathbf{V}_i}{dz} = -ik_0 \bar{T}_i \mathbf{V}_i$$

$$\mathbf{V}_i = [\bar{E}_{xi}, \bar{E}_{yi}, \bar{H}_{xi}, \bar{H}_{yi}]^T$$

状态矩阵由每层的电极化率矩阵M以及波矢量决定。



3.1 全波有限元方法

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

- 基于反射系数和波模振幅递归的计算方法
- 具有很好的内在稳定性可以克服“数值淹没”问题
- 可以用于计算任意结构的源电流在地球-电离层波导中任意水平距离和方向上的场
- 计算电离层中以哨声波模向上传播的电磁场强度

3.2 仿真计算参数

VLF人工源信息包括

人工源位置

发射频率

发射功率

计算参数包括

电子密度：IRI 模型

碰撞频率：指数模型

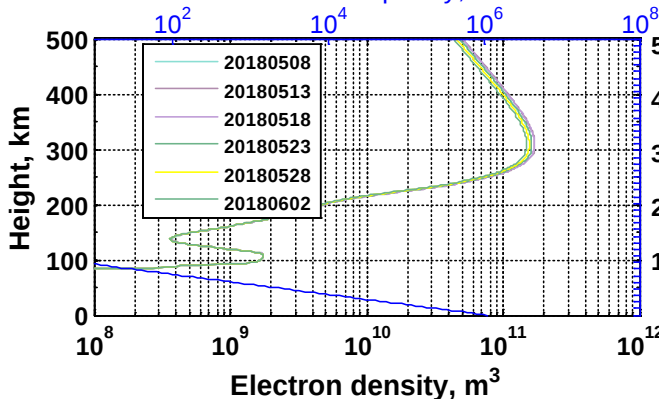
地磁场强度和倾角：IGRF模型

表1 VLF人工源分布及参数

名称	纬度 (deg)	经度 (deg)	L 值	地磁 倾角	地磁 偏角	频率 (kHz)	工作 模式
NWC	-21.82	114.17	1.32	-55.3	0.5	19.80	MSK
NAA	44.65	-67.28	2.46	71	-12.2	24.00	MSK
NPM	21.42	-158.15	1.14	38.0	9.9	21.40	MSK

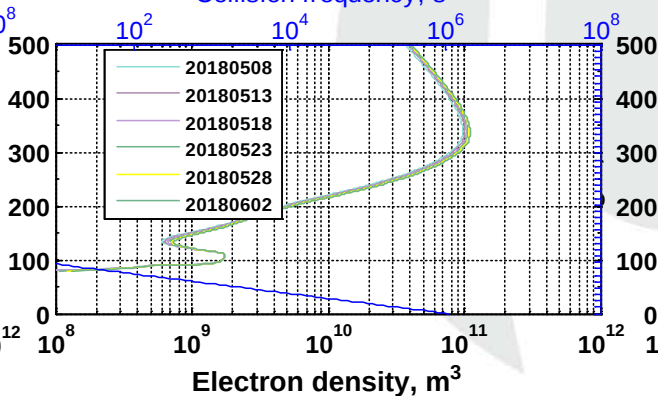
IRI2016 Ne at NWC
LT:02, [114.17°, -21.82°]

Collision frequency, s^{-1}



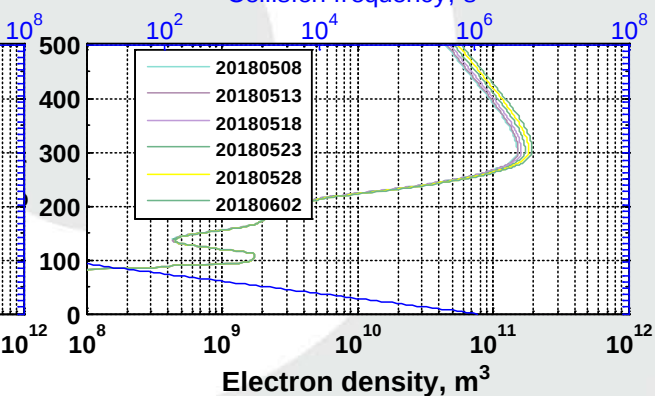
IRI2016 Ne at NAA
LT:02, [-67.29°, 44.65°]

Collision frequency, s^{-1}



IRI2016 Ne at NPM
LT:02, [-158.15°, 21.42°]

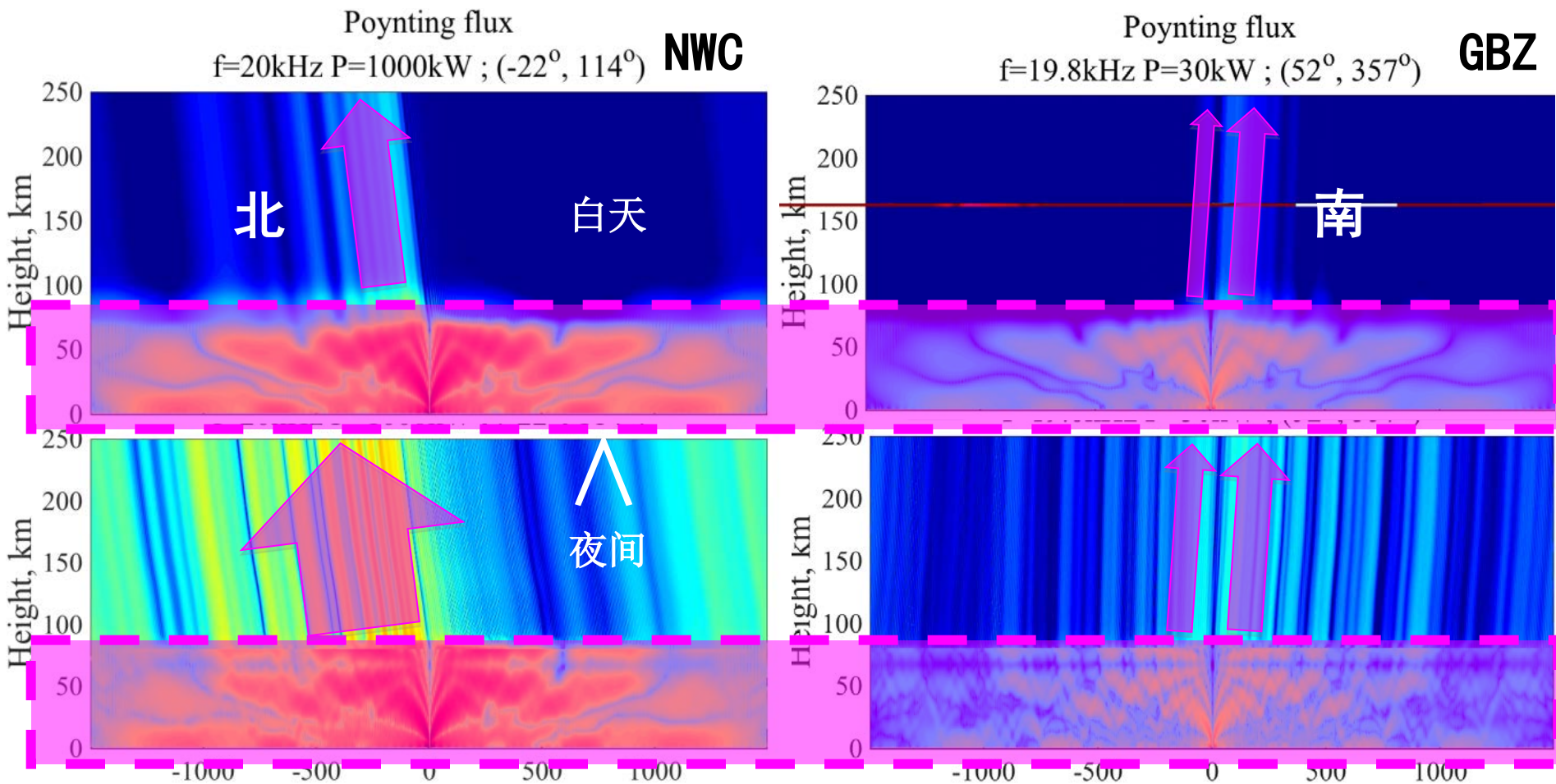
Collision frequency, s^{-1}



3.3 仿真计算结果 —— 分布形态



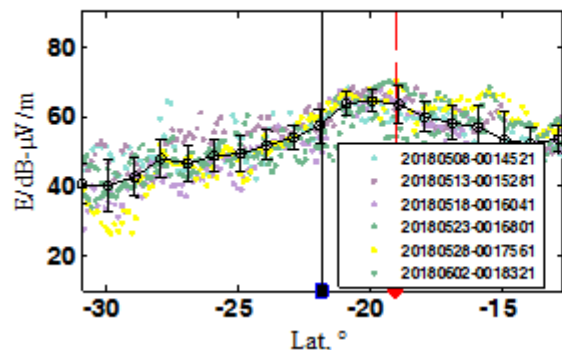
INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



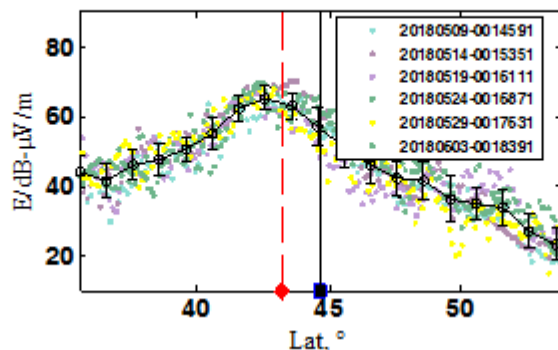
(3) 发现NWC向北偏, GBZ向南偏, 并且偏移量NWC大于GBZ, 与观测结论一致。

3.3 仿真计算结果 —— 与观测对比

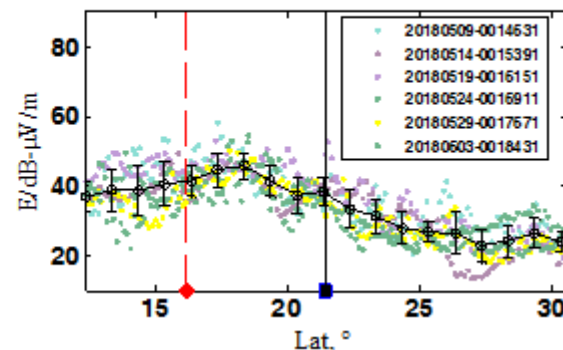
CSES electric field excited by NWC
19.8kHz $\pm$ 200Hz up/Night



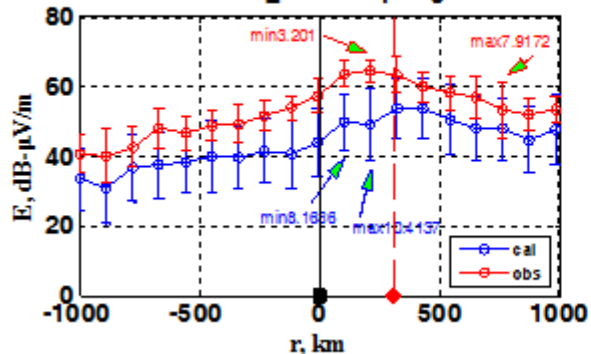
CSES electric field excited by NAA
24.0kHz $\pm$ 200Hz up/Night



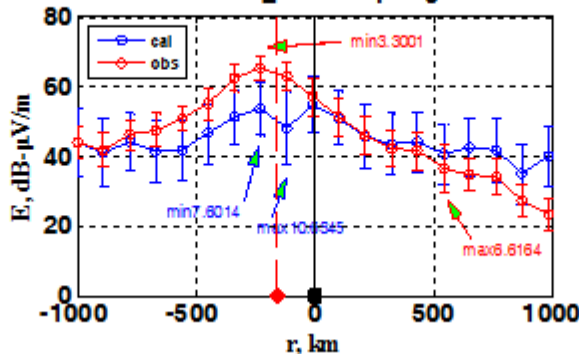
CSES electric field excited by NPM
21.4kHz $\pm$ 200Hz up/Night



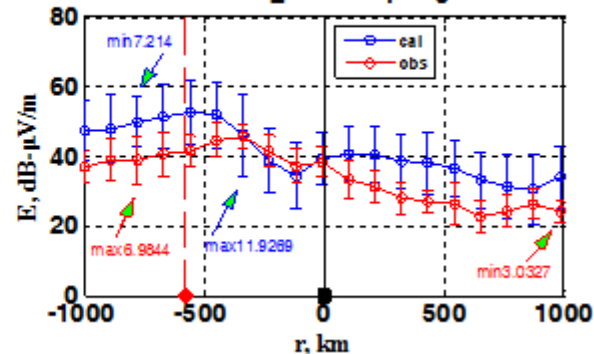
Electric field excited by NWC
19.8kHz $\pm$ 200Hz up/Night



Electric field excited by NAA
24.0kHz $\pm$ 200Hz up/Night



Electric field excited by NPM
21.4kHz $\pm$ 200Hz up/Night



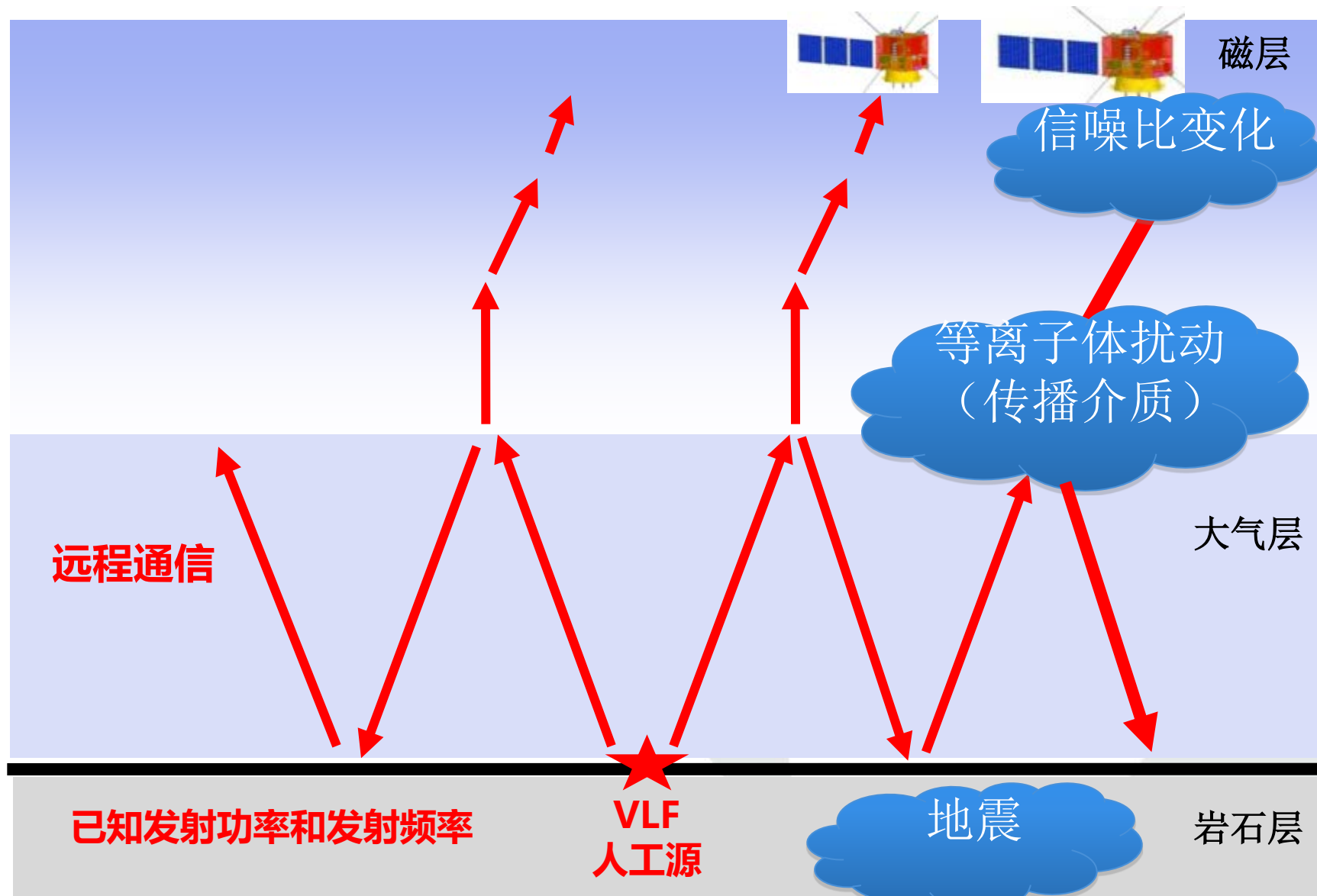
➤ ZH-1卫星清晰的记录了2018年5月6日-6月6日的VLF人工源在电离层卫星高度激发的电场。**NWC、NAA、GBZ**发射源激发的电磁波沿磁力线以**导管的方式**传播到发射源上空及共轭区。**NPM**发射源激发的电磁波以**非导管的方式**沿着群速度方向传播到发射源上空及共轭区，统计上述发射源位置发现**发射源位于 $L < 1.3$ 时共轭区的非导管传播可能更容易发生**，这与Clilverd等（Clilverd et al., 2008）利用DEMETER和CRRES卫星数据的分析结果一致。此外，VLF发射源沿磁力线的导管传播模式在共轭区的电场响应均有一定的**向北移动**。

➤ ZH-1卫星的6条重访轨观测的NWC、NAA、NPM在其顶空1000km范围内激发的电场与全波模型的电场模拟结果在**数值上较为接近，在形态上较为一致**，观测结果和模拟结果都清晰的显示了辐射源从中心向两侧逐渐衰减，也体现了比较明显的波模干涉特征。5月6日-6月6日ZH-1卫星记录的NWC、NAA、NPM人工源激发的电场变化标准差范围为3.2-7.9，3.0-6.9，3.3-6.6，与DEMETER卫星记录的电场变化标准差几乎一致，说明**ZH-1卫星的观测结果是较为稳定的**。

地震引起VLF人工源信号信噪比变化的机理



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA





Thank you!

中国地震局地震预测研究所
INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA