

# 基于COMSOL Multiphysics®的大气低频声传播研究

康智峰<sup>1</sup>,周晨<sup>1</sup>,王翔<sup>1</sup>  
1.武汉大学电子信息学院

**简介:**长程声传播是大气中声波传播的一种重要模式。而由于次声与核爆、地震、火山和海啸等自然现象密切相关且便于观测,受到国内外科学家广泛而深入的观测研究。本案例基于COMSOL Multiphysics®的压力声学模块开展了对非均匀大气中次声波超视距传播特性的研究,通过建立大气声学模型对武汉上空四季次声波传播情况以及路径传输损耗进行了频域稳态分析,利用MESIS00模型获得大气的温度,HWM93模型获得大气风场,模拟了声波在大气中的传播,获取了次声波在非均匀大气中的超视距传播特性。

**计算方法:**通过在压力声学的方程中直接导入温度与大气密度数据,并通过有效声速的概念将声速代之以声速和风速的矢量和进行计算。

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho c} = Q_m$$
$$p_t = p + p_b$$
$$k_{eq}^2 = \left( \frac{\omega}{c_c} \right)^2 - k_z^2$$
$$c_c = c, \rho_c = \rho$$

通过改变压力声学方程中的声速 $c$ ,绝对压力 $p$ 与温度 $T$ 将由MESIS00模型和HWM93模型获得的数据耦合至模型中。二维几何模型为一个横向长1000km,纵向高150km的矩形空间。将除下边缘外其余三个边界设置为平面波辐射以模拟大气声传播;下边界设置为硬声场边界以模拟地面对声的反射。于距左边界500km,距地面0.1km处设置点声源,建立声传播模型。

## 结果:

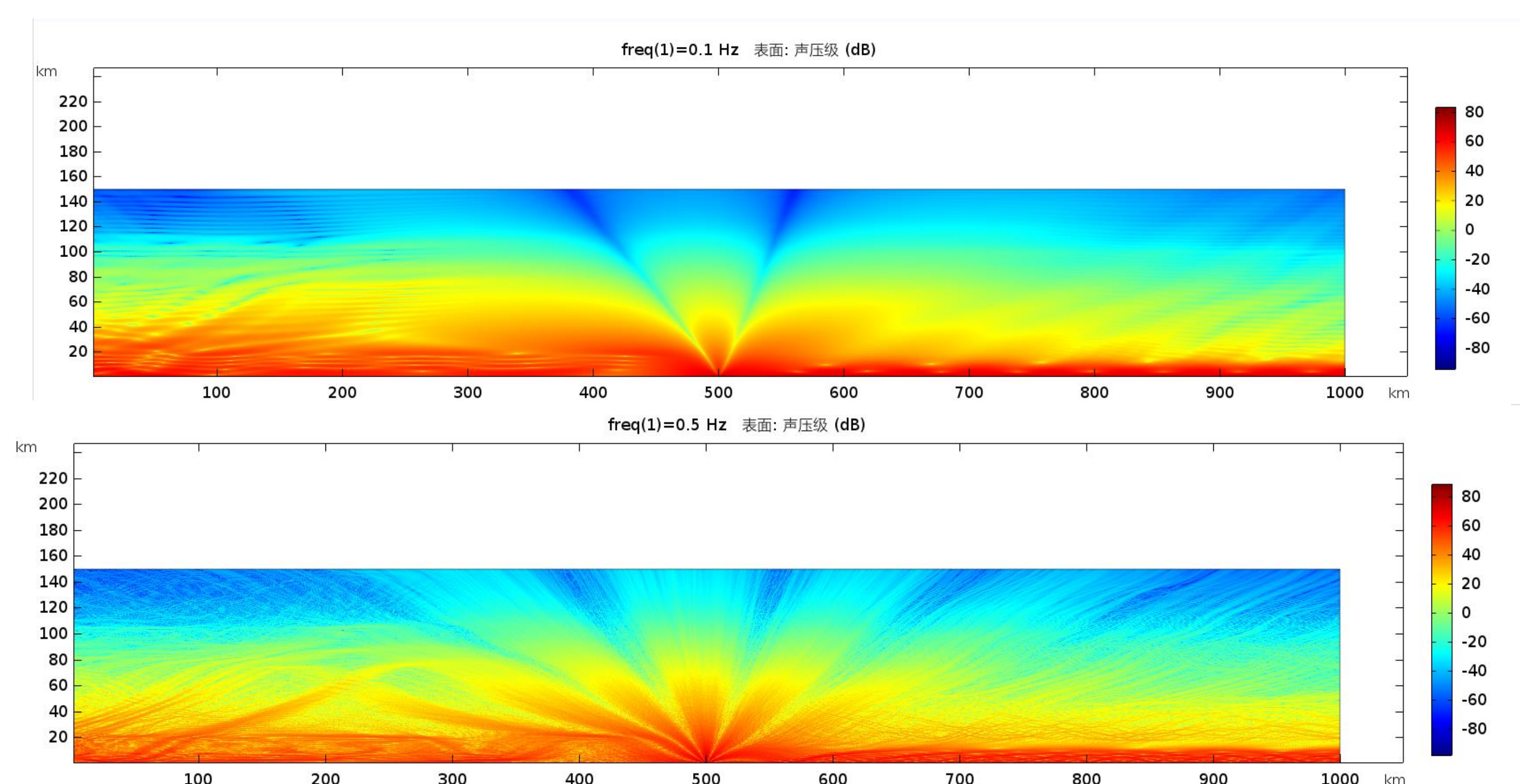


图 1. 声波在春分日0时传播的声压分布  
(上) 声波频率0.1Hz  
(下) 声波频率0.5Hz

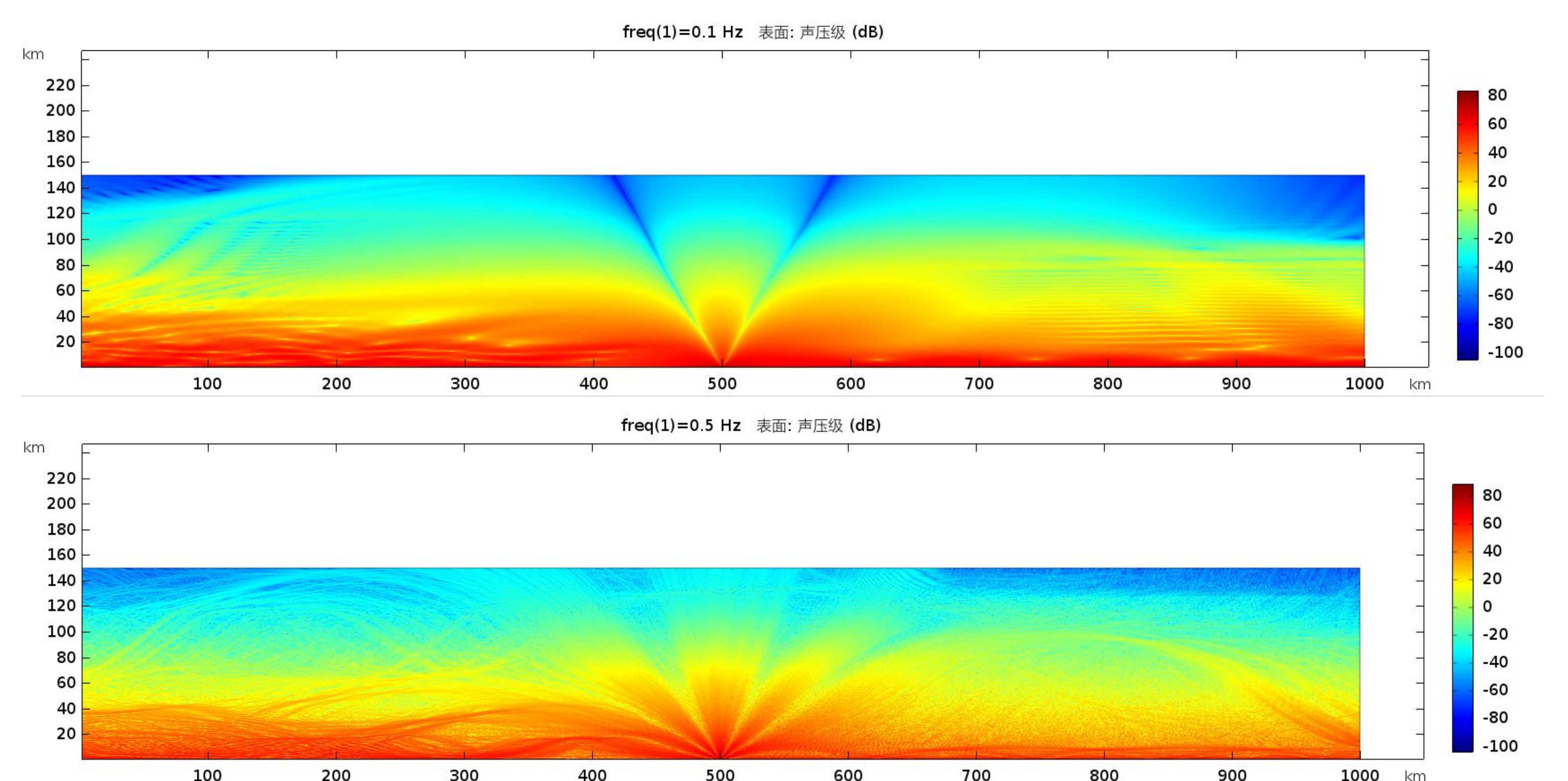


图 2. 声波在夏至日0时传播的声压分布  
(上) 声波频率0.1Hz  
(下) 声波频率0.5Hz

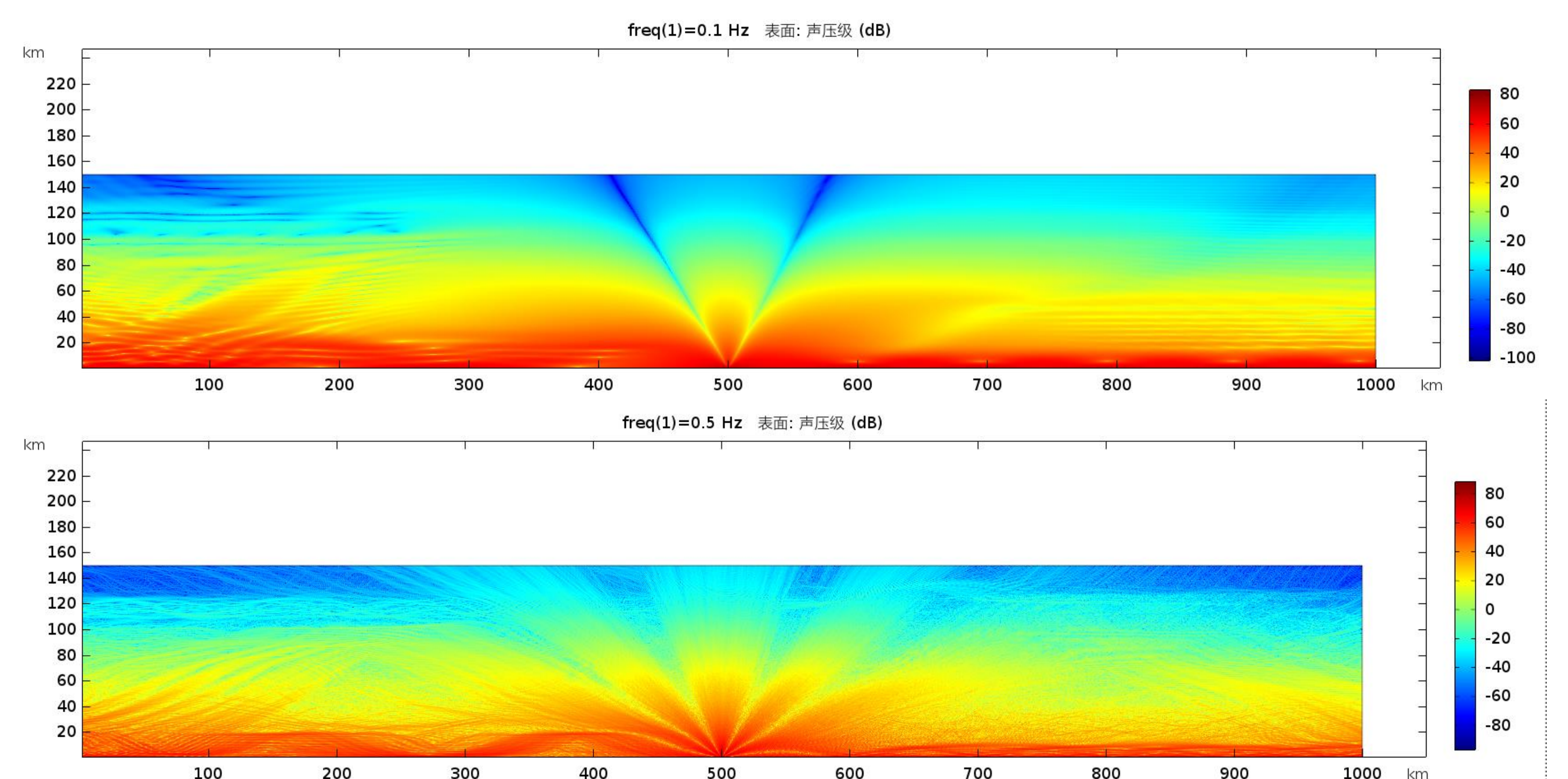


图 3. 声波在秋分日0时传播的声压分布  
(上) 声波频率0.1Hz  
(下) 声波频率0.5Hz

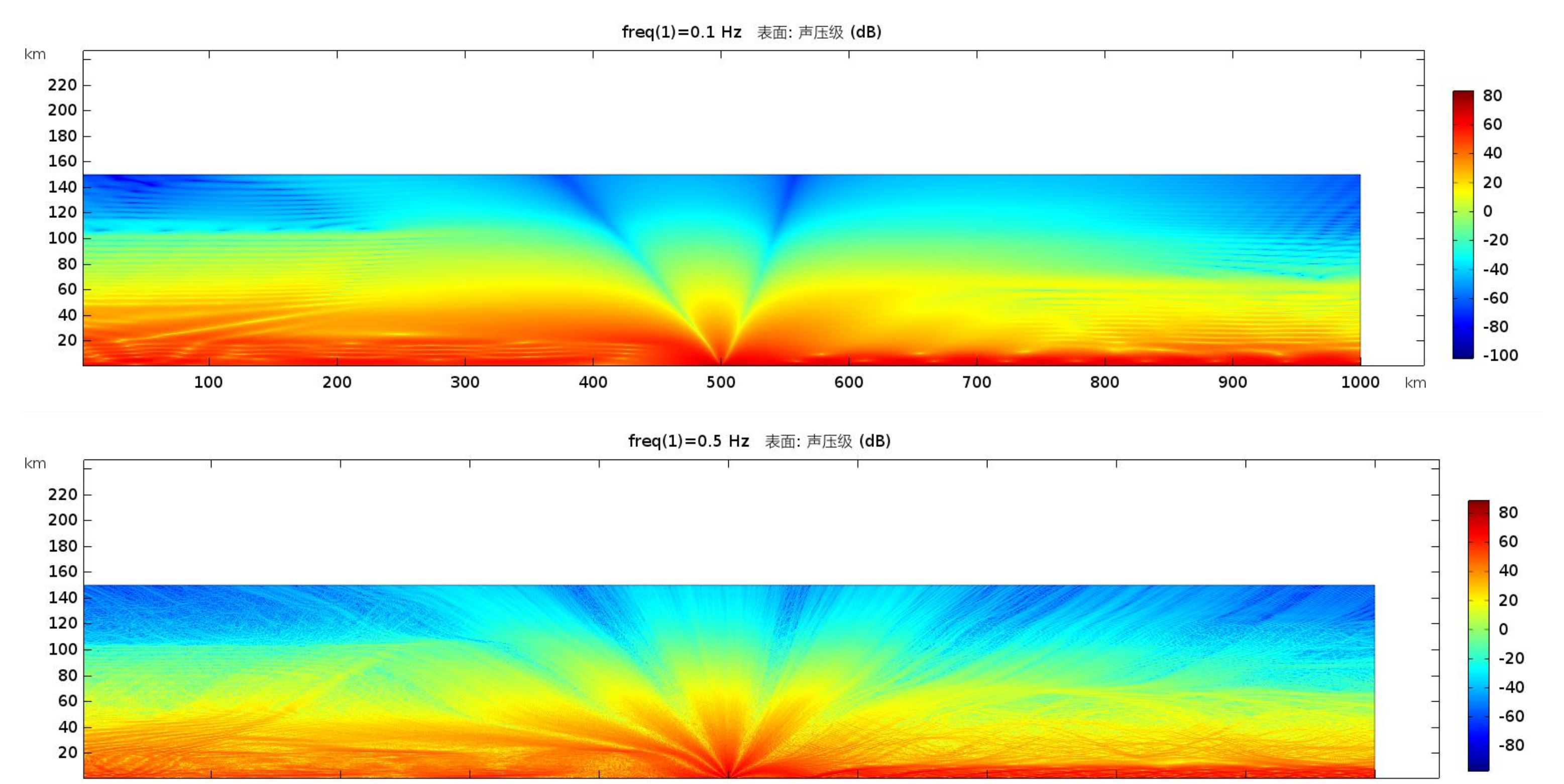


图 4. 声波在冬至日0时传播的声压分布  
(上) 声波频率0.1Hz  
(下) 声波频率0.5Hz

**结论:**计算结果表明,非均匀大气的性质及其中存在的风对次声波传播有明显的影响,声波在大气中传播时由于温度随高度变化会在某些高度上发生向下折射现象(例如在武汉上空是在40km和110km高度左右);在加入纬向风效应后,声波四季传播模拟结果差异较大。平流层折射是否存在和声波传播方向以及风向有关。

## 参考文献:

1. 周晨, 王翔, 赵正予, 等. 次声波在非均匀大气中的超视距传播特性研究\*[J]. 物理学报, 2013, 62(15):154302-154302(2013).
2. 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 科学出版社, (2004).
3. 杨训仁, 陈宇. 大气声学[M]. 科学出版社, (2007).