

李继业、孙鹏宇、武晓军等, 2018, 依舒断裂带北段尾波 Q 值特征研究, 中国地震, 34(3), 545~550.

依舒断裂带北段尾波 Q 值特征研究

李继业¹⁾ 孙鹏宇²⁾ 武晓军³⁾ 张彦吉³⁾
任建辉³⁾ 秦丽岩³⁾ 孙强³⁾

- 1) 黑龙江省地震局, 哈尔滨市南岗区鸿翔路 24 号 150090
- 2) 哈尔滨市住房和城乡建设委员会, 哈尔滨 150700
- 3) 哈尔滨市防震减灾技术中心, 哈尔滨 150021

摘要 研究表明,地震波穿过构造活动相对稳定地区时,能量衰减不明显且具有高 Q 值;而穿过构造活动地区时,能量会发生强烈衰减且具有低 Q 值。本文利用 Sato 模型对依舒断裂带北段萝北-通河地区 15 个数字化地震台站记录到的 266 条 $M_L \geq 2.0$ 地震尾波 Q 值进行了分析和研究,发现黑龙江萝北、通河附近地区 Q 值具有明显的复杂性和差异性,且萝北地区 Q 值远低于通河地区 Q 值,其原因一方面与区域构造活动有关,另一方面与区域地壳构造复杂、地下介质破碎、区域应力不断变化有关。本文还讨论了萝北、通河附近地区 Q 值随着频率变化的关系及 Q 值空间分布特征,有效地分析了该区域介质状态的变化过程,对萝北地区地震活动性的研究和预测有指导意义。

关键词: 依舒断裂带北段 尾波 Q 值 特征研究

[文章编号] 1001-4683(2018)03-0545-06 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震波 Q 值是除了地震波速度以外,用以研究地球深部结构及地球动力的重要的地球物理学参数。它可以理解为地震波由于地壳层内介质不均匀性而引起的散射作用和介质产生了非弹性吸收而导致的地震波能量衰减。一般情况下地震波衰减在横向上变化量级在几十倍以上,但地壳和上地幔地震波速度在横向上的变化未超过 10%。研究表明,地震波穿过构造活动相对稳定地区时,能量衰减不明显且具有高 Q 值;而穿过构造活动地区时,能量会发生强烈衰减且具有低 Q 值。所以对地壳 Q 值的研究,可以更加准确地认识地壳结构特征,更好得认识地壳内低速层、断层分布以及深部动力学特征。应力变化造成岩石性质发生变化,例如流体的迁移、存在的裂隙状态、热物质的上涌等,这些都有可能造成 Q 值的变化。通过研究 Q 值的时间变化和空间分布特征,尝试将其应用于地震预测预报。

郯庐断裂带北段萝北、通河地区经常发生中小地震,地质构造比较复杂,是黑龙江省地

[收稿日期] 2016-11-08; [修定日期] 2017-07-13

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH16012)、中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(2016010132)共同资助

[作者简介] 李继业,男,1981年生,硕士,高级工程师,主要从事地震活动性及地震预测方法的研究。E-mail:jiye_li@126.com

震监测重点区域。利用 Sato 模型 (Sato, 1977) 对依舒断裂带北段萝北-通河地区 ($44^{\circ} \sim 49^{\circ} \text{N}$, $126^{\circ} \sim 136^{\circ} \text{E}$) 15 个不同台站记录到的 266 个 $M_L \geq 2.0$ 地震尾波 Q_c 值进行了分析和研究, 讨论了 Q_c 值随频率变化的关系, 对黑龙江省萝北地区进行了 Q 值计算, 得到了该地区品质因子随着频率变化的关系及 Q_0 值的空间分布特征, 有效地分析了该区域介质状态的变化过程, 对萝北地区地震活动性的研究和预测有指导意义。

1 Q_c 值计算方法

常用测量 S 波品质因子 Q_s 的方法有两类: 一类是利用 S 波振幅随距离衰减的性质, 常用的有 Aki 的尾波归一法 (Aki, 1980), 它适用于分布在一定距离范围和多方位的多次地震的联合使用, 消除震源辐射方向性, 求取平均值; 另一类是利用尾波振幅随时间衰减的性质, 有适当长度单台尾波记录即可获得结果, 最常用的有单次散射的 Aki 和 Chouet 模型 (Aki K et al, 1975) 以及 Sato 模型 (Sato, 1977), 可用于测量 Q_s , 是因为许多观测结果证明, 尾波是由 S 波的散射波组成, 尾波 Q_c 和 S 波 Q_s 一致 (Rautian et al, 1978; Aki, 1980; Herrmann, 1980)。尾波方法的优势在于仅用一个地震记录, 就可以得到 Q 值与频率的关系 (李白基等, 2004), 因而非常适合于依舒断裂带北段地震的尾波 Q 值的计算。

本文采用基于 Sato (1977) 提出的散射模型来计算地方震 S 尾波 Q_c 值: 对于特定的频率, 可以将此种尾波的振幅和时间的关系表示为

$$F(t) = \lg [(A_c(t)/A_s)^2 K^{-1}(a)] = C(f) - b(t - t_s) \quad (1)$$

式中, A_s 为 S 波最大振幅; $A_c(t)$ 为流逝时间 t 附近的尾波均方根振幅; $a = t/t_s$, t_s 为 S 波的流逝时间; $K(a)$ 为依赖于时间的传播因子; $K(a)$ 及 $A_c(t)$ 分别由下式给出

$$K(a) = 1/a \ln [(a + 1)/(a - 1)] \quad (2)$$

$$A_c(t) = (A_T^2 - A_n^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中, A_T 为所取时间窗内地震波均方根, A_n 为 P 波到达前适当时间段记录的地震波均方根, 用它进行地震波的噪声改正 (高金哲, 2007)。

式(1)中, $C(f)$ 为与频率 f 有关的影响因子, 对同一地震的同一频率, $C(f)$ 为常数, 由此可见 $F(f)$ 与 $(t - t_s)$ 之间存在线性关系, 因此可根据式(1)拟合得到斜率 b , $b = (2\pi f l g e) / Q_c$, 就可得到该频率点的 Q_c , 然后由各个频率点的 Q_c 值, 拟合出 $Q_c(f) = Q_0 f^\eta$, 其中 η 为频率依赖指数, 与 Q_0 呈负相关性。

2 数据选取

数据选取 2002 年以来黑龙江省数字地震台网记录到的 $M_L \geq 2.0$ 地震波形资料 266 条, 采用朱新运等 (2005) 研制的基于 Sato 模型的近震 S 波尾波 Q_c 值求解及分析软件, 利用依舒断裂带北段 15 个地震台站 (图 1) 记录到的三分向波形计算尾波 Q_c 值, 每个台站选取一条尾波持续时间相对长且振幅不饱和、干扰小且 S 波清晰的地震波形, 对尾波 Q_c 值与频率的关系进行分析。在计算台站周围区域内的平均尾波 Q_c 值时, 既要地震波形质量好, 还要考虑计算结果的残差分布及标准偏差是否合适。在数理统计中, 残差是指实际观察值与估计值 (拟合值) 之间的差, 残差越小, 说明拟合结果越好。选取残差处于正态分布, 且标准偏差小于 10 的计算结果, 这样可信度高、可以应用。

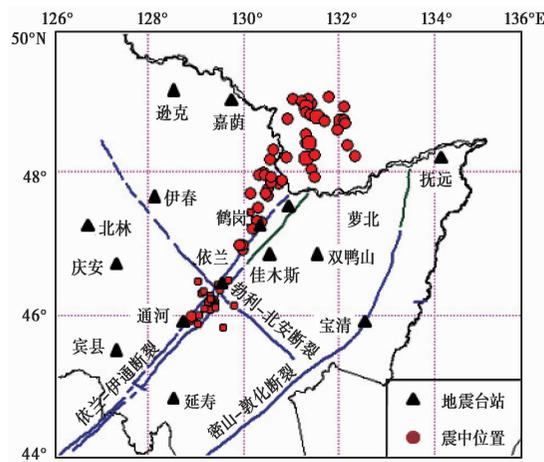


图 1 依舒断裂带北段地震和周边台站分布

3 依舒断裂带北段 Q_0 值空间分布特征分析

计算时使用6级 Butterworth 滤波器进行滤波,尾波段起点取 2 倍的 S 波走时,采样窗长取 2s,采样步长取 0.5s,为保证数据可靠,尾波截断处信噪比大于 2。每条地震记录以 4~18 整数频率点为中心频率,计算 15 个频率点数据,对 Q_0 值与频率之间的依赖关系进行拟合,由 Q_0 值的求解公式可以得知, Q_0 值与频率成正比关系,即频率越高, Q_0 值越大。当频率 f 为 1 时,得出每个地震的 Q_0 值(表 1)。由于有的台站记录信噪比不高,可用于计算的地震记录也相对较少;有的台站记录波形样本数存在较大差异,导致能得到较好拟合结果的地震射线不多,所以样本少的台站结果只能作为该地区介质均匀程度好坏的一个参考值。

尾波 Q_0 值与区域构造活动及地震活动性密切相关,主要反映了震源和地震台站周围介质的平均性质(朱新运等,2006), Q_0 值的变化反映了构造活动时应力的变化。构造活动越强烈的地区,这个半椭球体的介质的均匀程度就越低,地震波射线穿过此介质时能量的消耗就越大,衰减就会越快, Q 值就会比较低;而在构造活动比较稳定的地区则相反,即地下

表 1 依舒断裂带北段附近 15 个台站周围平均 Q_0 值及平均 η 值

地震台站	60s		
	Q_0	η	参与计算波形个数
抚远	17.88	1.0093	8
鹤岗	23.34	0.9675	42
佳木斯	22.45	0.9881	30
嘉荫	21.54	1.0048	8
萝北	31.08	0.8995	23
双鸭山	19.14	1.0027	25
逊克	15.03	1.0301	11
伊春	18.15	0.9640	22
依兰	20.69	1.0502	38
宝清	25.62	0.9920	10
北林	25.42	0.9656	8
宾县	28.56	1.0162	17
庆安	23.03	1.0855	8
通河	36.73	0.9162	7
延寿	35.04	1.0349	9
平均值	24.24	0.9951	266

介质的均匀程度越高,地震波射线在穿过该介质时衰减就越慢, Q 值就越高(万永革,2016)。一般而言, Q_0 值与其对应的频率依赖指数 η 值之间的关系为负相关,即 Q_0 值越小,对频率的依赖程度越大,相关区域地壳均匀程度就越低,地震活动水平也越强;否则 Q_0 值越大,对频率的依赖程度越小,地壳均匀程度就越高,有关区域构造活动水平也越弱(Singh et al, 1983; Rhea, 1984; 刘长生等, 2015)。

通过计算依舒断裂带北段15个地震台站周边地区 Q_0 值,发现依舒断裂带北段 Q_0 值具有显著的分区特征,呈南、北地区高,东、西地区偏低的分布特征(图2),其中萝北地区和通河地区 Q_0 值相对较高,且萝北地区 Q_0 值又远低于通河地区;同时,依舒断裂带北段的萝北、通河地区也是黑龙江省内中小地震活动最频繁的两个地区,且萝北附近地区地震活动频次和强度远高于通河附近地区,这与前人研究的 Q_0 值与地震活动性之间的关系规律基本一致。

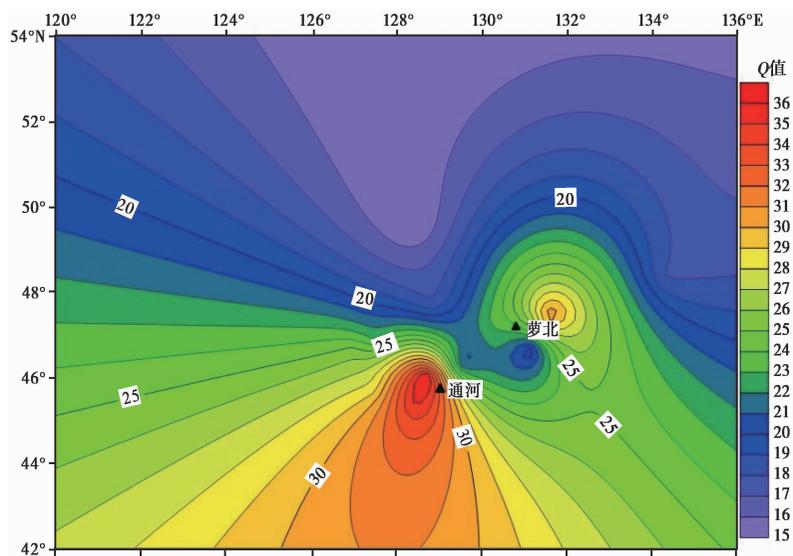


图2 依舒断裂带北段 Q_0 值等值线($f=1\text{Hz}$)

为进一步验证计算结果的可靠性,绘制了 $f=11\text{Hz}$ 时依舒断裂带北段 Q_0 值等值线图(图3),通过对图2、3对比可以看出,不同频率下的萝北、通河附近地区 Q 值分布特征一致,二者之间的相互差异也比较一致,说明本文计算结果可靠。这种差异特征是由于萝北和通河地区都位于依舒断裂带北段,依舒断裂带是黑龙江省东部地区地震活动的控制构造带,该断裂带附近中小地震活动频繁,长期的中小地震活动造成这2个区域附近的介质破碎程度增加,介质中的应力无法过度累积,只能以中小地震的形式释放掉,不易积累更大的能量,因此这2个区域的应力一直处于积累-释放的循环过程。由于区域介质承受的应力不断变化,导致地壳介质的弹性强度和均匀性逐渐增强,于是地震波传播过程中损耗的能量减少,造成依舒断裂带北段萝北和通河附近的 Q_0 值相对较高。

4 结论

本文以Sato模型作为理论基础,研究了郯庐断裂带北段萝北、通河附近地区尾波衰减特

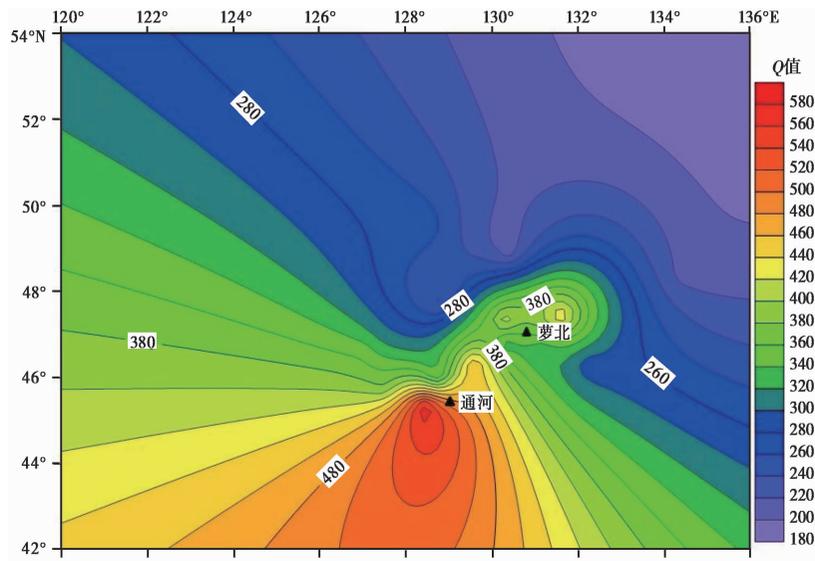


图 3 依舒断裂带北段 Q_c 值等值线 ($f=11\text{Hz}$)

征,得出如下结论:

(1) 本文对依舒断裂带北段 15 个数字化地震台站接收到的 266 条地震波形进行分析和处理,计算了 15 个台站地下及周围介质平均 Q_c 值,黑龙江萝北及周边地区平均 $Q_c(f) = (24.24 \pm 9.527)f^{0.9951 \pm 0.1340}$ 。

(2) 黑龙江萝北、通河附近地区 Q_c 值具有明显的复杂性和差异性,且萝北地区 Q_c 值远低于通河地区,其原因一方面与这两个区域构造活动有关,另一方面与区域地壳构造复杂、地下介质破碎、区域应力不断变化有关。

(3) 地震尾波是岩石介质中的非均匀体散射产生的,岩石裂隙也是非均匀体的重要部分,是导致地震波散射的重要原因,应力变化导致岩石裂隙特征如裂隙长度、宽度、流体静压力等的变化会给地震波散射造成直接影响。由于尾波 Q 值产生的机制比较复杂,与反映的采样范围、各次散射的成分及区域构造有关,且有些机制尚存争议,所以本文得到的结果及相应的解释是初步的,还有待于进一步的探讨。

致谢: 本文采用浙江省地震局朱新运和中国地震台网中心刘杰研制的尾波分析软件进行计算,审稿老师提出了建设性修改意见,特此致谢。

参考文献

高金哲、刘杰、桑成良等,2007,长白山天池火山地区的尾波 Q 值估计,中国地震,23(4),400~409.
 李白基、秦嘉政、钱晓东等,2004,云南姚安地区的尾波衰减,地震学报,26(1),47~52.
 刘长生、彭春红,2015,黑龙江省大庆地区尾波 Q 值特征研究,地震地磁观测与研究,36(2),1~5.
 万永革,2016,地震学导论,484,北京:科学出版社.
 朱新运、刘杰、张帆,2006,基于 Aki 模型的近震 S 波尾波 Q 值求解及分析软件研制,地震研究,29(1),76~80.
 朱新运、杨钢宇、张震峰,2005,基于 Sato 模型的近震 S 波尾波 Q 值求解及分析软件研制,地震地磁观测与研究,26(3),63~70.

- Aki K, 1980, Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25Hz, *Phys Earth Planet Inter*, **21**(1), 50~60.
- Aki K, Chouet B, 1975, Origin of Coda waves; source, attenuation, and scattering effects, *J Geophys Res*, **80**(23), 3322~3342.
- Herrmann R B, 1980, Q estimates using the coda of local earthquakes, *Bull Seismol Soc Am*, **70**(2), 447~468.
- Rautian T G, Khalturin V I, 1978, The use of coda for determination of the earthquake source spectrum, *Bull Seismol Soc Am*, **68**(4), 923~948.
- Rhea S, 1984, Q determined from local earthquakes in the South Carolina Coastal plain, *Bull Seismol Soc Am*, **74**(6), 2257~2268.
- Sato H, 1977, Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation, *J Phys Earth*, **25**(1), 27~41.
- Singh S, Herrmann R B, 1983, Regionalization of crustal coda Q in the continental United States, *J Geophys Res*, **88**(B1), 527~538.

Study on Value of Coda Wave in the Northern Section of Yishu Fault Zone

*Li Jiye*¹⁾ *Sun Pengyu*²⁾ *Wu Xiaojun*³⁾ *Zhang Yanji*³⁾ *Ren Jianhui*³⁾
*Qin Liyan*³⁾ *Sun Qiang*³⁾

1) Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, China

2) Urban and Rural Construction Committee of Harbin City, Harbin 150700, China

3) Harbin Technical Center of Earthquake Prevention and Disaster Reduction, Harbin 150021, China

Abstract The study shows that when the seismic wave passes through a relatively stable area, the attenuation is not obvious and has a high value. And through the tectonic activity, the energy will be strongly attenuated and have a low value. In this paper, the Sato model was used to record more than two hundred $M_L \geq 3.0$ earthquakes recorded by 15 different stations in the north of Luobei-Tonghe area ($44^\circ \sim 49^\circ \text{N}$, $126^\circ \sim 136^\circ \text{E}$). Q_c values were analyzed and studied, and the Q value near Luobei, Heilongjiang have complexity and difference, and the reason is related to regional tectonic activity. Generally speaking, where tectonic activity and seismic activity are strong, the Q value is low. The value of coda wave of the Luobei area is much lower than that of the Tonghe area, which is related to the complex crust structure, the degree of underground media fragmentation and the change of internal stress in the Luobei and Tonghe area. This paper also discusses the relationship between the quality factor and the frequency change, and the spatial distribution characteristics of the quality factor and the Q_0 value are obtained, which can effectively analyze the process of the state of the media in the region, and which is very important for the research and prediction of the seismic activity in the Luobei area.

Key words: Northern Section of Yishu Fault Zone; Value of coda wave; Characteristic research