

# 吴忠 - 灵武地区P波三维Q值层析成像

师海阔, 杨学锋, 张立恒, 贺永忠

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2022年8月9日; 录用日期: 2022年9月14日; 发布日期: 2022年9月21日

## 摘要

基于层析成像方法, 利用宁夏测震台网中心提供的2009年1月至2021年12月的地震波形数据, 对吴忠 - 灵武地区P波三维Q值分布特征进行了研究。结果表明: 沿着黄河水系的一系列断裂比较密集的区域, Q值表现为低值状态区域, 构造活动强烈; 随着深度的增加, 吴忠 - 灵武北部区域的Q值一直稳定在一个相对较低的水平, 而在其南部, Q值则由低值转为高值。

## 关键词

吴忠 - 灵武地区, P波, 三维Q值, 层析成像

## 3D Q Tomography of P-Wave Data in Wuzhong-Lingwu Area

Haikuo Shi, Xuefeng Yang, Liheng Zhang, Yongzhong He

Ningxia Earth Quake Administration, Yinchuan Ningxia

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 14<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 21<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Based on the tomography method, seismic wave data of January 2009 to December 2021 are collected from Ningxia Seismological Network Center to study the 3D Q-value distribution characteristics of P-wave in Wuzhong-Lingwu area. The results show that Q-value is much lower in the area where lots of faults distribute along the Yellow River. As the depth increases, Q-value remains low-level in the northern Wuzhong-Lingwu area, but it gets bigger and bigger in the southern part.

## Keywords

Wuzhong-Lingwu area, P-Wave, 3D Q-Value, Tomography

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

品质因子  $Q$  值是描述地下介质性质的参数, 可反映地震波在介质中的耗散情况, 进而用来研究地震波衰减的物理机制[1]。地震波的衰减通常与所经区域的构造活动、高温异常或部分熔融、地壳厚度变化、盆地沉积层厚度和海水覆盖等高度相关, 因此常被用作衡量构造活动性的重要指标之一[2]。研究表明:  $Q$  值越大, 地震波衰减越弱,  $Q$  值越小, 地震波衰减越强[3]。随着层析成像技术的引入, 使得三维  $Q$  值成像研究成为可能, 也更能精细直观地反映区域构造活动及地下介质的衰减情况[4]。而结合地下速度结构、地震活动性和地球物理场等的变化, 三维体波  $Q$  值成像可更加真实地反映  $Q$  值沿地震波传播路径的变化情况, 从而为地球内部介质组成及其不均匀性提供一定的地震学证据[5]。

吴忠 - 灵武地区位于银川盆地的南部, 为宁夏人口集中、经济发达的地区之一, 也是 1950 年以来宁夏境内中强地震和小震活动较为活跃的区域之一, 1950 年以来共发生过 7 次  $MS \geq 5.0$  地震。该地区处于青藏块体、阿拉善块体和鄂尔多斯块体交汇部位, 区域地质构造复杂, 地壳速度结构与相邻块体存在较明显的差异。赵卫明等应用宁夏 9 个台站的模拟地震波资料对宁夏及邻区的分区尾波  $Q$  值进行了研究, 结果表明  $Q$  值分布与地质构造活动紧密相关, 且吴忠、灵武地区的平均  $Q$  值偏低[6]。贺永忠等利用宁夏数字地震台网记录的波形数据, 分别利用 Aki 模型和 Sato 模型对宁夏及邻区的尾波  $Q$  值进行了研究, 两种模型的结果均显示该区  $Q$  值较低[7]。以上结果均为吴忠 - 灵武地区平均  $Q$  值, 但目前尚缺少对该区域三维  $Q$  值的相关研究, 本研究将使用层析成像方法, 对吴忠 - 灵武地区的三维  $Q$  值结构展开更加深入的研究, 并结合地质构造特征及断裂带分布, 以期能为地震预测提供依据。

## 2. $Q$ 值成像理论和计算方法

地震波的位移谱与震源和路径参数的关系可以表示为:

$$X(f) = S(f)E(f)R(r)G(f)I(f) \quad (1)$$

式中,  $X(f)$  为地震位移谱,  $S(f)$  为震源谱,  $E(f)$  为介质响应,  $R(r)$  为几何衰减,  $G(f)$  为场地响应。其中,  $R(r)$  可利用射线追踪计算得到,  $G(f)$  可反演得到,  $I(f)$  为仪器响应。根据安艺敬一的  $Q$  值理论[8], (1)式可进一步转化为:

$$Y(f) = S(f)R(r)E(f) = S(f)r^{-\alpha}e^{-\pi f \frac{r}{v(r)Q(r,f)}} \quad (2)$$

其中,  $Y(f)$  为位移振幅谱函数(扣除了仪器响应和场地响应),  $v(r)$  为地震波在介质中传播的速度,  $\alpha$  为几何扩散衰减因子,  $Q(r, f)$  为传播路径  $r$  上频率为  $f$  的品质因子。两边取对数, (2)式可进一步转化为:

$$\ln Y(f) = -\pi f t q + \ln S(f) - \alpha \ln r \quad (3)$$

其中

$$t = \frac{r}{v(r)}, q = \frac{1}{Q(r, f)}.$$

通过运算, 可以计算过程中消除震源最大位移谱值  $\Omega_0$  和几何衰减  $R(r)$  [9][10], 从而得到单测点  $Q$  值为:

$$Q(r, f) = Q_0(r) f^\alpha \quad (4)$$

其中,  $Q_0(r)$  是对应频率为 1 Hz 时在传播路径  $r$  上的  $Q$  值。

最后, 利用三维速度模型[11], 可在公式(2)的基础上得到式(5):

$$\frac{r}{v(r)Q(r, f)} = \frac{r_1}{v(r_1)Q(r_1, f)} + \frac{r_2}{v(r_2)Q(r_2, f)} + \dots + \frac{r_i}{v(r_i)Q(r_i, f)} + \dots + \frac{r_m}{v(r_m)Q(r_m, f)} \quad (5)$$

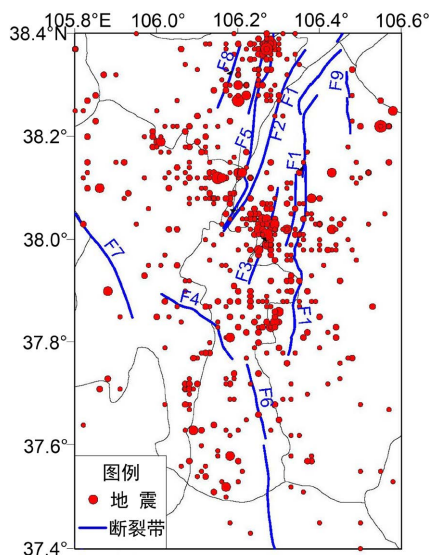
等式各项分别代表某段传播路径及在此传播路径上的速度和  $Q$  值。应用阻尼最小二乘法, 可反演获得三维  $Q$  值。

在计算过程中, 本研究通过震相走时  $T$  矩阵的构建, 解决了传播路径和在其上各网格块体内各参数的计算问题。具体的计算是由兰州地震研究所张元生研究员研发的 3Dtomography 软件来实现[9] [10]。

### 3. 资料选取和处理

本研究使用宁夏测震台网中心提供的 2009 年 1 月至 2021 年 12 月宁夏境内发生的  $M_L$  1.0~6.0 级地震(见图 1)。首先对地震波形进行初筛, 参与计算的地震事件应至少有 3 个台站的清晰记录, 且所选取的台站全部为基岩台站, 这样可大大减少场地响应对  $Q$  值计算的影响; 随后, 基于三维网格搜索法对地震深度进行修正[9] [10] [11]; 最后, 共挑选出满足  $Q$  值反演计算条件的地震事件 1820 个, P 波到时数据 16,209 个。

进行网格划分时, 水平方向采用  $0.4^\circ \times 0.4^\circ$  的等间距网格; 在深度方向上, 根据三维速度结构模型, 共划分为不等间距的 7 层, 分别为 0~4 km, 4~8 km, 8~12 km, 12~15 km, 15~18 km, 18~20 km, 20 km 以下。



注: F1: 黄河断裂; F2: 新华桥断裂; F3: 崇兴断裂; F4: 关马湖断裂; F5: 银川隐伏断裂; F6: 罗山断裂; F7: 三关口断裂; F8: 永宁西断裂; F9: 黑山断裂。

Figure 1. Location, tectonic setting and seismic distribution of the study area (January 2009 to December 2021)

图 1. 研究区位置、构造背景及地震分布(2009 年 1 月至 2021 年 12 月)

### 4. $Q$ 值层析成像结果

#### 1) 0~4 km 深度

在有效分辨范围内,  $Q$  值最高值达到为 520, 为灵武地区东北部区域; 其他区域  $Q$  值相对较低, 最低达到 100, 吴忠 - 灵武地区的平均  $Q$  值为 310(图 2)。银川地垫和吴忠以南地区的  $Q$  值在 100~280 范围

内上下浮动, 平均为 190, 且低值区主要分布在断裂比较密集的区域。在黄河断裂两侧,  $Q$  值差异明显, 在断裂西侧,  $Q$  值偏低; 而在断裂东侧,  $Q$  值则相对较高, 这表明该地区在地壳上部表现出较强的刚性特征, 沉积层较薄, 介质完整性较好[12]。

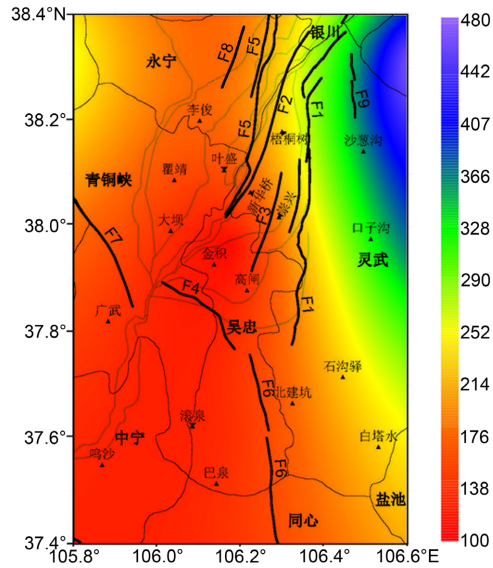


Figure 2. P-wave  $Q$ -value distribution at 0~4 km depth  
图 2. 0~4 km 深度 P 波  $Q$  值分布图

## 2) 4~8 km 深度

P 波  $Q$  值在 4~8 km 继续延续了 0~4 km 深度范围的分布特征。 $Q$  值最低为 120, 最高为 330, 平均  $Q$  值为 225。三关口断裂以西的阿拉善左旗和黄河断裂以东地区为高值区, 其值达到 330。低值区主要分布在断层比较密集的区域,  $Q$  值在 110~190 范围上下浮动, 平均为 150, 且沿着黄河水系和断裂带分布呈条带状展布(图 3)。

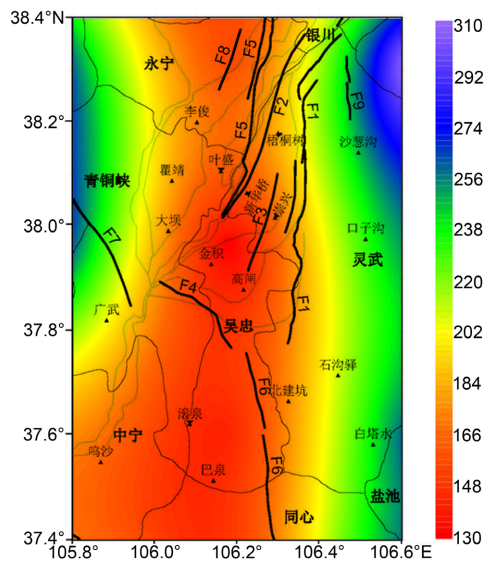


Figure 3. P-wave  $Q$ -value distribution at 4~8 km depth  
图 3. 4~8 km 深度 P 波  $Q$  值分布图

3) 8~12 km 深度

8~12 km 深度范围内, P 波  $Q$  值的最小值为 130, 最大值为 320, 平均  $Q$  值为 225。其中, 高值区  $Q$  值变化区间为 220~320, 主要区域为三关口断裂以西的阿拉善左旗和黄河断裂以东的灵武东、盐池等地。低值区  $Q$  值在 130~220 之间变化, 沿着黄河水系和断裂带分布呈条带状展布(图 4)。

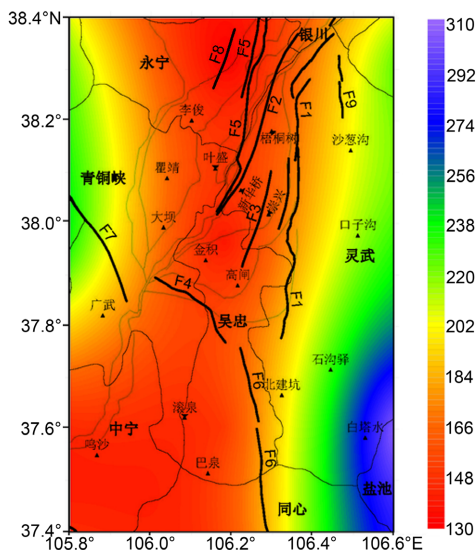


Figure 4. P-wave  $Q$ -value distribution at 8~12 km depth  
图 4. 8~12 km 深度 P 波  $Q$  值分布图

4) 12~15 km 深度

12~15 km 深度范围内,  $Q$  值变化区间为 120~310, 平均为 215。其中, 高值区  $Q$  值最低为 220, 最高为 310, 平均值为 265, 主要区域为三关口断裂以西的阿拉善左旗和黄河断裂以东的灵武东、盐池等地, 且逐渐延伸至同心以东区域。低值区  $Q$  值在 120 到 200 之间浮动, 平均为 160, 沿着黄河水系和断裂带分布呈条带状展布(图 5)。

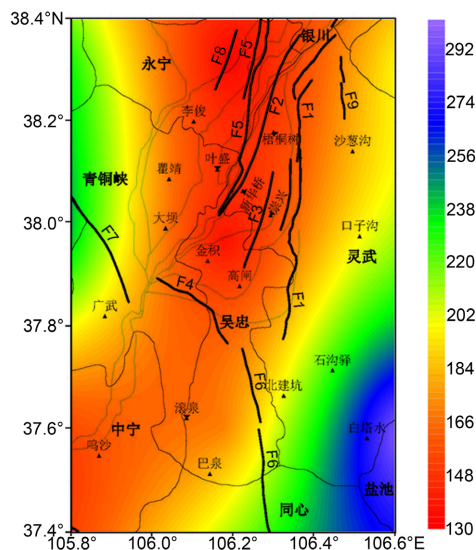


Figure 5. P-wave  $Q$ -value distribution at 12~15 km depth  
图 5. 12~15 km 深度 P 波  $Q$  值分布图



## 5) 15~18 km 深度

15~18 km 深度范围内,  $Q$  值最低为 130, 最高为 298, 平均值 214。其中, 高值区  $Q$  值在 214~298 间变化, 平均为 256, 主要区域为三关口断裂以西的阿拉善左旗和罗山断裂以东的灵武南、盐池、同心等地; 低值区变化区间为 130~200, 平均值 165, 依然沿着黄河水系和断裂带分布呈条带状展布, 但分布范围比上一层略有减小(图 6)。

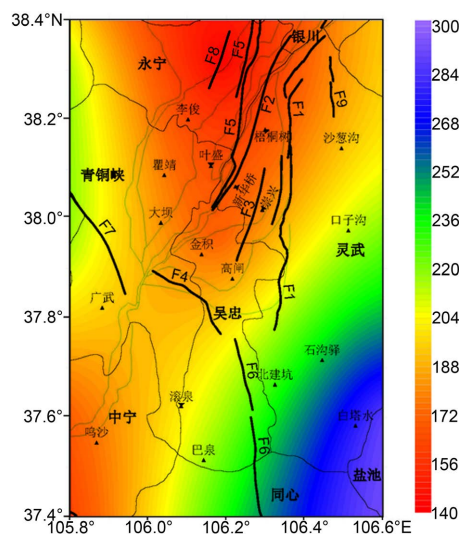


Figure 6. P-wave  $Q$ -value distribution at 15~18 km depth  
图 6. 15~18 km 深度 P 波  $Q$  值分布图

## 6) 18~20 km 深度

18~20 km 深度范围内,  $Q$  值最低为 140, 最高为 320, 平均为 230。其中, 高值区  $Q$  值在 230~320 之间变化, 平均为 275, 一个是三关口断裂以西的阿拉善左旗, 其最高值达到 320; 另外一个高值区为罗山断裂以东的灵武南、盐池、同心等地, 并且有逐渐向西南方向延伸的态势。低值区  $Q$  值变化区间为 140~212, 平均为 176, 其分布在上一层的基础上有向东南方向扩展的趋势(图 7)。

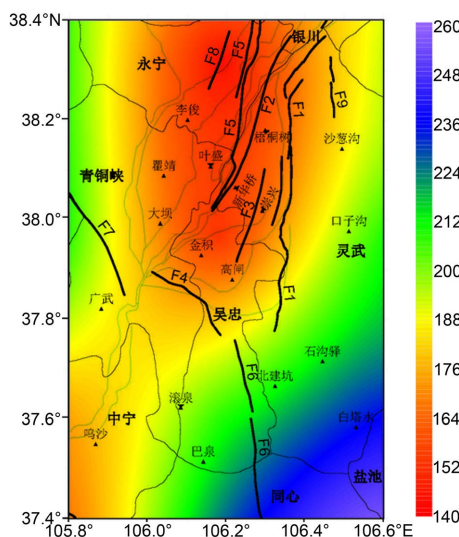


Figure 7. P-wave  $Q$ -value distribution at 18~20 km depth  
图 7. 18~20 km 深度 P 波  $Q$  值分布图

### 7) 20 km 以下深度

20 km 以下深度,  $Q$  值的变化区间为 150~339, 平均为 245。在这一层中, 存在一个明显的高值区, 该区  $Q$  值在 234 至 339 之间变化, 平均值为 287, 主要分布在牛首山断裂、罗山断裂和烟筒山断裂汇聚的吴忠南、灵武南、盐池、同心和中宁东等区域。低值区变化区间为 150~230, 平均为 190, 其分布在上一层的基础上进一步向东南方向扩展, 主要集中在吴忠 - 灵武以北地区和中宁以西地区(图 8)。

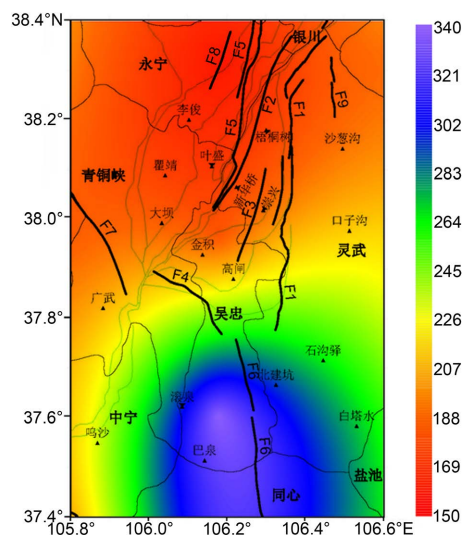


Figure 8. P-wave  $Q$ -value distribution below 20 km  
图 8. 20 km 以下深度 P 波  $Q$  值分布图

## 5. 结论与讨论

吴忠 - 灵武地区断裂带分布密集, 构造性质复杂, 本文利用层析成像方法, 得到了研究区 P 波三维  $Q$  值结构。

1) 沿着黄河水系的一系列断裂比较密集的区域,  $Q$  值表现为低值状态, 区域构造活动强烈。高值区则在不同深度表现出不同的分布状态, 随着深度的增加, 吴忠 - 灵武北部区域的  $Q$  值一直稳定在一个相对较低的水平; 而在吴忠 - 灵武南部,  $Q$  值则由低值转为高值, 表明在这一区域的中下地壳有比较稳定且坚硬的构造性质。

2) 在研究区西北部的阿拉善左旗,  $Q$  值在 0~20 km 深度均达到相对较高的水平, 这表明该地区中上地壳刚性很强, 有比较稳定的构造性质[13]。

3) 在研究区的东北部即灵武东北部地区,  $Q$  值在 0~8 km 深度显示为高值, 这表明该地区在地壳上部表现出较强的刚性特征, 沉积层较薄, 介质完整性较好[12]。在 8~20 km 深度, 高值区则主要分布在研究区的东南部, 即罗山断裂(F6)以东的灵武南、盐池等地, 其所在的鄂尔多斯地块是中国大陆中最为完整和稳定的块体之一, 历史上鲜有发生地震。在 20 km 以下深度, 高值区则迁移至吴忠灵武南部和同心北部, 这一分布特征或可说明罗山断裂(F6)切割较浅, 未来发震深度应在 20 km 以内。

## 致 谢

兰州地震研究所张元生研究员为本研究提供  $Q$  值计算软件, 不胜感激!

## 基金项目

宁夏自然科学基金资助项目(2020AAC03441), 宁夏地震科研基金课题(NX202204)。

## 参考文献

- [1] Sato, H. (1992) Thermal Structure of the Mantle Wedge Beneath Northeastern Japan: Magmatism in an Island Arc from the Combined Data of Seismic Anelasticity and Velocity and Heat Flow. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, **51**, 237-252. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90125-W](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90125-W)
- [2] Burgmann, R. and Dresen, G. (2008) Rheology of the Lower Crust and Upper Mantle: Evidence from Rock Mechanics, Geodesy, and Field Observations. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, **36**, 531-567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124326>
- [3] Sato, H. and Fehler, M.C. (1998) *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2202-6>
- [4] Savage, B., Komatitsch, D. and Tromp, J. (2010) Effects of 3D Attenuation on Seismic Wave Amplitude and Phase Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 1241-1251. <https://doi.org/10.1785/0120090263>
- [5] 刘翰林, 吴庆举. 大兴安岭诺敏河火山群远震 P 波衰减研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(1): 157-169.
- [6] 赵卫明, 刘秀景, 马禾青. 宁夏及邻区尾 Q 值分布特征[J]. 华南地震, 2002, 22(1): 23-27.
- [7] 贺永忠, 师海阔, 朱新运, 张立恒. 利用两种模型对宁夏及邻区尾波 Q 值进行对比研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(z1): 10-17.
- [8] 安艺敬一. 定量地震学[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [9] 惠少兴, 张元生, 李顺成. t-D 地震定位方法研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 10-13.
- [10] 高见. 甘东南地区三维 Q 值研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2013.
- [11] 李青梅, 张元生, 吕俊强, 等. 宁夏地区小震重定位[J]. 地震工程学报, 2015(2): 518-524.
- [12] 杨明芝, 马禾青, 廖玉华. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [13] 张振法, 李超英, 牛颖智. 阿拉善——敦煌陆块的性质、范围及其构造作用和意义[J]. 内蒙古地质, 1997(2): 1-14.