川滇地区上地幔顶部三维速度结构研究

魏芝 赵里* 北京大学理论与应用地球物理研究所(weizhi@pku.edu.cn)

1引言

川滇地区作为青藏高原介质向东南方向运移的重要场所,长期受印度板 块与欧亚大陆碰撞的影响,断层众多,地震频发,构造演化复杂。地震波速 度可以用于揭示深部构造分布及其演化过程。目前,川滇地区上地幔顶部高 分辨的三维速度结构尚未完善,本研究将基于大量P波和S波的绝对走时数据, 为该区上地幔顶部建立高分辨率的P波和S波速度模型,从而为理解该区的构 造与演化提供更多的信息。







Kennett et al., 1988, GJI

P波和S波速度模 型的反演流程以 及所采用的方法。

(a)图是P波走时残差在迭代反演过程中的变化。(b)图为第一轮反演后的 走时残差分布。(c)图是第一轮反演后对所有事件进行重定位(Sambridge & Kennett,2001, PAG)后继续进行第二轮反演后的走时残差分布。



使用统计分辨率矩阵法(An, 2012, GJI)对最终获取的P波和S波速度模型进行分辨率测试,得到P波和S波速度模型的最高分辨率可达0.2°×0.2°。

川滇地区上地幔顶部45-70km之间的三维P波和S波速度分布图。对比同 一深度下的P波和S波速度分布,可以看出两者具有较强的相关性;同一 深度下,不同区域的速度值差异较大,指示了川滇地区上地幔顶部具有 较强的横向不均匀性;上地幔顶部中的速度分布与地壳地质块体的稳定 性没有明显关系;川滇菱形块及其周边直接靠近Moho面的区域中存在 超低速现象,这意味着这些区域中的介质很可能呈部分熔融状态,也可 能指示了川滇菱形块体的解耦深度从下地壳延伸到了上地幔顶部;川滇 菱形块体及其周边存在一些超高速区域,这些超高速区域的存在可能对 于阻止Moho面附近的较软介质继续向下以及向东南方向运移具有重要 意义。





An, M. J., 2012. A simple method for determining the spatial resolution of a general inverse problem. Geophysical Journal International, 191(2), 849–864.

Kennett, B. L. N., Sambridge, M. S., and Williamson, P. R., 1988. Subspace methods for large inverse problems with multiple parameter classes, Geophysical Journal International, 94(2), 237-247.

Rawlinson, N., and Sambridge, M., 2004. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using a multistage fast marching method, *Geophysics*, 69(5), 1338-1350.

Sambridge, M. S., & Kennett, B. L. N., 2001. Seismic event location: nonlinear inversion using a neighbourhood algorithm, Pure and Applied Geophysics, 158(12), 241-257.

Wang, J., Xiao, Z., Liu, C., Zhao, D., & Yao, Z., 2019. Deep Learning for Picking Seismic Arrival Times. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 6612-6624.



针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

冕宁城市活动断层浅层地震探测

四川省冕宁县城区及城郊地区,地处云贵高原四川省西南部,横断山 系高山峡谷区南段,属高山、中山深切割地貌,构造复杂,变形强烈,发 育许多深大断裂,具有产生强震的地质构造背景。冕宁县自古是四川往来 于祖国西南边陲的重要通道之一,世界闻名的"西昌卫星发射基地"也坐 落在冕宁县境内。根据经济文化发展需要,有必要开展冕宁1:1万城市活 动断层探查工作,准确探明城市及附近地区活动断层分布,确定其危险性,





采取科学有效的避让防范措施,显著减轻地震灾害风险,切实提高地震灾 害防御能力,为编制冕宁县城市规划和重大建设工程选址提供科学依据。 在"冕宁1:1万城市活动断层探查项目"资助下,对冕宁县城隐伏断 裂开展了详细的浅层地震探测,布置测线12条,共23.44km,取得的探测 成果为冕宁县地震危险性评价提供了重要的基础资料。



F2-2断裂在L5线(左)和L10线(右)两条不同地震时间剖面上的显示

探测成果及初步认识:

1. 确定了断层的位置, 查明了目标区 近地表活动断层的几何结构、产状、 宽度、上断点埋深及其在地表的垂 直投影位置。

- 2. 共解释构造断点11个, 其中4个断点 为区内主要构造断点。
- 3. 探测成果证实冕宁盆地西侧不存在
- 4. 南河断裂(F2)从冕宁县城穿过, 为区域内控制盆地沉积的重要断裂, 错断第四系早期昔格达组地层,上 断点埋深29m-176m。受盆地内巨厚 砾石层影响,以及南河断裂以走滑 性质为主, 垂直断距较小等因素影 响,无法判断断裂向上是否断错晚 更新世地层。

L5线地震时间剖面图



针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

基于AsA台阵的地震识别、定位及断层几何形态拾取: 2017 Mw 6.5 九寨沟地震余震序列研究 陆威帆, 岳汉*, 周一剑

北京大学 理论与应用地球物理研究所

引言

微地震是研究地震活动性、断层几何形态以及震后断层行为的有力工具。我们在2017年九寨沟地震震源区附近部署了一个小尺度地震台阵(Array of small Array, AsA)用来监测余震活动并且研究北虎牙断裂的断层结构。 该地震台阵由小阵列组成,针对该台阵记录到的波形资料,使用几何包络 个子集,南部只有2个子集,从聚类结果上来分析,北部断层结构更为复杂。 同时,我们收集了九寨沟余震震源机制解信息,同样,北部震源机制类型更 为复杂,南部则主要以走滑为主。



线算法(Geometric Mean Envelop, GME)增强地震信号,压制脉冲噪声,获得 高质量的观测数据。我们将有效的地震事件自动检测和定位方法应用于去 噪数据,获得了准确且详细的地震目录。同时,我们发展了一套基于地震 活动性资料和震源机制资料联合确定断层几何参数的方法来确定北虎牙断 裂的特征。结果表明:(1)AsA台阵是一种有效监测余震的设计,GME算 法能够有效增强地震信号压制脉冲噪声,提高传动检测算法的检测能力。 (2)基于地震活动性和震源机制联合确定断层几何方法,能够有效降低不 确定性,获得稳定结果。(3)虎牙断裂的北端是一个复杂且年轻(较不成 熟)的断裂系统,具有多个不同倾角的断层分支。主震北部结构明显比南 部复杂。

台阵设计及降噪算法

为了获得较为准确的断层几何模型,我们发展了一种特殊的小尺度台 阵布设方法,称为AsA台阵(图1)。该台阵由9个子台阵组成,每个子台阵中 安置了8个短周期地震仪,由于口径非常小,可以对波形进行叠加及降噪。 针对于该台阵,Yue等(2018)^[1]提出一种包络几何平均加权叠加算法来压制 局部脉冲噪声(比如交通工具所产生),通过理论测试和震相拾取检测,都证 明了该方法相较于传统线性叠加方法有明显提高。在本项研究中,我们将

断层几何确定

通常确定断层几何是根据地震位置分布来进行确定,在本项研究中,我 们加入震源机制信息到确定断层几何参数过程中。我们搭建了一个包含地震 位置信息以及震源机制信息的目标函数:

$$obj = p \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{di}{\sigma_{eq}}\right)\right)^{2} + (1-p) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{i=1}^{M} \left(\frac{\cos^{-1}(V_{p} \cdot V_{f_{i}})}{\sigma_{f_{m}}}\right)\right)^{2}$$

我们首先设置了走向为140度,倾角为80度的断层进行理论测试,结果表 明联合两种数据集确定的断层几何参数与真实模型更为接近 (图4)。我们根 据余震位置分布及聚类结果,一共划分了4个子断层 (图3),将上述方法应用 子断层,获得了断层几何参数。最终我们确定了4断层的北虎牙断层模型。

此方法应用于实际数据中。



图1 AsA台阵分布图

地震检测及定位

为了获得一份较为完整及详细的地震目录,我们针对降噪数据及叠加速率数据应用一种有效的地震事件检测及完成方法。并生、通过自动需用



1. AsA台阵是一种有效的台阵布设方式,GME算法能够降低局部噪声,提高检测正确率

7 通讨联合全霍信息和霍源机制信息 能够更好协约束断层几何参数

波形致掂应用一种有效的地震事件应测及正位方法。自先,进过自动震作
拾取算法及定位方法,我们一共获得了约4000个地震事件,将这些地震事
件做为模板,我们应用了模板匹配 (Template Mathing) 算法[2]来检测更小的
地震,同时,我们还测量了差分时间,通过HypoDD获得了精定位的地震E
录 (图2)。从余震分布来看: (1) 余震呈北北西条带状分布, 长约40 km; (2
主震位于余震带中央,其西北侧有一段长约4 km的余震稀疏带;(3) 主震北
部断层几何结构更为复杂,出现多分枝结构。为了进一步分析其复杂性,
我们将基于波形相似性的聚类方法应用于余震目录,最终主震北侧被划为9

2. 通过软百术辰向芯州辰际饥刑向芯,能够丈为地约不断压几时参数
3. 北虎牙断裂是一个复杂的断层系统,整体呈现出多分支结构特征
4. 从波形聚类及断层几何形态来看,主震北侧结构相对于南部结构更为复杂
参考文献:
 Yue, H., Zhou, Y., Zhou, S., Huang, Y., Li, M., Zhou, L., & Liu, Z. (2018). The 2017 Jiuzhaigou earthquake aftershock- monitoring experimental network: Network design and signal enhancement algorithm. <i>Seismological Research Letters</i>, 89(5), 1671–1679. https://doi.org/10.1785/0220180046
 Peng, Z., & Zhao, P. (2009). Migration of early aftershocks following the 2004 parkfield earthquake. <i>Nature Geoscience</i> 2(12), 877-881.
 Long, F., Yi, G., Wang, S., Qi, Y., & Zhao, M. (2019). Geometry and tectonic deformation of the seismogenic structure for the 8 August 2017 MS 7.0 Jiuzhaigou earthquake sequence, northern Sichuan, China. Earth and Planetary Physics, 3(3), 253–267. https://doi.org/10.26464/epp2019027



针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

东南亚加里曼丹岛及邻近地区地壳Lg波Q值模型及其构造意义

罗毅^{1,2} 赵连锋² 盖增喜¹ 谢小碧³ 姚振兴²

1. 北京大学 地球与空间科学学院 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所 3. 美国加州大学圣克鲁兹分校 地球物理与行星物理研究所

研究目标和主要内容

东南亚地区位于欧亚板块、印度-澳大利亚板块、太平洋板块的交汇处, 构造叠置、多样。由于部分区域被海水和原始雨林覆盖,对现有地质块体的 边界、接触关系和构造演化等问题存在较大争议。Lg波通常用于研究大陆内 部的地壳性质,在水陆混合区域的应用较少,并且从未在东南亚地区应用。 我们利用Lg波调查东南亚地区地壳衰减结构,填补了该地区地球物理研究的 空白,拓展了Lg波的应用范围。

数据与方法

结果与讨论





图1研究区域的构造块体分布图





-6 -4 -2 0 2 4 6

图6 0.2 Hz (a-c), 1.0 Hz (d-f) 和3.0 Hz (g-i)的Q_{Lg}分布图,分 辨率测试,和对应的射线覆盖。









图7 (a) 研究区域地形图; (b-f) 分别对应(a)中5条测线的地形高程剖面 、 Q_{Lg} 在不同频率上的空间分布、S波波速剖面、P波波速异常剖面。

表1 地质构造的地壳Lg波衰减特征

编号	构造实体	年代	构造事件	衰减特征 (Q_{Lg})					
1	Bentong-Raub Line	三叠纪	古特提斯洋的闭合与巽他古陆核的 增生 ¹	弱衰减(>300)					
2	Woyla, Meratus 和 Luk-Ulo 缝合带	白垩纪	中特提斯洋的闭合1	中等衰减(100~300)					
3	苏拉威西	新生代	东西苏拉威西碰撞1	强衰减(<100)					
	结论								



▲ 图5 0.2-3.0 Hz Q_{Lg}平均值

Q值异常区域: 1. 巽它古陆核 2. 东南婆罗洲 3. 苏拉威西陆-陆碰撞带 4. 沙巴缝合带 5. 沙捞越缝合带 6. 印度-澳大利亚俯冲带

4			
1.	建立了乐图业地区苋频带(0.05-10.0Hz)现完Lg液0阻保平。		
2	检测了Io波在大陆、岛屿和群级海笛的脊髓器CTE		
5	Boyan Suture 和 Lupar Line	强衰减	(<100)
3.	区域衰减横向变化为识别地质块体的亲缘关系提供不到据。		
	"中主代"(五匕首)师信于于中安时附旧是""		

构造缝合带的年龄与Q值成正比,越古老的缝合带Q值越高。

基金资助:

国家自然科学基金(41630210, 41674060, 41974054)和中国地震科学实验场基金(2019CSES0103, 2018CESE0102, 2016CESE0203)。

参考文献:

1. Metcalfe, I. (2017). Tectonic evolution of Sundaland. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 63, 27-60.

2. Zahirovic, S., Seton, M., & Müller, R. D. (2014). The Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of Southeast

Asia. Solid Earth, 5(1), 227-273.

3. Breitfeld, H. T., Hall, R., Galin, T., Forster, M. A., & BouDagher-Fadel, M. K. (2017). A Triassic to Cretaceous

Sundaland–Pacific subduction margin in West Sarawak, Borneo. Tectonophysics, 694, 35-56.



腾冲地区三维电性结构研究

叶涛^{1,2},黄清华¹,陈小斌²,赵里¹,张勇¹,张慧茜¹ 1北京大学理论与应用地球物理研究所,北京 100871 2 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085

研究目标和主要内容

研究成果 2 — 腾冲地区三维孕震电性结构模型

腾冲地区位于青藏高原东南缘南部,同时所处印度-缅甸板块侧向挤压 东缘。受控于双重的地球动力学背景,该区地震活动十分频繁,同时还有 著名的腾冲第四纪板内火山活动。

●2011年腾冲5级双震



为系统探讨腾冲地区地震孕震结构及发震机制,以及腾冲火山深部构 造特征,研究团队近年来在滇西腾冲地区开展了阵列式大地电磁测深(MT) 数据观测,应用三维MT反演技术获得了腾冲地区精细三维电阻率结构。

研究区 & MT 数据



● 腾冲火山(红色三角所示) 东西宽50 km, 南北长90 km, 范围内共有68座有明显山 体的火山.

- 腾冲地区地震
 - 2011年腾冲5级双震
 - 2008-2014盈江6次中强地震
 - 1976年龙陵2次7级大震.
 - MT阵列观测 观测时间: 2011-2013年;

2015-2017年. 测点数: BBMT (170); LMT (9) 观测仪器: GMS-07e系统; V5-2000系统; LEMI-417系统

研究成果1-腾冲火山区三维地壳岩浆囊电性模型







导带与所围高阻体的边界,沿高阻异常体呈环 形分布。盈江地震的孕震电性结构具有统一性.

参考文献:

□ 龙陵地震区表现为地壳尺度的高阻结构(对 应力学刚性),因此具有大震发生的孕育介 质条件。两次大震均发生于龙陵高阻体内.

总结与展望

本研究基于腾冲地区MT阵列数据,利用大地电磁测深三维反演技术,分别对腾冲火山区结 构,地震孕震结构进行了全面系统地剖析。为滇西腾冲区未来的地震活动和火山活动预测提供了三

图3. 腾冲火山区及保山地块地壳电阻率等值面图(电阻率:10 Ωm)

维精细深部结构指导依据。 然而,由于本研究的探测深度主要为地壳尺度,未来将开展腾冲地区长周期大地电磁观测研 究,以期获得腾冲地区更深范围的电性结构,并对腾冲火山成因机制等科学问题做进一步研究。

- 1. Ye T., Huang, Q*., Chen, X., Zhang, H., Chen, Y., Zhang, Y., & Zhao, L. (2018). Magma Chambers and Crustal Channel Flow Structures in the Tengchong Volcano Area From 3-D MT Inversion at the Intracontinental Block Boundary Southeast of the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 123, 11, 112-11, 126.
- 2. Ye, T., Chen, X*., Huang, Q*., Zhao, L., Zhang, Y., & Uyeshima, M. (2020). Bifurcated crustal channel flow and seismogenic structures of intraplate earthquakes in western Yunnan, China as revealed by three-dimensional magnetotelluric imaging. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125, e2019JB018991.

Co-seismic surface ruptures of the 1738 AD *Ms* **7.6 Dangjiang earthquake in the northwest continuation of the Xianshuihe fault zone** in Central Tibetan Plateau, and its implications for the seismic hazard assessment

> ZhongyuanYu^{a, b}, Peng Xiao^{a, b}, Jun Shen^{a, b}, Xuankai Jiao^b, Na Yin^{b,c} ^a College of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Yanjiao Development Zone, Sanhe 065201, China ^b Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, China ^c College of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention, Yanjiao Development Zone, Sanhe 065201, China

The role of regional intracontinental strike-slip faults at high-altitude area in absorbing strain resulting from the Plates convergence has yet to be scientific understood. The Dang Jiang Fault (DJF), as the northwestern continuation of the Xianshuihe Fault Zone (XFZ) in central Qinghai-Tibetan Plateau, may provide an excellent testing ground for this question given its relatively high slip rate, absence of dense vegetative cover, minimal cultural modification, and possible relationship with 1738 AD Dangjiang destructive earthquake, while the seismotectonics and the co-seismic surface ruptures of which still remains obscure. Thus, field investigations are conducted bearing on the fault-rupture characteristics during this research. The new synthesized data from geologic observations, historical literature reviews, geomorphic mapping, trench logging and the dating of samples indicates that the 1738 AD Dangjiang earthquake produced ~100 km-long surface rupture zone that constitutes of diagrammatic features of recent displacement such as systematically offset or deflected gullies, linear scarps and troughs, sag ponds, en echelon fractures and pressure ridges. The magnitude of the 1738 AD Dangjiang earthquake is estimated as Ms 7.6 with an average and the maximum strike-slip displacement $\sim 2.1 \pm 0.1$ m and $\sim 3.3 \pm 0.1$ m, respectively. The DJF has undergone strong tectonic deformation in Late Quaternary with an estimated average slip rate of ~6-9 mm/yr. The recurrence probability of a strong earthquake along the Dangjiang segment cannot be underestimated. The research also hints that the repeated left-lateral strike-slip seismic slip of the DJF and other sections of the XFZ along the southern boundary of the Bayan Har Block have been releasing the strain generated by the continuous northward impingement of the Indian Plate into the Eurasian Plate.





Fig.4 Observed surface ruptures produced by the 1738 AD Ms 7.6 Dangjiang earthquake

all interested readers to contact us by *e-mail* welcome (yuyangzi9811@126.com) and telephone (010-61594345, 13796602826).



Converging frontier technologies of continental earthquake science. Developing full-chain systematic studies towards strong earthquake risk

R&D Objectives and Subjects

The 2019 M_W 5.7 Changning Earthquake, Sichuan Basin, China: A Shallow Doublet With Different Faulting Styles Junqing Liu^{1*}, Jiří Zahradník² 1. Jilin Earthquake Agency, China Earthquake Administration, Changchun, China. 2. Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czech Republic

Source Models of the Mainshock

Our waveform data of the M 6.0 mainshock consist of 12 broadband records at epicentral distances ~120–210 km (Fig. 4c). Several velocity models were tested, providing qualitatively the same results. The waveform modeling is performed with established methods^[3] and recently developed uncertainty assessments. We perform single point source and multi point source inversion respectively.





Abstract The M_W 5.7 earthquake on June 17, 2019, is the largest event ever reported there. Moment tensor of the mainshock was remarkably dominated by a compensated linear vector dipole. It was a doublet, allowing approximation by a thrust (TF)- and strike- slip (SS) subevent. The mainshock nucleated as thrust faulting, can be linked with previous reverse faults, oriented to regional stress field. Contrarily, the strike- slip one less favorably oriented. The strike- slip fault, not yet mapped in the region, is a new feature, important for future hazard assessment.

Intruduction On June 17, 2019, an M_W 5.7 (M 6.0) earthquake occurred in Changning county, which belongs to a salt- producing areas. Increased seismicity has been recognized in the last ~ 10 years, likely related to the long- lasting water injection in the Changning salt mines^{[1].}

The contemporary evidence that injection can cause earthquakes is undoubted ^[2], very little is known about relatively large earthquakes occurring in regions previously activated by injection activities and thus far experiencing only smaller events. How is their rupture nucleating, propagating, and eventually causing aftershocks? Therefore, we focus on the source process of the 2019 Changning $M_{\rm W}$ 5.0 event and its M 5+ aftershocks. We resolve spatiotemporal complexity of the mainshock and causative faults. Finally, we demonstrate that the SS segment of the mainshock is suboptimally oriented to the regional stress field, indicating possible pore pressure effects.



Fig. 2, Fig. 3 Single- point source analysis of the mainshock (0.03-0.06 Hz). The models pointed to a highly non- DC solution. In this depth range, the DC part of the full MT is low $(\sim 10\%)$, and it varies from TF to SS faulting (Fig. 2, Fig. 3). The formally best- fit solution is found at the depth of 4 km, consisting of DC=20%, CLVD=-68%, and ISO = -12%. The waveform fit ofour model is very good (Fig. 4).





Fig. 1 The 2019 Changning earthquake sequence. The MW 5.7 mainshock



Fig. 4 Waveform inversion of the mainshock

Fig. 3. Multiple- point source modeling of the mainshock on a horizontal line grid by three methods (depth of 4 km, 0.03–0.10 Hz).

Extending the frequency range of the waveform inversion, the source appears to be composed of several subevents. We present multiple- point source models for a horizontal line grid at a depth of 4 km. We choose azimuth of 120°, close to the aftershock alignment. Using iterative deconvolution, the model suggests two subevents (Fig. 3): a dominant SS, slightly NW shifted relative to the epicenter, and a weaker thrust fault, shifted to SE.

Conclusions The M_W 5.7 mainshock nucleated as a thrust fault, well oriented to the regional stress field. Then, within a few seconds and a few kilometers, it progressed toward the northwest as an SS rupture. The SS faulting, less favorably oriented to regional stress than TF, was probably facilitated by the

was followed by an aftershock sequence (Pink point cloud, Fig. 1b), including four M 5+ events, forming a clear line structure, ~20 km long. This trend coincides with the major tectonic element of the area, the Changning anticline. The event is noteworthy for a very large compensated - linear - vector - dipole (CLVD) component of its single- point source model. This significant non- double- couple (non- DC) character of the event may explain great scatter between the strike/dip/rake angles reported by several agencies (Fig. 1a). It also explains why first- motion polarities do not fit with the full MT (Fig. 1c) elevated pore pressure due to previous water injections.

References

1. Sun, X., Yang, P., & Zhang, Z. (2017). A study of earthquakes induced by water injection in the Changning salt mine area, SW China. Journal of Asian Earth Sciences, 136, 102-109. 2. Ellsworth, W. L. (2013). Injection- induced earthquakes. Science, 341, 1225942. 3. Sokos, E., Kiratzi, A., Gallovič, F., Zahradník, J., Serpetsidaki, A., Plicka, V., ... & Tselentis, G. A. (2015). Rupture process of the 2014 Cephalonia, Greece, earthquake doublet (Mw6) as inferred from regional and local seismic data. *Tectonophysics*, 656, 131-141.

小江断裂带的微震活动性及其地震危险性:来自弱耦合次级结构的影响



周一剑¹,岳汉¹,周仕勇¹,赵里¹,杨周胜²,姚远²

1北京大学理论与应用地球物理研究所,100871 2云南省地震局

联系方式: yijian_zhou@pku.edu.cn



1. 摘要

小江断裂带位于青藏高原的东南缘,是华南块体与川滇块体 交接的一部分。由于小江断裂带的历史强震活动频繁,其地震 危险性评估具有重要的科学意义与社会意义。在本研究中,我 们利用密集的宽频带地震观测对小江断裂带的微震活动性进行 了系统的检测,并通过微震活动性推测其结构特征与滑动行为。 基于最新开发的针对原始波形的检测与定位算法,我们获得了 超过13,000个定位约束良好的微震事件。微震活动性显示出了 大量存在的主断层外的次级结构;而主断层呈现强闭锁的状态, 其微震活动性较弱。为了探究两种结构的应力状态与滑动行为 的差异,我们计算了b值的空间分布,并分析了重复地震的活 动行为。我们在主断层外的次级断层上观察到了如下现象:较 高的微震活动性,较高的b值,以及不规律的重复地震活动。 结合其他地震学以及水文观测,我们认为次级断层产生于软弱。 的地壳介质,并存在分布式剪切形变,从而造成了弱耦合应力 状态。这可能成为未来大震破裂的"应力障碍"。而主断层上 的微震呈丛集式分布, 丛集分布于斜交断层与主断层的交叉点, 显示出两平行主断层分支间的次级旋转块体,以及断层交叉处 的破碎结构。主断层上的丛集深度随走向变化,显示了闭锁深。 度的变化。主断层上的低活动性与低b值显示出较高的应力水 平。这与前人所估算出的高应变积累相符。据此,我们认为小 江断裂带可能在短期内发生M>7的大震。







图1. (a) 川滇区域构造背景。活动块体以色块表示。鲜水河、安宁河-则木河, 以及小江断裂带以加粗的黑色实线标注。(b)区域地震活动性与b值分布。b值 以颜色标注,红色圆点表示2009-2019年M1.6-7.2地震的分布。

5.1 地震定位: 活动性空间特征

图2. 小江地震台网。蓝色与红色三角形 分别表示南段和北段的地震台站。灰色 圆点为本研究检测到的微震事件。M≥6 的历史地震事件以红色五角星标注。黑 色实线为活动断层。

5.3 b值分布

4. 地震检测与定位方法



Assessment, Journal of Geophysical Research: Solid Earth

	主断层	次级断层
所层结构	1. 平行分支间形成旋转子块体 2. 子断层交叉处形成破碎结构	1. 平面形态的浅层结构 2. 多子断层系统
骨动行为	1. 闭锁深度沿走向变化 2. 历史强震区呈强闭锁状态	1. 浅层蠕滑 2. 间歇性慢滑移事件
迈水平	1. 高断层强度 2. 高应力水平	1. 弱断层耦合 2. 低应力水平

针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

中国地震局成都青藏高原地震研究所(中国地震科学实验场成都基地) Chengdu Institute of the Tibetan Plateau Earthquake Research, CEA

反

(以青藏高原及	、东缘为研	究主体	,辐射周缘	
	依 托:中国地震和	科学实验场、国	國家地震科技	创新工程	
	研究方向・快休运动	他球动力学	忚霅机理	地震灾宝风险与 3	は笨

'听九刀'PJ · 坎仲烂纠 , 心坏纠刀子 , 心辰们庄 , 心辰类古凡悭刁刈束

科技目标:提升区域地震灾害综合防治能力 提升防范化解地震灾害 风险的科技支撑能力

社会目标:服务西部大开发、成渝双城经济圈、能源开发、川藏铁路

管理体制

人员编制

◆ 研究青藏高原大震发生条件和动力学过程 ◆ 探索区域深部孕震构造与动力学环境
 ◆ 服务于川藏铁路、一带一路等重大工程 ◆ 对接、协调、完成中国地震科学实验场相 关工作

2

主要成员近五年业务成果

	■副所长:徐锐	■室主任:胡斌	■室主任:陈聪	50° 45°	
	 工作经历:①减灾救助研究所副所长;②川滇国家地震预报 实验场四川分中心副主任(临时负责);③中国地震局成都 青藏高原地震研究所副所长 	 工作经历:①四川省地震局减灾救助研究所, 高级工程师;②中国地震局成都青藏高原地 震研究所,地震灾害风险与对策研究室 	✓ 工作经历:①减灾救助研究所GPS中心数据分析人员 ②川滇国家地震预报实验场四川分中心GPS中心主任 ③中国地震局成都青藏高原地震研究所,块体运动与		E C (B)
	 二区文章(近五年,第一作者):JGR 2篇、G-cubed 1篇; 基金项目(近五年,项目负责人):国家自然科学基金青年 	; 文章级别及数量(近五年):发表核心期刊1 	形变研究室	30° - • M _w <=6 • 6 <m<sub>w<=7</m<sub>	
	基金(1项)、国家自然科学基金重点基金分项(1项)、国家自然科学基金面上项目(1项,2020获批)	篇。 《承扣项目和莽牧情况(近五年) · 承扣由国	✓ 又草(近五年):第一作者3篇;其他排位1篇SCI,1 篇EI,2篇核心。	25° 20° ● M _w >7	Extension 4
■ 所长: 廖华(研究员)	 一 晋通出国访问:麻省理工学院(12个月)、弗吉尼亚理工大学(12个月) 特邀出国访问:弗吉尼亚理工大学(30天)。 	地震局重点专项、技术支撑项目三项,制订 地方标准一项,行业标准一项	✓ 项目(近五年):四川省地震局科技专项2项(主持);国家自然科学基金面上项目、青年项目(骨)	15° 1 0° 100° 110° 120° 130° 140'	o The second sec
 ✓ 工作经历:①工程地震研究院院长;②川 □ 1000 <	GFZ(60天)、马达加斯加IOGA天文台(30天)、德国地子中心 GFZ(60天)、马达加斯加IOGA天文台(30天) 〈荣誉:全国青年岗位能手(四川省排名:1)、中国地震局	· 获奖情况:中国地震局防震减灾优秀成果二	干)、国家重点研发计划专项(参与);星火攻关项 目(骨干);	Rui & Stamps , G-cubed(2019)	Rui & Stamps ,JGR(2019)
③减灾救助研究所所长;④中国地震局成 都青藏高原地震研究所所长	防震减灾优秀人才"百人计划"、中国地震局"青年人才" <tr <p< td=""><td>守尖、目纵科子仅不尖—守尖。</td><td>✓ 获奖情况(近五年):全国地震监测预报工作质量评估GNSS基准站运行评比泸州台第二名、筠连台第二</td><td></td><td></td></p<>	守尖、目纵科子仅不尖—守尖。	✓ 获奖情况(近五年):全国地震监测预报工作质量评估GNSS基准站运行评比泸州台第二名、筠连台第二		
✓ 文章 (近五年 , 通讯作者) : SCI 2篇	· 英尼·中国地震周星大门划攻失项目(页页大)2项,成制 经济圈防震减灾十四五规划(编写组组长)。		名(排名第一);省直机关优秀共青团干部。	(a) 102°30′E 103°00′ 103°30′ O'N Before M7.0 20090101 ~20130419 71 71 71 71 71 71 71 71 71 71	103*12 103*36′ 104*00′ 104*24′ F1 应力降/MPa 7.0
✓ 项目(近五年 , 项目负责人):中国地震			30°30		$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
科学实验场项目1项(200万元);国家重 点研发计划课题一项(265万元):局所课	■副所长:吴微微	■室主任:李大虎	■室主任:梁明剑	F_1 F_2	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
题一项(财政部专项,346万元);中石油 页岩气课题一项(552万元)。	✓ 工作经历:①地震监测中心大震速报员;②川滇 国家地震预报实验场四川分中心科研部主任;③ 川滇国家地震预报实验场四川分中心副主任;④	✓ 工作经历:①四川地震局工程地震研究院;②川 滇国家地震预报实验场四川分中心;③中国地震 局成都青藏高原地震研究所,高原地球动力学研	✓ 工作经历:①四川省地震局工程地震研究院;② 3000 四川省地震预报研究中心;③中国地震局成都青 藏高原地震研究所,非天然地震研究室	$D' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0$	$\begin{array}{c} 00' \\ 00' \\ 00' \\ 014.2 \\ 021 \\ 014.5 \\ 017 \\ 014.5 \\ 017 \\ 018 \\$
	四川省地震预报研究中心副主任;⑤中国地震局成都青藏高原地震研究所副所长	究室 ✓ 文章 (近五年 , 第一作者) : SCI 6篇 (3篇英文	✓ 文章 (近五年 , 第一作者) : SCI 2篇 , EI 2篇。	D' 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
	✓ 文章(近五年,第一作者):SCI4篇;EI2篇; 核心2篇;会议论文及报告9篇;	SCI);中文核心7篇;国内外会议论文及报告8篇。	✓ 项目(近五年,负责人):地震科技星火攻关项 目1项;地震动力学国家重点实验室开放项目1项;	City Seismic station ML 5.0 4.0 3.0 2.0 -1.8 -1.4 -1.0 -0.6 -0.2 0.2 0.6 1.0 1.4 1.8	103°12 103°36' 104°00' 104°24' 震中 ○ ○ ★ ◆ ◆ M = 5.0~5.94.0~4.93.0~3.9 断裂 推测断裂 主震 ◆ ◆ 机制解
联系万式	✓ 刊物:9本;	✓ 项目(近五年,项目负责人):国家自然科学基金面上项目(41974066)1项、国家重点研发计划项目子专题1项、中国地震局地震科技星火计划	✓ 获奖情况(近三年):四川省地震防震减灾科技 成果一等奖1项。	log10(Δσ)(MPa) Wu et.al , 2020	吴微微等,2020
	✓ 项目 (近五年 , 项目负责人) : 中国地震科学实	攻关项目1项、中国地震局地震科技星火计划青年			

◆ 负责项目申报、成果转化、发展规划、

◆ 负责四川省地震学会相关工作

学术交流与合作

验场项目1项;中国地震局地震科技星火计划攻关 项目1项、中国地震局地震科技星火计划青年项目 1项;省级防震减灾重点建设工程项目1项;中国 地震局地质研究所基本科研业务费专项子项目1项; 中国地震局预测研究所基本科研业务费专项子项 目1项;四川省地震局地震科技专项2项;中国地 震局测震台网青年骨干培养专项1项;

获奖情况 (近三年):四川省地震局科技成果奖 一等奖1项(排名第一);二等奖2项(排名第一、 排名第五);

′软著:1项(排名第一)。

项目2项、四川省2020年度科技应用基础研究项目 1项、四川省2019年度留学回国人员科技活动择优 资助项目1项、中央级公益性科研院所2019年度基 本科研业务专项子专题1项、中国地震局测震台网 青年骨干专项1项。

✓ 获奖情况 (近三年):四川省地震局科技成果奖 一等奖1项 (排名第一);四川省地震局优秀科技 论文奖2项;

✓ 国家实用新型发型专利1项, 软著2项。

1.5 1.0

◆ 研究建筑物地震灾害模拟方法

◆ 服务于地震灾害风险防治

◆ 探索基于情景构建的VR/AR技术

李大虎等,2019

李大虎等,2020

梁明剑等,2020

川滇实验场地壳应力状态研究

川滇实验场地壳应力状态

本研究按三个层次分别给出了川滇实验场、南北地震带中段和南段、 菱形块体东边界主要断裂带局部地区实测地应力随深度的变化、深浅部应 力状态对比。

基于应力分析的断层稳定性研判

基于应力分析的断层稳定性研判方法

S₁、S₃为最大、最小主应力 当应力类型分别为逆断、正断、 走滑时,S₁分别对应S_H、S_V、S_H, S₃分别对应S_V、S_h、S_h。

研究区应力分布与特征

川滇实验场应力场数值模拟

建立了3D数值模型,以实测应力目标约束模拟了地壳应力场

中国大陆及各研究区µ_m特征

结果显示安宁河断裂带、川滇实验场、中国大陆地区 μ_{m} 平均值基本一致, 小江断裂带略低。

研究团队: 黄禄渊、杨树新、姚瑞、米琦、孔维林

水平最大、最小主应力云图与方位(2km 埋深, 单位Pa)

> 给出了研究区现今原地应力场的绝对量值估计

> 为研究区地壳动力学研究提供了力学依据

课题组长期致力于岩石圈应力的理论方法、地应力测量技术方法、

地震动力过程数值模拟等方面的研究工作。研究方向包括:

1) 中国陆域岩石圈数值应力场研究

2)基于InSAR/GNSS观测的重点区域地壳应力应变场动态特征研究

3) 地壳应力应变与地震动力学成因研究

4) 基于应力分析的断层活动研判技术方法研究

针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

利用亚失稳台站研究滇西北地区地震活动性的一些进展

The seismic activity in northwest Yunnan by using the sub-instability station 陈佳、张天继、李雷、金明培 云南省地震局

研究目标和主要内容

利用亚失稳台站记录的2018年4月至2020年9月的中小地震(M≥-1.4) 的震相数据,采用Hypo2000、HypoDD定位方法对滇西北地区(25°-27°N, 99°-101°E)小震数据分析并进行重新定位。结果显示: 滇西北地区新的 密集台站记录的小震,完备震级达0.8级。地震重定位后,地震空间展布更 加集中,线性较好,更能精确反映当地活动断裂精细展布。从深度分布上看, 优势深度为5-10km。密集台阵及小震空间分布,为后期断裂三维空间展布提 供了可靠数据。下一步工作结合地震活动性,对滇西北地区存在强震危险区 进行分析。

取得进展和科技成果

本文研究区域为滇西北, 地震震相数据来源于亚失稳台阵中30个台和云 南区域台网、小孔径台站的12个台站(图1),共记录了从2018年4月至2020 年9月的M≥-1.4级地震18630个地震,月均值618个,是固定台站记录地震的 3倍,完备震级由台网目录的M1.3(刘自凤,2019)提高至M0.8级(图3), 记录的最小震级为M-1.4级。

F2: 兰坪-水平断裂 F3: 维西-乔后-巍山断裂 F4: 龙蟠-乔后断裂 F5: 剑川-文化断裂

图3: 震级频度分布图

和张中杰(2005)人工地震测深的结果,将3个结果做平均作为本文的参考 模型。

图2: 地壳速度模型

总结:

利用更加密集的亚失稳台站对滇西北地区小震进行分析后,有如下结果。 1) 滇西北地区地震完备震级由台网目录的M1.3提升至MO.8级。 2) 经过重新定位后, 地震空间分布更加集中, 线性展布更细致, 更能刻画断 裂的空间展布,下一步工作将结合深度更加精细刻画断裂展布情况。 3)从维西-乔后-巍山断裂剖面上看,重定位后地震分布在20km之上,优势深 度为5-10km。

1、张中杰,白志明,王椿镛,等.2005.三江地区地壳结构及动力学意义:云南遮放-宾川地震反射/折射剖面的启示[J].中国 科学(D辑),35(4),314-319. 2、胡鸿翔,陆涵行,王椿镛,等.1986.滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J].地球物理学报,29:133-144. 3、林中洋,胡鸿翔,张文彬,等.1993.滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J].地震学报,15(3):427-440.

4. Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern

Hayward fault, California[J]. Bull Seismol Soc Am, 2000, 90(6):1353-1368. 5、刘自凤,付虹,彭关灵,等. 2014年云南3次强震前后震源机制一致性时空演化特征. 2020. 地震研究. 43(2):348-354 6、张天继,金明培,刘自凤,等. 滇西北地区地壳厚度和泊松比分布及其意义. 地震研究, 43(1):10-18. 7、闫坤.北天山中段微震检测和地震活动性研究.中国地震局地震预测研究所,博士论文 8、郭浩. 板块边界断层区高精度滴孩子呢定位和层析成像研究. 中国科学技术大学, 博士论文

Converging frontier technologies of continental earthquake science. Developing full-chain systematic studies towards strong earthquake risk

Estimation of the Parameters of Historical Earthquakes with a New Attenuation Equation in Yunnan Province, China

> Guoliang Lin^{1, 2}, Jian Wang¹ 1.Institute of Geophysics, China Earthquake Administration 2. Yunnan Earthquake Agency

> > M_I

Abstract

From 2000 to 2018, there are 25 instrumentally recorded earthquakes with M_s

We take the epicenter at a given grid point P and choose equation (3) as the attenuation equation. Then we choose n surveyed intensity points, which have epicentral distances Δ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), and calculate the intensity magnitude M_I

5.0 to 6.6 in Yunnan. Based on those earthquake parameters and valuable intensity data, a new intensity attenuation equation has been established. The result shows the optimal intensity magnitude M_I can be calculated from the mean of $M_i = (I - I)$ $2.1113 + 0.0412\Delta_i + 1.3717lg\Delta_i)/1.1641$, in which Δ_i is the distance between the epicenter and the surveyed seismic point. By adapting the method proposed by Bakun and Wentworh (1997) for determining earthquake source parameters directly from historical intensity data, we have tested retrospectively the new attenuation on the 25 instrumentally recorded earthquakes. Then this attenuation has been applied to deal with the parameters of two historical earthquakes, the 26 February 1713 Xundian earthquake and the 11 May 1909 Huaning earthquake. Our results reduced the uncertainty of previously estimated parameters which were large. The amended parameters will be valuable for seismic hazard analysis and earthquake disaster reduction.

Datasets

In Yunnan province, total of 25 earthquakes with that occurred from 2000 to 2018, for which seismic intensity data were also available, were selected for analysis. Table 1 shows a list of these earthquakes including information on their time of occurrence, epicentral coordinates, depth and instrumental magnitude Ms, as provided by the China Earthquake Network Center. The number of locations of surveyed intensity that were used to develop the intensity attenuation equation is listed in Table 2. Figure 1 shows the epicenters and the surveyed intensity points of

$$= mean(M_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad where M_i = (I_i - a - c * \Delta_i - d * lg\Delta_i)/b \quad (4)$$
$$rms(M_I - M_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_I - M_i)^2}{n^2}} \quad (5)$$

The intensity points with different epicentral distance affect the magnitude and location estimation differently in that the theoretical intensity points near the assumed epicenter are more sensitive to the estimation. In order to estimate the epicentral region most effectively, equation (5) can be slightly modified by applying cosine weighting function W_i as introduced by Bakun and Wentworth (1997).

$$W_{i} = \begin{cases} a + \cos\left[\frac{\Delta_{i}}{b} \times \frac{\pi}{2}\right] & \Delta < b \\ a & \Delta > b \end{cases}$$
(6)

Where *a* is a constant and *b* is a distance factor. Then equation (5) can be modified as:

$$ms(M_{I} - M_{i}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} W_{i}^{2} \times (M_{I} - M_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} W_{i}^{2}}}$$
(7)

Estimating the parameters of historical earthquake

We apply the newly established intensity attenuation equation to determine the magnitudes and epicentral regions of two historical earthquakes in Yunnan, for which the previous estimates are associated with large uncertainty.

Attenuation models

A suitable intensity attenuation model can be used to estimate accurately the epicentral region and the magnitude of historical earthquakes. Bakun and Wentworth (1997) introduced a method to determine historical earthquake magnitude and epicenter directly from the intensity data points, skipping the step of drawing isoseismal lines. This method has been used in California, the Pacific Northwest of the U.S, central Europe and South America (Parsons et al., 2000; Bakun et al., 2002, 2003; Hinzen and Oemisch, 2001; Lucio et al., 2019). We tried Bakun and Wentworth equation models for Yunnan as the above researcher used. And the least-squares fitting method is applied for regression analysis using the intensity data of 25 earthquakes. The intensity attenuation equations in Yunnan province can be described as follows:

Figure 2. Contour maps of magnitudes and locations of two historical earthquakes: (a) the 26 February 1713 magnitude 6³/₄ Xundian earthquake, (b) the 11 May 1909 magnitude 6¹/₂ Huaning earthquake. The seismic intensities are of The innermost, middle, and outermost color regions show the rms[M₁] contours corresponding to 50%, 80% and 95% confidence levels for locations, respectively. The red filled stars give the macroseismic epicenter from the Chinese earthory red triangles show determined locations of the epicenters with the smallest $rms[M_1]$

Conclusion

We apply the newly established intensity attenuation equation to determine the magnitudes and epicentral regions of two historical earthquakes in Yunnan, for which the previous estimates are associated with large uncertainty. The magnitude and epicentral regions of the 25 instrumentally recorded earthquakes are estimated. The $rms[M_s - M_I] = 0.292$, compared to 0.13 for M>5.5 and 0.29 for M<5.5 derived for California by Bakun and Wentworth (1997). We believe that the value is slightly higher because we do not consider site correction. Most of the epicenters are within 50% confidence level, some are outside but within 80% confidence level. We also use this method to revise the earthquake parameters for two historical earthquakes. The epicenter for the 1713 Xundian earthquake is about 20 km SW of the 4th Chinese Earthquake Catalogue, and the intensity magnitude is 7.0. A new epicenter and magnitude are also determined for the 1909 Huaning earthquake.

 $I = 0.8051 + 1.2226 * M - 0.0756 * \Delta_{median}$ $I = 3.6724 + 1.0525 * M - 2.8034 * lg\Delta_{median}$ (2) $I = 2.1113 + 1.1641 * M - 0.0412 * \Delta_{median} - 1.3717 * lg\Delta_{median} (3)$

References

- 1. Bakun, W.H, Wentworth, C.M.(1997). Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. Bull Seism Soc Am, 86(6):1502-1521.
- 2. Bakun, W.H, Haugerud, M.G, Hopper, M.G. (2002). The December 1872 Washington state earthquake. Bull Seism Soc Am,92(8),3239-3258.
- 3. Lucio, Quadros, Marcelo Assumpcao, Ana Paula Trindade de Souza. (2019). Seismic intensity attenuation for intraplate earthquakes in Brazil with the re-evaluation of Historical Seismicity. Seismological Research Letters, 90(6),2217-2226. 4. Wang, J.(2004). Historical Earthquake Investigation and Research in China. ANNALS OF GEOPHYSICS. 47(2/3), 831-838.

针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

新一代中国地震动参数区划图智能信息服务系统

陈波 高孟潭 吴健 俞言祥 温增平

中国地震局地球物理研究所

财产安全和社会经济可 持续发展的重要标准。

《人民日报》公告新一代地震区划图正式实施时,特别提到公众可以 通过网站和手机终端应用软件初步了解自家房屋的抗震要求及相应的 地震动参数,这是我国首次实现通过智能终端和互联网技术辅助中国 地震动参数区划图提供服务,可以为开展中国地震科学实验场提供辅 助技术支撑。

【文化 12 2016年6月1日 星期三

地震区划是根据地震危险性

经济社会发展、

科学研究进步,提高非

整体抗震设防水平很少

第五代地震区划图主要包括 。"两图"是指《中国地震动峰值

整体抗震设防水平很少 科字研究进步,提高表

图为

□ 目前, Android和iOS版本的APP均可在华为、百度、91助手、 Apple App Store等应用商店搜索"地震动参数区划"下载,另外 开发了微信小程序(打开微信"扫一扫"下图二维码)。专业版APP 将提供更丰富的功能,可联系作者注册账号。

将本抗五筑地 也也必必 两加国的震代物震 震国要 图速土地设地的区	地区抗震设防长期缺乏管理,房屋建筑地 震风险大。建造抗震能力高的建筑,是减 轻震害的重要途径,而建筑物抗震设防的 主要依据是地震动参数区划图。新的经 济和社会发展环境下,有必要适当提高我 国的整体抗震设防水平。 2007年,我国开始新一代地震区划图 的组织编制工作,把生命安全当作首要考 虑因素,以建筑物抗倒塌作为编图的基本 准则。新一代地震区划图将广泛用于包 括国土利用规划在内的各类规划制定、新 建建设工程抗震设防、城市老旧危房改 造、重大建设工程选址、农村安全农居建 设、城市重大地震风险源排查以及地震灾 害应急准备等方面。	用、基本地震作用、罕遇地震作用和极罕 遇地震作用。根据我国的抗震设计实践, 当建筑物遭遇多遇地震作用时要求不坏, 当建筑物遭遇基本地震作用时可修,当建 筑物遭遇罕遇地震作用时要求不倒。 高孟潭介绍,新地震区划图在原有的 三级地震作用的基础上还考虑了极罕遇 地震作用,便于在国土利用规划和应急备 灾中考虑小概率但后果不可接受的地震 事件的影响。 最后,新一代地震区划图还给出了全 国每个具体街道乡镇的地震动参数,引导 社会更加关注广大农村的地震安全,抗震 设防的可操作性得到了增强。	聚焦5G	5月31日,第一届全球5G大会在北京召开,本届大会以"构建5G技术生 主题,旨在引导全球统一5G技术标准形成,促进全球5G产业及应用发展。 当日,与会者在会场外特设的国内外主流企业5G技术展区交流。 新华社记者 李 黛
2 回 2 要 两图两	括国土利用规划在内的各类规划制定、新 建建设工程抗震设防、城市老旧危房改 造、重大建设工程选址、农村安全农居建 设、城市重大地震风险源排查以及地震灾	最后,新一代地囊区划图还给出了全 国每个具体街道乡镇的地震动参数,引导 社会更加关注广大农村的地震安全,抗震 设防的可操作性得到了增强。	経用つけ	当日,与会者在会场外排设的国内外主流会业3G技术展区交流。 新华社记者 李 重
			IX # C	

- 借助日益普及的移动智能终端和快速发展的互联网技术,面向公众 服务和行业应用,组织研发了地震动参数区划图APP(Android和iOS) 版)及B/S架构的数据库管理系统,对新一代区划图所涉及的"四级 地震作用"、"土层影响双参数调整"等技术方法进行无纸化、自 动化和智能化处理。
- □ 针对市县基层防震减灾管理工作的特点和需求,为新一代区划图提 供了一套实用的信息服务系统。该服务系统在部分市县工作部门进 行了推广和试用,取得了良好的效果。

村镇地震区划管理

·地震区划参数查询

·一站式行政许可文件输出

陈波, 高孟潭, 吴健, 俞言祥, 温增平, 高杰. 基于智能终端和互联网的中国 地震动参数区划图服务系统[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(03): 697-708.

Email : chenbo@cea-igp.ac.cn

鲁甸地震前巧家台阵观测到的中小地震频次增加和应变释放加速现象研究

陈学忠,李艳娥,陈丽娟

研究目标和主要内容

利用2012年3月-2019年12月巧家台阵观测到的地震活动资料,分析了 鲁甸地震前巧家台阵观测到的地震活动频次以及地震应变释放。结果显示: (1) 0.8级以上小震频次, 深部(震源深度h≥10km)和浅部均增强明显; (2) 鲁甸Ms6.5级地震前,深部(震源深度h≥10km)地震K值出现了明显 的逐渐上升过程,而浅部(震源深度在10km以内)地震K值则没有明显变 化,保持平稳。表明深部地震活动应变释放存在加速过程,而浅部地震活

利用研究区内地震目录,考虑到较大震级的地震对应变释放的影 响,分析中主要关注 M_{L} 4级以下的小地震,取震级范围0.8 $\leq M_{L} \leq 3.9$ 内的 地震。去掉鲁甸地震破裂区内地震之后,分别统计深度在0≤h<10km和 h≥10km内的地震的应变释放,得到的结果见图3a,由此得到的累积应 变释放曲线见图3b.图4为小震频次随时间变化和累积应变释放斜率K值 随时间变化曲线。

动则没有明显的加减、速过程,保持平稳。

地震, 黄色五角星为2014年8月3日鲁甸6.5级地震

选取巧家台网范围及附近地区为研究区域,G-R关系结果显示 完整性震级 $M_0=0.8$

图4、研究区小震频次随时间变化(左图),K值随时间变化

结论和讨论

结果显示, 2014年8月3日云南鲁甸Ms6.5级地震前, 深部和浅部的小震 频次均出现增强现象,深部地震应变释放斜率K值出现了明显的逐渐上升过 程,而浅部地震*K*值则没有明显变化,保持平稳。对板内发生的强烈地震, 震前地震活动应变释放加速现象可能是存在的,但其存在的空间范围可能远 比预想的或者此前基于理论模型所预期的要大,而且强震发生处或其破裂区 可能并非位于应变释放高值区内。

图2、研究区内地震的G-R关系曲线

Sykes L R, Jaumé S C.1990. Seismic activity on neighbouring faults as a long-term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area. Nature, 348(6302): 595-599. Jiang H K, Miao Q Z, Dong X, Wu Q, Li M X, Song J. 2009b. Characteristics of strain release before M7 earthquakes in mainland China . Earthquake, 29(3): 1-11(in Chinese). 致谢: 本研究所用的地震活动资料来由中国地球物理研究所巧家地震观测台阵课题组提供,在此对巧家台阵 课题组的专家们表示诚挚的谢意!

针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

基于深度学习的地震数据自动处理——以西昌台阵为例 范莉苹,房立华*,廖诗荣,周一剑,周本伟,李珀任

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

高精度、高完备性的实时地震目录是刻画断层精细形态、揭示地震时空演 化规律和研究地震孕育机制、估计地震灾害范围等的重要资料。近年来,深度 学习在地震检测、震相拾取、震相关联、地震检测和地震定位等方面取得了很

大进展。然而,有关数据处理流程和神经网络参数调优方面的详细研究较少, 对于深度学习模型的泛化能力、概率阈值的设定、检测结果的质量控制与后续 处理,以及深度学习方法检测地震的能力等也缺乏深入分析。

自2013年1月份起,中国地震局地球物理研究所在安宁河——则木河断裂带 附近布设了由30个宽频带地震台组成的地震台阵(简称"西昌台阵"), 对该断 裂带的微震活动,深部结构和地震危险性进行研究。本研究使用西昌台阵北段 的13个台站和周边12个固定台站的连续波形数据,分析了数据预处理步骤、模 型训练、波形长度、网络层数、学习率和概率阈值等参数对检测结果的影响。 2018年5月16日8时46分在四川石棉附近发生M_L4.0级地震,本文利用深度 学习模型检测了西昌台阵46天的连续波形数据,并进一步开展了震相筛选、震 相关联、地震定位、震级测定和相对定位研究,获得了1480个余震,是人工检 测出的地震数量的3倍,为利用深度学习方法实时处理中国地震科学实验场的 观测数据,获取高精度的微震目录提供了技术储备。

图3 微震数据自动处理流程图

图3 深度学习模型与人工、AR pick检测结果结果对比

参考文献:

1. Zhu W, Beroza G C. 2018. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. Geophysical Journal International, 216(1): 261-273.

- 2. Waldhauser F, Schaff D P. 2008. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B8).
- 3. Fan L, Fang L, Liao et al. Accuracy of Earthquake catalog with phase arrival times and earthquake detection capability with deep learning. In preparation. 4. 周本伟、范莉苹、张龙、李珀任、房立华. 利用卷积神经网络检测地震的方法与优化. 地震学报, 2020.

Converging frontier technologies of continental earthquake science. Developing full-chain systematic studies towards strong earthquake risk

Seismic anisotropy beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau from SKS splitting observations

Jing Liu^a, Jianping Wu^{a,*}, Weilai Wang^a, Lihua Fang^a, Kai Chang^b ^aInstitute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China ^bLaboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

1. Introduction

The eastern margin of the Tibetan Plateau, bordering the Yangtze Platform to the east (Fig. 1a), is a zone of transition of tectonic stress direction, Bouguer gravity anomaly, Moho depth, and topography. Many different models of the evolution of the Tibetan Plateau have been proposed. Global Positioning System velocity measurements indicate that the Tibetan Plateau is moving laterally at a rate of approximately 15–20 mm/a relative to the Sichuan Basin (SCB) (Zhao et al., 2015). The velocity field not only reveals the characteristics of the differential tectonic motion between the Tibetan Plateau and the surrounding regions, but also provides important constraints on lithospheric deformation. However, the descriptions of the pattern and mechanism of deformation in this region remain controversial.

Fig.3. Example of a seismic event with high SNR.

stations in the study area.

Fig. 2. Azimuthal distribution of teleseismic events used in this study.

2. Data and Method

The data were obtained from an approximately uniformly distributed seismic array of 512 seismic stations that comprises four subarrays (color-coded in Fig. 1b). Among them, 249 stations constitute the Chuanxi Array deployed from October 2006 to July 2009 (Liu et al., 2014), 99 comprise the permanent China National-backbone stations that collected data during 2013–2017, 168 are the ChinArray deployed during 2013–2016, and 25 constitute a mobile broadband seismic array deployed in the SCB during 2014–2016 by our research group. To calculate the shear wave splitting measurements at all selected stations, we selected ~200 teleseismic events that occurred in either of two periods (2006-2009 and 2011-2017), had epicenter distances of $80^{\circ} -120^{\circ}$, and magnitudes >5.5 (Fig. 2). We adopted the grid-searching method of minimum tangential energy to obtain the shear wave splitting measurements in terms of fast wave polarization direction (FPD) and travel time delay.

104°E

108°E

02 04 0.6

Fig.4. Comparison of our SKS observations with the previous results. 3. Results and Discussion

Fig.5. Map of anisotropy strength plotted as delay time

The results of the anisotropy parameters for the 512 stations are plotted in Figs.4 and 5. In the central SCB, the average delay time is approximately only 0.35 s, which is related to the fact that the stable SCB has a relatively thick lithosphere that is not prone to deformation. In the northeastern SCB, the FPD is distinctly different from the surrounding area. We speculate that eastward escape of Tibetan Plateau mantle material produces compressive stress in approximately the E–W direction, and that the relatively soft lithosphere in the northeastern SCB might be deformed strongly along the right-lateral maximum shear direction. In addition, the southwestern SCB with strong anisotropy of SKS is also a region with high seismicity. Hence, we consider that the anisotropy in the southwestern SCB might be related to the lithosphere deformation.

In the southwest of the study area, the FPD of SKS at several stations is approximately in the E–W direction, and the FPDs are almost perpendicular to the anisotropy direction of the northern and southern regions in the Chuandian diamond Block. This phenomenon might be related to compressive stress and lithospheric detachment leading to upwelling and partial melting of mantle material. The delay time in the south of the Songpan-Ganzi Block region is notably smaller than that in the north, and the FPDs are not predominantly in the NW-SE direction. In recognition of the existence of a region with low-velocity anomalies extending from the crust to the upper mantle, we speculate that the complex tectonic stress and upwelling of hot materials in the upper mantle makes it difficult for anisotropic minerals in the upper mantle to become aligned in a dominant direction.

References

1. Zhao, B., Huang, Y., Zhang, C., Wang, W., Tan, K., Du, R., 2015. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data. Geod. Geodyn. 6, 7–15. https://doi.org/10.1016/j.geog.2014.12.006 2. Liu, Q.Y., Van Der Hilst, R.D., Li, Y., Yao, H.J., Chen, J.H., Guo, B., Qi, S.H., Wang, J., Huang, H., Li, S.C., 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. Nat. Geosci. 7, 361–365

Composition and Thermal Structure of the Upper Mantle beneath South China from Multi-observable Probabilistic Inversion Xiaoyu Yang^{1,2,3}, Yonghua Li^{1,3,*}, Juan Carlos Afonso^{2,*}, Yingjie Yang², and Anqi Zhang² ¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China. ² ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW, Australia.

³ Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing, China.

INTRODUCTION

The South China Block experienced a complicated tectonic history, and information on the structure of the subcontinental lithospheric mantle (SCLM) are helpful for the understanding of its tectonic process. We present an upper mantle model of seismic velocities, temperature, density, and bulk composition for the South China Block (SCB) and adjacent areas by jointly inverting Rayleigh wave phase and group dispersion data, absolute elevation, geoid height, and surface heat flow using a probabilistic inversion method of Afonso et al.

(2013a, 2013b and 2016).

DATA

Fig.1 Examples of Rayleigh wave dispersion curves used in this study. Fig.2 Elevation (a), geoid (b), surface heat flow (c, Jiang et al., 2019) and Moho(d, Li et al., 2014)

RESULSTS

Fig.6 Depth slices of temperature, density, and V_S at 40 km, 100 km, 170 km, and 250 km depths. Blue lines mark the locations of vertical profiles shown in Fig.7.

Fig.3 Fit to dispersion data and posterior histograms for elevation, geoid, and SHF(left). Model parameterization used in the inversion (right).

Fig.7 Vertical profiles of temperature, density, and V_S along the A-A' and B-B' profiles (in Fig.6). White and purple lines denote the Moho and LAB depth, respectively.

Fig.8 Comparison of temperatures between us and Sun et al. (2013).

CONCLUSION

The lithospheric structure of this region is dominated by a thick root (200-240 km) under the western Yangtze and thinner lithosphere (70-120 km) under the eastern SCB, in agreement with independent xenolith data.
 We reveal for the first time the extent of metasomatism/refertilization in the

References

Afonso, J. C., et al., 2013a. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(5), 2586–2617.
 Afonso, J. C., et al., 2013b. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(4), 1650–1676.
 Afonso, J. C., et al., 2016. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(10), 7337–7370.
 Jiang, G. Z., et al., 2019. Tectonophysics, 753, 36–48.
 Li, Y. H., et al., 2013. Earth and Planetary Science Letters, 377–378, 367–377.
 Li, Y. H., et al., 2014. Tectonophysics, 611, 51–60.
 Shan, B., et al., 2017. Geophysical Journal International, 208, 1643–1654.
 Shen, W. S., et al., 2016. Geophysical Journal International, 206(2), 954–979.
 Sun, Y. J., et al., 2013. Journal of Asian Earth Sciences, 62, 697–704.

lithospheric mantle beneath the Yangtze Craton. Our results show pervasive refertilization of the lithospheric mantle associated with the basaltic lavas of the Emeishan large igneous province.
The eastern South China Block lithosphere is characterized by an alternating pattern of fast/slow seismic and depleted/fertile anomalies, supporting the hypothesis that the lithospheric mantle has been partly replaced/modified by deep mantle processes during the Phanerozoic.

Converging frontier technologies of continental earthquake science. Developing full-chain systematic studies towards strong earthquake risk

R&D Objectives and Subjects

3D Crustal Structure and Seismicity Characteristics of Changning–Xingwen Area in the Southwestern Sichuan Basin, Zuo Kezhen¹, Zhao cuiping^{*2}, Zhang Haijiang^{3,4} Institute of Geophysics, CEA, Beijing; 2 Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing; 3 School of Earth and Space Sciences; Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, USTC, Hefei; 4. Mengcheng National Geophysical Observatory, USTC, Hefei

Introduction

On 17 June 2019, the M_S 6.0 Changning earthquake occurred in Sichuan Province, China, and caused casualties and severe economic losses. From north to south, the main industrial activities in Changning and Xingwen are salt and shale gas mining, respectively. The long-term water-injection in the salt mine and HF in the shale gas block have demonstrated the highest level of induced seismicity¹. After 2015, the frequency and strength of seismicity in this area dramatically increased, and the 16 December 2018 $M_{\rm S}$ 5.7 Xingwen and 3 January 2019 $M_{\rm S}$ 5.3 Gongxian earthquakes occurred successively, only a dozen kilometers away from the $M_{\rm S}$ 6.0 Changning earthquake. To study the relationship between seismic activity and tectonic environment in detail, it is necessary to determine a higherresolution 3D velocity model, especially the $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ model in the area.

Data and method

We collected the seismic phase arrivals of 34,296 earthquakes in the study area from 1 January 2015, to 31 August 2019, recorded by 86 permanent and temporary stations. Based on large amounts of data recorded by permanent and temporary stations, the higher-resolution 3D $V_{\rm P}$, $V_{\rm S}$, and $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ models and earthquake locations in the study area are inverted using the $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ model consistency-constrained double-difference seismic tomography method².

Fig 1. Tectonic and geological settings of the study region.

Fig 2. Distribution of seismic ray paths and inversion grids.

3000

Results and discussion

A total of 21,711 earthquakes are relocated after joint inversion using the TomoDDMC method. Most earthquakes within the Changning salt mining area are located in a slant zone that gradually deepens from the Shuanghe anticline on the east to the Yutan anticline on the west with the maximum depth from 5 to 10 km. They are also associated with obvious high- $V_{\rm S}$ and low- $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ features. The earthquakes in the shale gas operation area are distributed in clusters that are mainly located at the edge of low-velocity anomalies and are associated with low- $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ areas. Combined with geological tectonic settings and previous research results, we infer that the frequent seismic activities in the Jianwu syncline area may be related to the activation of pre-existing faults or fractures caused by the hydraulic-fracturing process.

Earthquakes in the Changning area are concentrated in the core of an anticline with high $V_{\rm S}$ and low $V_{\rm P}/V_{\rm S}$. The rupture process of the $M_{\rm S}$ 6.0 Changning earthquake was affected by pre-existing small-scale faults. The seismicity in the Jianwu syncline area is related to the activation of faults caused by hydraulic fracturing.

References

1. Lei, X., Wang, Z. and Su J., 2019. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan basin, China, Earth Planet. Phys. 3, no. 6, 510–525. 2. Guo, H., Zhang, H. and Froment B., 2018. Structural control on earthquake behaviors revealed by high-resolution $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ imaging along the Gofar transform fault, East Pacific Rise, Earth Planet. Sci.Lett. 499, 243–255.

针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

周晓成,颜玉聪,李静超,王万丽 中国地震局地震预测研究所 微信号: 13552868187

图2川滇地区温泉气体中氦同位素平均值(指示深部流体上涌强度) 与地震活动性呈明显的正相关


	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	5	0		~~
2	2	2	3	S	<u> </u>
	-			2/	2
2	5	S	Ś	9	9
0	0	0	0	õ	ō
õ		Õ	õ	1	
č	<u> </u>	ě.	ě.	0	0
C	2	(C)	S	0	5
<u> </u>	0	<u> </u>	0	0	0
				-	÷ 1

2020/06/0	2020/06/0	2020/06/0	2020/06/0	2020/06/1	2020/06/1

![](_page_19_Picture_1.jpeg)

## 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

## 四川盆地威远背斜的形成及其对诱发地震构造的约束

#### 刘冠伸¹,鲁人齐¹,何登发²,梅庆华²,张伟康² 1.中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,2.中国地质大学(北京)

![](_page_19_Figure_5.jpeg)

#### 三、威远地区Ms5.4及Ms5.2级地震定位和构造分析

发震时间 (年/月/日)	深度 (km)	节面 I /(°)			节面 II /(°)			震级	数据来源
2019/09/08	4.5	40	32	94	215	58	87	<i>Ms</i> 5.4	包灶吉
2019/12/18	4.0	35	29	94	210	61	88	<i>Ms</i> 5.2	勿性音
2010/00/09	20	201	( <b>0</b>	75	57	20	100	N 115 A	

![](_page_19_Figure_8.jpeg)

研究威远背斜的形成与演化以及页岩气开采和诱发地震的关系具有重要意义。

#### 二、威远背斜的形成和演化

![](_page_19_Figure_11.jpeg)

a. 奥陶系五峰组底界构造反射图 b. 寒武系底界构造反射图

从地震剖面来看,威远Ms5.4级和Ms5.2级地震震源附近并没有发现明显的 断层。根据对该区域三维地震层位的解释结果,奥陶系五峰组底界及寒武系底 界的等值线图连续性好,没有发生错断,表明震源附近断层并不发育,其发震 断层尚不明确。

威远地区Ms5.4级和Ms5.2级地震震源位于威远背斜南翼的斜坡带上,震源 分别位于背斜和向斜之前的膝折带,属于应力的集中区。同时,页岩气开采层 位主要为志留系的龙马溪组和奥陶系的五峰组(图3中蓝色区域), 页岩气的压 裂活动可能会对深部基底断层产生影响,这可能是潜在的诱发地震风险源。

![](_page_19_Picture_15.jpeg)

#### 白垩纪末期,四川盆地南部开始缓慢的隆升; 60-30Ma,受青藏高原向东 南挤出作用,基底断裂活动,并以前展式向前传播,威远背斜开始缓慢隆升; 30Ma-至今,受到龙门山持续挤压隆升的影响,威远背斜加速隆升,形成现今 的构造样式。前人在龙泉山、威远和自贡地区采集了大量磷灰石样品进行测年, 有效的约束了威远背斜及其邻区隆升的时期(据徐明,2011;邓宾,2013)。

#### 1.威远背斜的形成受控于基底的逆冲断层系统。2.威远地区的两次中等 地震事件,震源附近并未发现有明显的先存断层,地震机理尚不明确。

![](_page_19_Picture_19.jpeg)

- Wang, M., et al., Shallow Faults Reactivated by Hydraulic Fracturing: The 2019 Weiyuan Earthquake Sequences in Sichuan, China. Seismological Research Letters, 2020.
- Sheng, M., et al., Source Parameters of Three Moderate Size Earthquakes in Weiyuan, China, and Their Relations to Shale Gas Hydraulic Fracturing. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020. 125(10). 易桂喜, et al., 2019年6月17日四川长宁MS6.0地震 序列震源机制解与发震构造分析. 2019(9). 4. 邓宾, 刘树根, 王国芝, et al. 四川盆地南部地区新生代隆升剥露研究——低温热年代学证据[J]. 地球物理学报, 2013(06):1958-1973. 5. 田云涛, 朱传庆, 徐明,等. 白垩纪以来米仓山—汉南穹窿剥蚀过程及其构造意义:磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地球物 理学报, 2010, 53(4):920-930.

![](_page_20_Picture_1.jpeg)

## 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

## 2020年2月3日四川青白江Ms5.1级地震构造初步研究 徐芳¹,鲁人齐¹,江国焰²,王晓山³

1.中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室; 2.武汉大学; 3.河北省地震局

![](_page_20_Picture_5.jpeg)

常明显的地表变形,沿雷达视 向线方向的形变可达4cm,形 变为向上隆起,且分布在3km ×4km的范围内,表现为局部

focal Depth(Km)

![](_page_20_Picture_7.jpeg)

图1.(a)龙门山-龙泉山地形图,地 形数据来源于SRTM数字高程模型, 水平分辨率为30m;(b)青白江 Ms5.1级主震及余震分布,位置如(a) 中红色方框所示,红色圆圈为主震, 黄色圆圈为余震。

2020年2月03日00时05分,四川省成都市青白江区清泉镇附近(北纬30.74 度,东经104.46度)发生*Ms*5.1级地震,中国地震局台网中心最初公布震源深 度21公里。地震震感强烈,最高烈度为VI度(6度)。青白江*Ms*5.1级地震发 生后,2月4日-6月26日期间,发生了共计60次余震,震级0~3.0级,余震持 续了4个月左右。由于青白江地震发生在龙泉山断裂带上,具体由哪一支断 裂活动产生是我们本次研究的重点。

![](_page_20_Picture_10.jpeg)

![](_page_20_Figure_11.jpeg)

![](_page_20_Picture_12.jpeg)

由于地震造成的形变在震中西北部为隆起,东南部为凹陷,且从图1 (b)可看出余震较多分布于龙泉山断裂北段东支附近,我们分析此次青 白江地震是由龙泉山北段东支的逆冲断层活动引起的。

![](_page_20_Figure_14.jpeg)

![](_page_20_Figure_15.jpeg)

龙泉山位于川西盆地腹 部,西侧即为龙门山断裂带。 龙泉山构造带包括一系列走 向20°~30°的褶皱、逆断 层等压扭性构造,全长200 km,宽约15~20 km。其中,褶 皱主体为呈NNE-SSW方向 展布的龙泉山背斜。

龙泉山西缘断裂和东缘断裂相向对倾组成了龙泉山断裂带。此断裂带 具有明显的分段性,中段是倾向SE的逆冲断层,出露于龙泉山西坡,南 段和北段则是两条相向对倾的逆冲断层。此次青白江*Ms*5.1级地震发震位 置即位于龙泉山断裂带北段。

二. 发震构造分析

#### 104°25'0"东 104°30'0"东 (a)

图3.青白江*Ms*5.1级地震地表 变形InSAR图。(a) 055轨道 卫星观测地表变形;(b) 图4. (a) 地震反射剖面, 位置如图1 (a) 中A-A'所示; (b) 青 白江地震定位结果。

雪河市七山东辺	雷兴林等,		2020	GCMT		-
辰你们时時	strike	dip	slip	strike	dip	slip
Fault plane 1	205	54	96	30	33	114
Fault plane 2	15	36	82	183	60	75

由地震定位结果可知,青白江地震震源深度5km,结合前面提到的,地 震发生于龙泉山断裂带北段东支逆冲断层上,可将震源投到图4(a)所示 位置上,该断层与GCMT以及雷兴林等(2020)给出的震源机制解一致。

#### 三. 初步认识与结论

1.青白江*Ms*5.1级地震震源深度5km,发震断层为龙泉山北段的东支逆冲断层;地震造成的地表明显的隆起,变形最高可达4cm。 2.此次龙泉山地震的发生,与青藏高原向东挤出,以及龙门山的逆冲缩 短有关,同时可能受先前汶川*Ms*8.0大地震的影响。

![](_page_20_Picture_25.jpeg)

## 164轨道卫星观测地表变形。

我们从欧空局搜集了升 轨55和降轨164轨道的哨兵

数据,用于提取青白江2020

年2月3号 Ms5.1 级地震的同 震形变场。从图中我们可以

看出,青白江地震造成了非

#### 参考文献:

1. Xinglin LEI, Jinrong SU, Zhiwei WANG. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activiti es[J]. Science China (Earth Sciences), 2020, 63 (11): 1633-1660.

2. Renqi Lu,Dengfa He,Xiwei Xu,Xibin Tan,Yingqiang Li,Minggang Cai,Zhennan Wang. Geometry and kinematics of buried structures in the piedmont of the central Longmen Shan: implication for the growth of the Eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of the Geological Society,2019,176(2).

Maomao Wang, Aiming Lin. Active thrusting of the Longquan Fault in the central Sichuan basin, China, and the seismotect onic behavior in the Longmen Shan fold- and- thrust belt[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(7).
 邓起东,陈社发,赵小麟.龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J].地震地质, 1994(04):389-403.
 陈竹新,王丽宁,杨光,张本健,应丹琳,苑保国,裴森奇,李伟.川西南冲断带深层地质构造与潜在油气勘探领域[J].石油勘 探与开发, 2020, 47(04):653-667.

![](_page_21_Picture_0.jpeg)

## 安宁河断裂带介质波速时空变化研究

周聪,张佩,史克旭,刘庚,李君,张志朋 中国地震局第二监测中心,西安 710054

#### 1. 引言

多次散射形成的尾波由于在介质内部重复采样、叠加和放大作用,对介质的微小变化十分敏感。尾波干涉利用这一特点可以检测出介质的微小变化。本项目收集了西昌台阵2016年~2018年的连续波形记录(10Hz)和近震震相报告,采用重复地震尾波干涉和背景噪声互相关技术,初步获得了研究区地壳内部介质波速相对变化。

#### 2. 基于重复地震的波速变化测量

在拟合中剔除了波形相关系数<0.8、最大误差>0.1s、最大 ²⁹ 时移>0.5s的点以保证计算的合理性。由于不同重复地震的时 ²⁸ 间范围不同,因此我们采用分开投影的方式进行,如图 4所示。 从表1可知,D1和D3的间隔时间较长,分别为45天和179 天,震级也较大。其他地震对震级较小,间隔时间不到1天。²⁷ 6对重复地震主要发生安宁河断裂带附近,除了个别重复地震²⁹ 对的个别台站呈现明显负变化,如D1的XC14台、D4的XC08台²⁸ 和D5的XC14台,其他重复地震对均显示了速度的正变化。D6 显示的相对速度的正变化较大,而且该重复地震对间隔较短, 只有12分钟。该地震对发生在2018年5月16日8点44分(UTC)²⁷ 的四川石棉地震之后,处于余震影响范围。根据多人的研究²⁹ 成果(刘志坤等,2010; Liu et al., 2018; Pei et al., 2019),大 地震的同震效应会导致震源区地震波波速的急剧降低,而主²⁹ 震后波速会逐渐恢复,即波速增加。除此之外的其他几对重²⁸ 复地震,总体体现出波速小幅正异常变化。

![](_page_21_Figure_7.jpeg)

利用几乎发生在同一位置、震源机制高度相近的重复地震,通过尾波干涉方法,可以获得研究区介质速度的变化信息。对于台网密度不够导致的地震完备震级不理想的情况,可以采用模板匹配技术和滑动窗互相关方法寻找可能遗漏的微小地震,来防止漏震现象造成的重复地震的缺失(Li et al., 2017)。本项目利用的的西昌台阵,沿安宁河-则木河断裂、丽江-小金河断裂和大凉山断裂布设,共计25个宽频带台站,台网观测密度较理想(图1)。经计算,该区域的最小完备性震级Mc=ML0.2(图2)。

![](_page_21_Figure_9.jpeg)

基于计算量和信噪比的考虑,挑选了16-18年的近震震相报告中1级以上的地震事件,共1752 个。判断两个地震是否是重复地震的判别标准有三个: (1)两个地震事件是否有4个以上相同的 台站记录到; (2)两地震事件的相对距离是否小于两地震破裂尺度之和; (3)波形相关系数是 否大于0.8 (李乐等, 2015)。这里采用S-P相对到时差 (Δts-P)来约束地震相对位置 (Δx) (Liet

#### 4. 基于地震背景噪声的介质波速变化测量

我们使用西昌台阵2017年的连续波形记录进行地震波速度变化的计算。数据处理过程按照Liu等 (2014)的方法进行: 首先,对各台站每天的Z分量波形进行10Hz的重采样、0.02~1Hz带通滤波、时域归 一化处理与谱白化处理,得到单台站的背景噪声记录。在计算周期内(2~10s),将各台站对当天及其 前、后15天(共31天)的互相关函数叠加来代表该天的经验格林函数。参考经验格林函数均由各台站对 2017年1月1日至12月31日整个研究时段的互相关函数叠加而得到。

图 5和图6给出了2017年研究区北部典型台站对沿/跨断裂带的δv/v时间序列。总体来说,沿断层和跨断层的各台站对并未表现出一致的速度变化,但前者的波动幅度大于后者。且沿断层的许多台站对在8 月底~9月初之间出现明显的波速降低。在此时间段内,研究区内共发生14次ML>=3.0级地震,其中最大的为2017年9月12日发生的ML4.3级地震。但大部分地震发震位置均位于研究区南侧(N28°)附近,与表现出波速异常的各台站对均相距有一定的距离。

al., 2011) 。

如果研究区地壳介质的地震波速度v发生了δv的变化,则可以通过测量重复地震对尾波波形间的相对走时偏移(δt/t)来计算相对波速的变化(δv/v),即  $\delta v / v = -\delta t / t$ 。由此可见,测量走时偏移(δt)是数据处理中最重要的步骤。提取走时偏移的方法主要有四种,分别是移动窗互相关法、移动窗互谱法、移动窗口压缩-拉伸法和压缩-拉伸法。其中移动窗互谱法的稳定性和精度较好(Liu et al, 2010; Clarke et al., 2011)。

#### 3. 重复地震尾波干涉测量结果分析

最终我们识别得到7对重复地震,详细信息见表1。以2018年5月16日9:03和9:15的一对重复 地震(D6)为例的波形叠加如图3a所示。从波形上看相关性较高,但由于需要按震相到时对齐波 形进行互相关计算(图中红色虚线与黑色虚线没有完全对齐),所得相关系数普遍较低。这也反 映了震相报告中震相到时拾取存在一定误差,需要在后期通过波形相关的方法做进一步校正。

		4704		4%*±9		
Interval∉	Magnitude≓ (ML)₽	Depth⊷ (km)≁'	Lon(°E)₊ ^j	Lat(°N)₽	Origin↔ • time(UTC)↔	¢
45 441 17	2.6+2	5∻	101.3300¢	27.9360₽	2017-09-13-16:35+2	D1₽
43d4n1/mm¢	1.8+2	5+ ²	101.3220+2	27. <b>9260</b> ₽	2017-10-29-20:52	
15-21-2-2	2.3₽	27.8+2	101.3290+2	27.9170+2	2017-10-12-21:15+2	D2₄≀
lon2lmme ²	1.942	17.4+2	101.3270+3	27.9090+3	2017-10-13 12:36	
170 151 -1	3.0+2	13+2	101.2470	27.9320+2	2018-02-06·07:03¢	D3₽
1/90204	3.1+2	5+ ²	101.2230	27.9580+2	2018-08-05-12:01+2	
21-min -1	1.8+2	9.1₽	102.1940	29.5180+2	2018-04-09.05:0640	D4₽
∠1mm*	1.942	9.2+ ²	102.1820+2	29.5090+2	2018-04-09.05:27¢	
3h23min (1	1.7+2	8.6₽	102.269042	29.2080+2	2018-05-16-04:54+2	D5₽
2052000*	1.6+2	8.9¢	102.2780+3	29.1990	2018-05-16-07:26	
	1.6+2	8.4+2	102.2790+2	29.1810+2	2018-05-16-09:03+2	

![](_page_21_Figure_19.jpeg)

15分重复地震事件波形图

为了更好地显示波速变化的空间分布特征,我们测量了7月至9月台站对的平均波速变化,进而得到 台站对之间波速变化的空间分布(图7)。图中仅展示了地震多发区的台站对的平均波速变化,大致以 XCO3、XCO4、XCO5一线为界线,北部地震分布最广(参见图1)。除少数台站对显示较大的正变化和负 变化,多数台站对在该时间段内的平均相对波速变化都小于0.1%。

![](_page_21_Figure_21.jpeg)

(1) 本项目收集了西昌台阵2016年~2018年的连续波形记录(10Hz)和近震震相报告进行重复地震识别,

采用波形互相关和S-P相对到时差的方法识别出7对1级以上的重复地震,均发生在安宁河断裂带附近。

![](_page_21_Figure_24.jpeg)

图 3b为利用移动窗互谱法提取重复地震对D5在XC02

台的波速变化。对事件数据采用了1-2s的带通滤波,移

动窗长6s,移动步长3s。图 3b上图为重复地震对波形图,

以及尾波部分的相关系数。下图为提取出的走时偏移以

及利用加权最小二乘拟合获得的 $\delta t / t$ 。

XCD-EHZ 2018-05-16T04-54-17 VS 2018-05-16T07-26-05Of the section of the section of

利用尾波干涉的方法获得了7组速度变化值。除了个别重复地震对的个别台站对呈现明显的负变化,

#### 其他重复地震对均显示了波速小幅正异常变化。

(2) 基于背景噪声互相关技术计算了西昌台阵2017年的连续地震波速度变化,沿断层和跨断层的各台站

对并未表现出一致的速度变化,但前者的波动幅度大于后者,且沿断层的许多台站对在8月底~9月初

#### 之间出现明显的波速降低。

5. 结论

(3) 未来计划申请更高采样率的数据进行计算,以增加结果的稳定性和可靠性。

![](_page_22_Picture_0.jpeg)

## 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

## 利用背景噪声研究通海5.0、墨江5.9地震震源区波速变化

Using Ambient noise to study the wave velocity changes in the focal area of the Tonghai 5.0 and Mojiang 5.9 earthquakes 杨建文 叶泵 陈佳 中国地震科学实验场大理中心,云南大理,671000

#### 研究目标和主要内容

地震的孕育和发生往往伴随着地下介质应力状态的变化,而介质应 力状态的变化会引起地震波速的变化,监测这种波速变化,对地震预测 以及余震趋势的判断具有重要意义。近年来,随着背景噪声层析成像技 术的发展,从该方法中获取的经验格林函数也被应用于研究地壳内部地 震波速度的时空变化特征。背景噪声分布广且不依赖于特定震源,非常 适合于跟踪地壳内部结构的物性变化。 2018年通海5.0和墨江5.9级地震发生后,我们采用GNSS连续观测资 料对地震前后的应变场时空演化特征进行了系统的研究,发现两个地震 前后,震中区域附近存在较为明显的应变场时空演化过程(即:面应变 显著积累——短期内面应变快速反向调整——调整过程中相继发生通海 5.0和墨江5.9级地震)。地震前后明显的应变场变化会引起地下介质波速 的变化。因此,基于通海5.0、墨江5.9地震震中区域附近相关固定台站记 录的连续波形数据,采用背景噪声波速测定方法,开展地震震源区波速 变化研究,对深入研究地震孕育、发生、发展过程的物理机制具有重要 意义。相关研究结果可为利用背景噪声技术在云南地区开展区域地下介 质波速变化测量,捕捉强震发生前波速异常特征提供较好的震例参考。

(3) 2个地震前后MIL-JIG、YUJ-MIL、TOH-YIM、YUJ-SIM台站对 的走时偏移异常特征最为明显,推测可能与相关台站对的射线路径穿越 了震中附近振动最剧烈、破坏比也最严重的极震区有关。

#### 取得进展和科技成果

本研究以2018年通海5.0、墨江5.9地震为样本,采用地震周边7个云 南数字地震台网记录的2018年1月~12月的宽频带连续波形资料,通过背 景噪声互相关获取21个台站对间的经验格林函数,然后通过提取相关台 站对间当天经验格林函数与参考经验格林函数中直达的瑞利波走时偏移, 以计算台站对间的瑞利波速度变化,深入分析震源区及周边波速随时间 和空间的变化规律。

![](_page_22_Figure_10.jpeg)

#### 图2 21个台站对的参考经验格林函数(图左)和各台站对瑞 利波走时偏移异常特征 (图右)

图2-右中"红色"线表示地震前后台站对(共10个台站对)间的走 时偏移存在下降特征; "蓝色"线表示地震前后台站对(共6个台站对) 间的走时偏移存在上升特征; "黄色"线表示地震前后台站对(共5个台 站对)间的走时偏移不明显。

![](_page_22_Figure_13.jpeg)

![](_page_22_Figure_14.jpeg)

![](_page_22_Figure_15.jpeg)

特殊台站对走时偏移变化情况 图3

基于背景噪声的波速测定方法物理意义明确,该方法可拓展到震情 跟踪工作中。基于相关台站连续背景噪声记录,定期跟踪分析地下介质。 波速变化情况,所产出的波速变化结果可较好的服务于 $M \ge 5.0$ 破坏性地

#### (1) 2018年通海两次5.0、墨江5.9级地震前后大部分台站对间的走 时偏移存在明显的变化特征(16/21=0.76,异常占比76%),其中以走时 偏移下降居多(10/21=0.48, 异常占比47%)。

#### (2) 相关台站走时偏移存在较为明显的共性特征——即: 台站对间

走时偏移变化越大,对应误差越大。

#### 震的日常跟踪及分析预测工作。

乡	*考文献:
1.	刘志坤,黄金莉.利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化[J].地球物理学报,2010,53(4):853-
	863.
2.	王伟涛,王宝善,葛洪魁,等.利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化[J].中国地震,2009,25(3),
	223-233.
3.	Stehly L, Froment B, Campillo M, et al. Monitoring seismic wave velocity changes associated with the $M_W 7.9$
	Wenchuan earthquake: increasing the temporal resolution using curvelet filters[J]. Geophysical Journal
	International, 2016, 201(3):1939-1949.

![](_page_23_Picture_2.jpeg)

### 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

#### 利用气枪震源测量宾川盆地波速变化

The variation of wave velocity in Binchuan Basin measured by large volume airgun source 叶泵、杨建文、陈佳 中国地震科学实验场大理中心

#### 研究目标和主要内容

研究目标: 基于气枪震源信号, 利用互相关干涉法测量宾川盆地介质波 速变化,分析介质各向异性如断裂、水库等介质因素对波速测量的影响。

研究内容:

(1) 相同台站不同仪器测量的波速变化

频带地震仪,频带范围为60s-50Hz。通过上述仪器记录的数据,利用相同方法 计算得到的结果如图,波速相对变化趋势完全一致,说明不同仪器相同地点记 录到的数据计算结果一致。

2)选取震中距相近的53260、53262、53265、53273四个台站记录事件进行分

- (2) 线性排列台站测量的波速变化
- (3)相同震中距台站测量的波速变化
- (4) 相邻台站测量的波速变化

#### 取得进展和科技成果

利用互相关干涉法计算宾川地区台站记录的数据,得到宾川各点的波速 变化。

![](_page_23_Figure_18.jpeg)

析,四个台站以震源为中心近似于平均分布。通过对数据的时间服务检查后, 计算一天之内24个事件相对于该台所有事件的叠加后得到的平均值事件的到时 延迟,由于时间较短,地表环境变化较小及震源系统较稳定,所测量的区域介 质速度变化尽管绝对值有极大的不同,但变化近似于变化趋势一致。

3) 线性排列的台站, 台站连线穿过气枪震源且台站位于震源两端, 测量的波 速变化受水库形状、台站高程、连线是否穿过断裂等因素干扰,尽管最远台与 最近台距离不超过10km,测量的波速变化趋势所有台站并不一致。

4) 相邻台站, 即使两台相距只有300m, 由于气枪震源射线入射过程中受到断 裂、地表起伏等因素的影响,测量的波速变化的趋势也不一定一致。

![](_page_23_Figure_22.jpeg)

![](_page_23_Picture_23.jpeg)

![](_page_23_Figure_24.jpeg)

#### 相同台站不同仪器测量的波速变化

![](_page_23_Figure_26.jpeg)

![](_page_23_Figure_27.jpeg)

![](_page_23_Figure_28.jpeg)

![](_page_23_Figure_29.jpeg)

65

件编号

#### 存在其他影响首个震相到达时间,即宾川盆地的 不均性,影响了台站波形传播。

总结: 利用气枪震源测量波速变化进行监测地下介质态,进而利用波速变化找出 大震前兆是一种新的地震预测思路,但地球介质的复杂性使得单点测量的波速 变化所能代表的区域极小。

1) 地表的各向异性之一, 水库的形状对近台测量的短期波速变化表现出较小 的影响。

断裂带对于地震波传播有明显的干扰,相邻台站因断裂干扰而射线的路径 2) 的不同,测量的波速变化趋势受到了重大影响。

3) 台站高程的不同可能导致相邻台站的射线路径不一致,但其对测量的波速 变化影响较小。

![](_page_23_Picture_35.jpeg)

#### 线性排列台站测量的波速变化

邻近区域内的台站测量的波速变化

#### 1) 摆放有两组地震仪记录了相同气枪震源事件,这两组地震仪器一组是

- Reftek-130B数据采集器配Guralp-40T短周期地震仪,频带范围为2s-100Hz;
- 另一组地震仪采用的是北京港震公司的EDAS-24GN数据采集器和BBVS-60宽。
- 1. 陈佳,叶泵,高琼等,2017.利用气枪震源信号研究2016年云龙MS5.0地震前后波速变化特征。地震研究,40(4), 550-556。
- 2. 钮凤林,保罗·西弗,托马斯·德利等,2009。"帕克菲尔德圣安德烈斯断层深部探测计划" 井下主动源监测中观 测到的震前波速变化。国际地震动态, 366(6):1-7。 4. 王宝善,王伟涛, 葛洪魁等, 2011。人工震源地下介质变化动态监测。地球科学进展, 26(3):249-256。 5. 王彬,李孝宾,刘自凤等,2016。宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果,中国地震,32(2), 193-201。 6. 徐荟, 刘学军, 王彬, 王宝善, 2015。利用主动源源直达波互相关时延检测技术监测小江断裂带支地震波波速变化
- 地震研究,38(1),7-15。

![](_page_24_Picture_1.jpeg)

基于凹凸体参数不确定性和真实地震记录再现1850年西昌

M7.5级地震的高频强地震动空间分布特征

李宗超*,孙吉泽,房立华

E-mail:lizongchaoigo@163.com

![](_page_24_Picture_6.jpeg)

其次,根据Brune圆盘模 的地震矩带入求得N值 求得等效圆盘的半径R S与To的经验关系  $N = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{Large}}}{CM_{\text{small}}}}$  $\lg M_0 = 1.05706 M_{\odot} + 18.7868$ 7M_{(Asperi}  $\lg S = 0.54176 \lg M_0 - 4.38789$  $\Delta \sigma_{Asperity} = 16Rr_{Asper}^2$  $\Delta \sigma_{
m small}$ 求得设定震级的Mo和  $16 r_{smal}^{3}$  $\Delta \sigma_{A \, {
m speritv}}$ ΔT2=12.18 s  $\Delta \sigma_{
m small}$ 求得C值 -Syn time history PGA=67 图5 关键震源参数C值和N值的计算 图6 凹凸体叠加示意图

本文尝试利用2018年发生在西昌的5.1级小震的小震记录合成1850年发生的西昌7.5级 地震的大致的强地震动特征(图1),模拟过程中主要考虑凹凸体参数的不确定性因素。 在地震工程领域,近场强地震动预测对于减轻未来大地震灾害、指导重大地震工程建设和 设计具有重要作用。再现历史大地震的空间分布特征以及利用现有小震记录预测未来破坏 性大地震的高频强地震动,具有较高的实用价值。在数值模拟中,重点考虑了凹凸体数目、

![](_page_24_Figure_9.jpeg)

面积和位置等参数的不确定性。通过模拟得到了西昌地区30个强震台站的时程、峰值加速 度(PGAs)和反应谱,并通过kriging插值得到了PGA的空间分布特征。

![](_page_24_Figure_11.jpeg)

本文采用经验格林函数法(EGFM)合成大地 震(图2), 其核心思想: 用主震的前震或 者余震记录作为格林函数合成大震。

$$U(t) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{r}{r_{ij}} F(t) * (C \cdot u(t))$$

$$w \prod_{l} r_{l}$$
subfault(*i*,*j*)
$$w \prod_{l} r_{l}$$
small event
$$u \prod_{l} f_{l}$$

图2 EGFM利用小震记录合成大地震

0km 50km 100km
图1 西昌地区主要的发震构造
凹凸体参数不确定性因素的考虑。随机不确定性参数采用统计的经验关关系计算,例
如震级, 断层面积, 地震矩等参数根据Someville(1999)的经验关系计算得到。参考
Somerville(1999)对凹凸体的定义,凹凸体为断层面上滑动位错较大的区域。已发生的地震
通过反演地震破裂过程可以较准确的获得断层面上的滑动位错分布,但对于历史地震以及
还未发生过的破坏性大地震,凹凸体的参数几乎都是未知的。因此,我们将凹凸体的可能
出现的特征建立了简单的逻辑树(图3)。主要包括凹凸体的数量和空间位置等。建立不
同凹凸体数量的经验性的震源模型(图4),并分别计算不同凹凸体震源模型下获得的地

![](_page_24_Figure_15.jpeg)

#### 图7 不同凹凸体震源模型得到的PGA空间分布特征

总结了30个台站的4种类型的凹凸体震源模型的地震动预 测结果,为相似震级的现代破坏性地震的主要经验强度特 征提供了参考。我们认为这4种模型都是可能的,当凹凸体 数量为3个或4个时, PGA的空间分布特征出现的的概率比 单凹凸体模型和2个凹凸体模型大。

![](_page_24_Figure_18.jpeg)

类比现代发生的有数据记录 的同震级的地震记录及地震动 模拟结果 具备破坏性大地震的强度特征 模拟结 果给出的是个可能的取值范围 考虑了震源参数的不确定性影

图3 西昌地区凹凸体参数不确定性逻辑树

#### 图4 西昌地区不同凹凸体经验性的震源模型

图5和图6表示经验格林函数法合成地震动过程中关键震源参数C值和N值的计算过程。 以及多凹凸体震源模型最终在时域上按照一定的时间延迟叠加得到大地震的地震动的示意 图(以3个凹凸体模型为例)。

![](_page_24_Figure_23.jpeg)

图9 汶川地震相应台站以及Boore2014衰减关系

参考文献:

Boore D M, Stewart J P, Seyhan E, et al. (2014). NGAWest2equations for predicting PGA,PGV,and 5%damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 30(3):1057-1085.

2. Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. (1999) Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. Seismological Research Letters, 70(1), 59–80.

摘要

## 中国地震科学实验场 CHINA SEISMIC EXPERIMENTAL SITE

![](_page_25_Picture_2.jpeg)

#### 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

#### 2017年8月8日四川九寨沟M7.0级地震和余震序列的 震源参数及其构造意义

何熹¹,赵连锋¹,谢小碧²,沈琳¹,王卫民³,姚振兴¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029 ² University of California Santa Cruz CA 95064 3 中国科学院青藏高原研究所北京 100101

![](_page_25_Figure_7.jpeg)

地震应力降定义为地震发生前后断层面上的平均应力差,是描述震 源物理过程的重要参数。基于前人建立的宽频带高分辨率Lg波Q值模型, 我们对Lg波观测振幅频谱进行衰减补偿,得到了2017年8月8日九寨沟 M7.0级地震及其M2.0级以上余震的震源频谱,并依据Brune(1970)震源模 型计算了每个事件的标量地震矩 $M_0$ 、拐角频率 $f_c$ 和应力降 $\Delta\sigma$ ,对于我们 认识震源物理过程并揭示该区域的深部构造过程具有启示意义。

#### 应力降的时空分布

主震的应力降为7.1MPa,余震的应力降中值为59.4kPa。紧邻主震 和断层迹线的余震事件一般表现较低的应力降(图1a);随着余震活动减弱, 应力降迅速减小(图2); 位于同震滑移较大区域的余震事件通常应力降较 低(图3)。以上观测可能说明这部分断层上累积的应变能可能已经被基本 释放(王阅兵等, 2018)。

![](_page_25_Figure_11.jpeg)

图3 2017年九寨沟地震及其余震应力降在断层面上的空间分布 主震用五边形表示。背景颜色表示同震滑移量分布(王卫民等,2017)。

#### 地震自相似性

假设常数应力降模型,可以拟合得到2017年九寨沟地震震源地区平 均应力降为93.0kPa(图4a),根据这个值将所有事件分为两组。统计发现, 应力降较低的余震事件表现出较高的自相似程度(图4b,蓝组),推测有 着相似的地震成核和破裂过程(Aki, 1967),可能受青藏高原东向扩张的 驱动和相关流体活动的影响(e.g., Sun et al., 2018); 其余事件的应力降大 致随地震矩 $M_0$ 增加(图4b, 红组), 可能在同震滑动较小的区域继续逐步 释放应力(房立华 et al., 2018)。

![](_page_25_Picture_15.jpeg)

图1 2017年8月8日九寨沟M7.0地震周边地区地形图和区域宽频 带Lg波Q值分布图(Zhao et al., 2013a, b)。 (a) 主震位置用红色五角星表示, 红色震源球绘制其震源机制解。震级 M_L大于2.0的余震用圆圈表示,并根据本研究所得应力降值填色。(b)本 研究所用台站用白色三角形表示。震源球表示青藏高原东部大地震的震 源机制解(http://www.globalcmt.org)。黑色线条表示断层和构造线。

![](_page_25_Figure_17.jpeg)

图4 2017年九寨沟地震及其余震 $M_0$ - $f_c$ 关系图 (a)假设常应力降模型,固定 $M_0 - f_c$ 对数域线性关系的斜率为-3, 拟合 得到震源区平均应力降为93kPa(黑色直线)。红色和蓝色圆圈分别表示 应力降大于和小于93kPa的事件群组,对两个群组的事件分别进行线性 拟合的结果用红色和蓝色直线表示。(b)在对数域内线性拟合 $M_o - f_c$ , 黑色、蓝色和红色线分别表示所有事件、小应力降事件群组和大应力降 事件群组的拟合结果,所得斜率可用于评估事件的自相似程度。

#### 基金资助

中国地震科学实验场基金(2019CSES0103, 2018CESE0102, 2016CESE0203)和国家自然科学基金(41630210, 41674060, 41974054)。

参考文献:

图2 2017年九寨沟地震及其余震的应力降和震级随时间变化图 主震用五角星表示。黑色水平虚线表示余震应力降中值59.4kPa。

1. Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res. 72, 1217-1231, doi: 10.1029/JZ072i004p01217. 2. Sun, J. B., H. Yue, Z. K. Shen et al. (2018). 2017 Jiuzhaigou earthquake: a complicated event occurred in a young fault system, Geophys. Res. Lett. 45, doi: 10.1002/2017gl076421. 3. Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang et al. (2013a). Crustal Lg attenuation within the North China Craton and its surrounding regions, Geophys. J. Int. 195, 513-531, doi: 10.1093/gji/ggt235. 4. Zhao, L. F., X. B. Xie, J. K. He et al. (2013b). Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography, Earth Planet. Sci. Lett. 383, 113-122, doi: 10.1016/j.epsl.2013.09.038. 房立华,吴建平,苏金蓉等,2018.四川九寨沟M_s7.0地震主震及其余震序列精定位.科学通报 63,649-662,. 6. 王卫民,何建坤,郝金来等,2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震震源破裂过程反演初步结果, http://www.itpcas.ac.cn/xwzx/zhxw/201708/t20170809 4840737.html. 王阅兵, 甘卫军, 陈为涛 等 .2018.GNSS观测的九寨沟7.0级地震同震位移初步结果. 地球物理学报,61(1): 161-170,doi: 10.6038/cjg2018L0611

![](_page_26_Picture_1.jpeg)

#### 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

#### 川滇地区高分辨率上地壳Pg波衰减成像

李若婕¹,赵连锋¹,谢小碧²,宋怡杉¹,姚振兴¹ 1.中国科学院地质与地球物理研究所,地球与行星物理院重点实验室,北京,100029 2.美国加州大学圣克鲁兹分校,地球物理与行星物理研究所,圣克鲁兹,CA 95064

川滇地区位于青藏高原东南缘,是青藏高原岩石圈物质逃逸的出口^[1]。 而青藏高原构造变形和物质逃逸的动力学机制一直备受争议。我们在川滇 地区尝试开展高分辨的衰减成像研究,期望给出地壳物质流动通道是否连 通的解答,进而为青藏高原隆升、垮塌和扩展机制研究提供更高分辨率地 这些台站的资料分别从中国地震学科数据中心国家测震台网数据备份 中心(http://www.seisdmc.ac.cn/class/view?id=37),中国地震学科数据中 心地震科学探测台阵(http://www.chinarraydmc.cn/)收集。 在震中距范围70 - 800 km挑选中等强度(m_b4.0 - 6.5)的上地壳内地 震事件的高信噪比Pg波形数据,其群速度窗口为6.3 - 5.4 km/s,提取P波前 噪声序列,经过去噪处理后构建Pg波振幅谱数据集。

#### 三、取得进展和成果

98° 100° 102° 104° 106° 98° 100° 102° 104° 106° 98° 100° 102° 104° 106°

![](_page_26_Picture_9.jpeg)

#### 一、研究目标和主要内容

#### (一)研究目标

(1)建立川滇地区高分辨率(0.3°×0.3°)地壳Pg波衰减模型; (2)探讨青藏高原东南缘物质逃逸的动力学机制。

#### (二) 主要内容

选取川滇地区中等强度地壳内地震事件的高信噪比波形记录,从垂直 分量地震记录中提取Pg波信号,计算振幅谱。将已有的Lg波Q值成像方法 移植到Pg波,建立川滇地区宽频带高分辨率的上地壳Pg波衰减模型。据此 圈定地壳内的构造活动性强、高温异常和韧性流体分布的区域,推测川滇 地区地壳物质流动的分布状态,为高原物质逃逸的动力学机制提供证据。

#### 二、方法和数据

(一)方法

Pg波的振幅谱可以表示为^[2-4]:

 $A(f) = S(f) \cdot G(\Delta, f) \cdot \Gamma(\Delta, f) \cdot P(f) \cdot r(f)$ 

![](_page_26_Figure_19.jpeg)

其中 f 是频率, A(f)是观测的谱振幅, P(f)是台基响应, r(f)是随机 效应, S(f)是震源谱,  $G(\Delta, f)$ 是几何扩展项,  $\Gamma(\Delta, f)$ 是衰减项。 将已有的Lg波Q值成像方法^[5-8]移植到Pg波, 建立基于单台、双台和双 事件数据的Pg波Q值、震源函数和台基响应的联合反演系统

$$\begin{array}{c|c} \delta \mathbf{H} \\ \delta \mathbf{H}_{2sta} \\ \delta \mathbf{H}_{2eve} \end{array} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_{2sta} \\ \mathbf{A}_{2eve} \end{bmatrix} \cdot \delta \mathbf{Q} + \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ 0 \\ \mathbf{E}_{2eve} \end{bmatrix} \cdot \delta \mathbf{S} + \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{U}_{2sta} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \delta \mathbf{P}$$
(2)

使用最小二乘正交分解法(LSQR)求解方程(2),其中包括数据规格化、 阻尼和平滑约束^[9-10]。初始输入模型是只利用双台数据且忽略台基响应所 得到的区域Q值模型,迭代收敛条件是观测的Pg波振幅谱与合成数据之间 残差的L1范数最小^[7,8,11]。

#### (二)数据

![](_page_26_Figure_24.jpeg)

采用中国国家地震台 网和全球地震台网在川滇 地区的固定台站和汶川地 震震后临时观测、三维地 壳上地幔速度结构的宽频 带流动地震台阵、中国地 震科学台阵探测--喜马拉 雅I期的临时台站共532个 地震台站的观测资料。

(1)

![](_page_26_Figure_26.jpeg)

图2 Pg波衰减成像结果,(a)至(d)分别为0.5Hz,1.0 Hz,2.0 Hz以及5.0 Hz的成像结果,分辨率为0.3°×0.3°;(e,f)频率为1.0Hz的射线路径覆盖图。

#### 参考文献

- 1. Royden, L. H., B. C. Burchfiel, R. D. van der Hilst (2008), The geological evolution of the Tibetan Plateau, *Science*, *321*(5892), 1054-1058, doi:10.1126/science.1155371.
- 2. Sereno, T. J., S. R. Bratt, T. C. Bache (1988), Simultaneous Inversion of Regional Wave Spectra for Attenuation and Seismic Moment in Scandinavia, *J. Geophys. Res.*, *93*(B3), 2019-2035.
- 3. Xie, J. (2007), Pn Attenuation beneath the Tibetan Plateau, Bull. Seismol. Soc. Am., 97(6), 2040-2052.
- 4. Xie, J., H. J. Patton (1999), Regional phase excitation and propagation in the Lop Nor region of central Asia and implications for P/Lg discriminants, *J. Geophys. Res.*, 104(B1), 941-954.
- Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang, J. L. Hao, Z. X. Yao (2016), Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test, *Geophys. J. Int.*, 206(3), 1487-1491, doi:10.1093/gji/ggw239.
- 6. Zhao, L. F., X. B. Xie, J. K. He, X. B. Tian, Z. X. Yao (2013), Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *383*, 113-122, doi:10.1016/j.epsl.2013.09.038.
- 7. Zhao, L. F., X. B. Xie, B. F. Tian, Q. F. Chen, T. Y. Hao, Z. X. Yao (2015), Pn wave geometrical spreading and attenuation in Northeast China and the Korean Peninsula constrained by observations from North Korean nuclear explosions, *J. Geophys. Res.*, *120*(11), 7558-7571, doi:10.1002/2015JB012205.
- 8. Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang, J. H. Zhang, Z. X. Yao (2013), Crustal Lg attenuation within the North

China Craton and its surrounding regions, *Geophys. J. Int.*, 195(1), 513-531, doi:10.1093/gji/ggt235.
Paige, C. C., M. A. Saunders (1982), LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares, *ACM Trans.Math. Softw.*, 8(1), 43-71.
Phillips, W. S., H. E. Hartse, S. R. Taylor, G. E. Randall (2000), 1 Hz Lg Q tomography in central Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 27(20), 3425-3428, doi: 10.1029/2000GL011482.
赵连锋, 王卫民, 姚振兴 (2004), 逐次线性化衰减层析成像方法研究, *地球物理学报*, 47, 691-696.

![](_page_26_Picture_38.jpeg)

#### 中国地震科学实验场基金(2019CSES0103, 2018CESE0102, 2016CESE0203) 和国家自然科学基金(41630210, 41674060, 41974054)。

![](_page_27_Picture_2.jpeg)

#### 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

- 中国四川盆地南部2019年M_L 6.0长宁地震及其余震序列应 力降的时空变化
  - 沈琳^{1,2},赵连锋¹,谢小碧³,何熹¹,王卫民⁴,姚振兴¹
  - 1. 中国科学院地质与地球物理研究所北京 100029;
    - 2. 中国科学院大学北京 100049;
  - 3. 美国加州圣克鲁兹分校 圣克鲁兹 CA 95064;
    - 4. 中国科学院青藏高原研究所北京 100101.

![](_page_27_Figure_10.jpeg)

#### 1. 引言

北京时间2019年6月17日22时55分在中国西南地区四川省长宁县发生 M₁6.0地震,震源深度约16km。主震之后发生多次余震,尺度达20km,大 致沿305°走向。截至9月30日共计2.5级以上余震94次。重定位结果表明地 震序列分布于长宁背斜。主震震源机制解表示以逆冲和逆冲兼走滑型地震 为主。本次6.0级地震是四川盆地南部有史以来发生的最大的地震,四川 盆地现今作为一个稳定的刚性块体,GPS资料显示内部无明显形变,应具 有较低的地震活动性。但近些年来,四川盆地内部地震频发,可能与常年 的工业注水相关。

一些学者认为诱发地震的应力降低于天然地震。研究应力降能够为诱 发地震甄别提供约束。应力降为地震前后断层面上平均应力的差值,可指 示地震应力释放大小和提高对震源物理的认识,并且为强地面运动提供约 束。本次研究我们利用前人高分辨率Lg波Q值模型,对Lg波观测振幅谱进 行修正,得到2019长宁地震序列的地震矩和拐角频率,利用Brune(1970)震 源谱模型拟合,进而计算应力降。

![](_page_27_Picture_14.jpeg)

![](_page_27_Picture_15.jpeg)

图2 2019年长宁地震序列时空分布图

 $\bigcirc \bigcirc \bigcirc \bigcirc$ Δσ (kPa)  $10^{2}$  $M_{\rm L} 3.0 \ \odot M_{\rm L} 4.0 \ \odot M_{\rm L} 5.0 \ \odot M_{\rm L} 6.0$ Time since 2019–06–17 (days) (b)σ (kPa)

3. 讨论与结论

长宁地区在短时间内应力降并没 有迅速减小,长时间范围内应力降减 小。说明此次6级主震在一定程度上释 放了改区域的应力,但同时也引发了 与主震应力降相当的地震。应力降与 震级呈正相关关系、该现象不符合 (Aki,1967)提出的地震自相似模型,意 味着越大震级的余震可能有更大的能 力去错动更大的断层(Boyd et al., 2017)。 2019长宁地震序列相较于周边区域的 构造地震具有较小的应力降值、应力 降数值与距离盐矿井距离无明显关系。 综合前人研究结果推测整个背斜系统 可能整体处在高孔隙压力影响下。 虽然低值应力降指示地面运动不 强,但是诱发地震震源深度浅,同时 四川盆地浅部沉积层较厚会放大地震 影响,所以该区域诱发地震可能会对 小范围区域内造成较大破坏。持续的 注水可能会导致地下复杂断层系统相 连接, 断层尺度大可能会有更大破坏 性的地震发生,因此我们建议该区域 建立一套"红绿灯系统",一旦地震

震级超过阀值,需要进行减产或停产

措施以降低地震灾害。

图1 2019年9月17日长宁M_L6.0地震周边地区地形图和区域宽频带 Lg波Q值分布图(Zhao et al., 2013a, b)。 (a) 主震位置用红色五角星表示, 红色震源球绘制其震源机制解, 震级 M_L大于2.5的余震用圆圈表示,并根据震源深度值填色; (b) 本研究所用 台站用白色三角形表示。震源球表示四川盆地周边大地震的震源机制解 (http://www.globalcmt.org)。黑色线条表示断层和构造线; (c)长宁盐矿 井分布示意图 (Sun et al., 2017).

![](_page_27_Figure_20.jpeg)

图4 (a) 长宁地震序列的应力降随时 间的变化; (b) 应力降与震级的关系 (c) 应力降与盐矿井距离之间 图; 的关系

#### 基金资助

中国地震科学实验场基金(2019CSES0103, 2018CESE0102, 2016CESE0203) 和国家自然科学基金(41630210, 41674060, 41974061 41974054)。

#### 2. 应力降时空分布

#### 主震的应力降为4.3MPa, 地震序列的应力降中值为0.15MPa。应力降 时空分布显示该区域较为复杂的应力释放过程和强烈的横向不均匀性。应

力降大小与在长宁背斜系统上的位置无明显关系,与距离主震距离无明显

关系,与深度有一定相关性。

![](_page_27_Picture_29.jpeg)

1. Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res. 72, 1217-1231, doi: 10.1029/JZ072i004p01217. 2. Boyd, O. S., D. E. McNamara, S. Hartzell, G. Choy (2017), Influence of lithostatic stress on earthquake stress drops in North America, Bull. Seismol. Soc. Am., 107(2), 856-868, doi:10.1785/0120160219.

3. Brune, J. N. (1970), Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75(26), 4997-5009.

4. Sun, X. L., P. T. Yang, Z. W. Zhang (2017), A study of earthquakes induced by water injection in the Changning salt mine area, SW China, J. Asian Earth Sci., 136, 102-109, doi:10.1016/j.jseaes.2017.01.030. 5. Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang et al. (2013a). Crustal Lg attenuation within the North China Craton and its surrounding regions, Geophys. J. Int. 195, 513-531, doi: 10.1093/gji/ggt235.

6. Zhao, L. F., X. B. Xie, J. K. He et al. (2013b). Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography, Earth Planet. Sci. Lett. 383, 113-122, doi: 10.1016/j.epsl.2013.09.038.

![](_page_28_Picture_2.jpeg)

## 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

#### 利用ChinaArray高密度台网资料进行地震Lg波 高分辨率衰减成像研究青藏高原东南缘的地壳变形 ^{宋怡杉1},赵连锋¹,谢小碧²,姚振兴¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所北京 100029

² University of California Santa Cruz CA 95064

#### 摘要

在印度和欧亚板块的碰撞汇聚作用下,青藏高原地壳发生持续隆升

#### Q值-频率剖面图与地表地形和壳幔结构

![](_page_28_Figure_10.jpeg)

和缩短。大地测量^[1]的观测结果表明,位于青藏高原东南缘的川滇地区 发生强烈的变形和断裂错动。复杂的地壳结构对在其中传播的地震波, 尤其是Lg波,具有强烈的吸收和散射作用,从而导致其振幅发生显著衰 减。这种振幅衰减通常用介质的Q值来描述。因此,我们在川滇地区开 展了高分辨率(0.3°×0.3°)的地壳Lg波Q值成像研究,可以获得川滇地区的 地壳结构,揭示中下地壳在川滇块体可能存在的部分熔融或物质流动, 并为川滇地区和青藏高原的构造演化过程提供进一步的约束,获得该地 区构造运动的新认识。

#### 数据和方法

通过挑选2000年6月到2016年9月间中国国家地震台网(CNDSN)、 全球地震台网(GSN)和流动地震台站共计算1038个宽频带数字地震台 站记录到的震级范围在3.5至6.0的地震事件的39,967个垂直分量波形数 据(图1a),利用Lg波Q值层析成像方法^[2-4],建立了川滇地区宽频带 高分辨率地壳Lg波衰减模型。

#### 结果和讨论

典型分辨率的衰减图像

图2. Q值分布的剖面图。(a). 北纬31°的地表地形和Q_{Lg}值频率剖面图与Liu^[5]在同纬度的地 壳和上地幔S波速度剖面图的比较。顶部为沿剖面的地表地形图,中部CRUST1.0模型的 MOHO面深度以及Liu等人得到的中下地壳的S波低速异常区,底部是沿剖面上的Q值与频 率的关系剖面图。其中剖面位置如图3中的蓝色实线所示。(b)和(c)分别代表北纬25°和横跨 川滇菱形块体的地形和Q_{Lg}值频率剖面图,位置如图3中黄色和绿色实线。

川滇地区的Lg波Q值分布表现出较强的横向不均匀性,可能与该地 区复杂的地质构造密切相关。其中川西块体和滇东块体存在明显的低Q 异常,并且沿红河断裂呈现出若联通属性,这可能与中下地壳存在粘滞 性地壳流,活跃的热活动或者破碎的上地壳结构有关。通过与S波速度 的剖面结构^[5]进行对比(图2),可以看到Lg波强烈衰减区与S波低速区 具有良好的对应关系,这可能由于地壳部分熔融或壳内物质流动所致^[5]。

![](_page_28_Picture_18.jpeg)

![](_page_28_Picture_19.jpeg)

利用川滇地区近十年数字地震台网宽频 带地震台站和以喜马拉雅I、II期为代表的宽

利用上述数据集进行Q值层析成像反演,得到 0.05-10.0 Hz之间58个 频率的Lg波Q值分布。

![](_page_28_Figure_22.jpeg)

频带流动地震台站,记录到的33967个区域 事件的垂向分量的波形资料,对区域Q值和 Lg波源谱函数同时进行反演,建立川滇地 区宽频带(0.2-3.0Hz)高分辨率(0.3°×0.3°)的 Lg波衰减模型。川滇地区Lg波Q值分布受印 度板块向北俯冲、缅甸板块向东俯冲、扬子 板块的西向阻挡的多重影响下,具有明显的 横向不均匀性。构造与热物质运动活跃与 地区Q值相对较低,比如松潘甘孜块体、川 西块体、滇东块体,龙门山断裂带;稳定块 体Q值相对较高,比如四川盆地。宽频带的 Lg波Q值模型显示下地壳可能发育有两条的 地壳流通道,并跨过丽江小金河断裂存在弱 联通属性。

#### 基金资助

中国地震科学实验场基金(2019CSES0103, 2018CESE0102, 2016CESE 0203)和国家自然科学基金 (41630210, 41674060, 41974054)。

图1 (a)台站和事件的分布图,其中红色十字表示挑选的区域地震事件的震中位置,黑色三角形代表喜马拉雅I期台阵,黑色倒三角代表喜马拉雅II期台阵,蓝色三角表示三维上地壳地幔速度结构的宽频带流动地震探测台阵,黑色圆圈表示汶川地震震后临时观测台阵,蓝色正方形表示中国地震台网中心的固定台站,蓝色圆圈表示IRIS的固定台站。(b, c) Lg波衰减成像结果,分辨率分别为 0.5°×0.5°, 0.3°×0.3°在频率1.0 Hz 的成像结果; (d) 单台法频率1.0 Hz的射线路径覆盖图; (e, f) 为分辨率分析的棋盘格模型重建结果。

![](_page_28_Picture_27.jpeg)

 Zhang, P. Z., Z. Shen, M. Wang, W. J. Gan, R. Burgmann, P. Molnar (2004), Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data, *Geology*, *32*(9), 809-812, doi:10.1130/G20554.1.
 Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang, J. L. Hao, Z. X. Yao (2016), Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test, *Geophys. J. Int.*, *206*(3), 1487-1491, doi:10.1093/gji/ggw239.
 Zhao, L. F., X. B. Xie, W. M. Wang, J. H. Zhang, Z. X. Yao (2010), Seismic Lg-wave Q tomography in and around Northeast China, *J. Geophys. Res.*, *115*(B08), B08307, doi:10.1029/2009jb007157.
 Zhao, L. F., X. B. Xie, J. K. He, X. B. Tian, Z. X. Yao (2013), Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *383*, 113-122, doi:10.1016/j.epsl.2013.09.038.
 Liu, Q. Y., R. D. van der Hilst, Y. Li, H. J. Yao, J. H. Chen, B. Guo, S. H. Qi, J. Wang, H. Huang, S. C. Li (2014), Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults, *Nat. Geosci.*, *7*(5),

361-365, doi:10.1038/ngeo2130.

![](_page_29_Picture_1.jpeg)

### 针对大陆型强震的科学问题汇聚国内外前沿地震科学技术 面向从地震孕育到地震灾害风险的全链条开展科技攻关

#### 利用分布式光纤声波传感器监测大容量气枪震源信号 MONITORING SIGNAL OF AIRGUN SOURCE WITH DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING

李孝宾¹ 宋政宏^{2,3} 杨军¹ 曾祥方^{2*} 王宝善³

1云南省地震局,云南大理,67100

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北武汉,430077 3 中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥,230026

近年来出现的新型高密度地震观测系统—分布式光纤声波传感器

. . . . (0)

(Distributed Acoustic Sensing) 有望提高地震成像的空间分辨率。为了探 索该技术在监测介质动态变化方面的应用,在云南宾川布设了长约180米 的传感光缆,对9.6千米外的宾川大容量气枪震源的激发信号进行了监测。 在为期2天的实验期间, 气枪震源进行了24次高重复激发, 采用时频域加 权相位叠加算法,对多炮和多道记录进行叠加处理得到高质量的地震波信 号, 与共址观测的地震仪记录具有较高的一致性。通过这次观测实验, 初 步验证了利用DAS监测大容量气枪震源信号的可行性,有望推广应用于高 分辨率4D 地震成像研究中。

![](_page_29_Figure_11.jpeg)

![](_page_29_Figure_12.jpeg)

图3. 地震仪和DAS记录气枪信号的时频分析图.

(a)地震仪东西分量tf-PWS叠加记录; (b) DAS CH50的tf-PWS叠加记录; (c) & (d)分别是(a)和(b)

的时频分析结果,颜色代表归一化后能量.

![](_page_29_Figure_16.jpeg)

图5. DAS X分支多道记录叠加结果.

(a) tf-PWS多道单次激发tf-PWS叠加

(红线)和CH20单道多次激发tf-PWS叠

加波形(蓝线); (b) X分支各道记录。

(b)中颜色代表振幅。台阵叠加有效增

加信噪比(Rost & Thomas, 2002)

![](_page_29_Figure_17.jpeg)

![](_page_29_Figure_18.jpeg)

![](_page_29_Figure_19.jpeg)

![](_page_29_Figure_20.jpeg)

#### 图2. 地震仪和DAS记录的宾川地震信号发射台信号.

(a)地震仪东西分量记录的24次气枪信号叠加波形; (b) 地震仪东西分量记录的单次激发信

号; (c) b中数据的平均频谱; (d) DAS CH50 记录24次气枪信号叠加波形; (e) DAS CH50记

录的单次激发信号; (f) e中数据的平均频谱。叠加波形图(a, b)中黑色表示线性叠加波形,

红色表示tf-PWS叠加波形.

![](_page_29_Picture_26.jpeg)

1. Kristekova M, Kristek J, Moczo P. Time-frequency misfit and goodness-of-fit criteria for quantitative comparison of time signals[J]. Geophysical Journal International, 2009, 178(2): 813-825.

2. Rost S, Thomas C. Array seismology: Methods and applications[J]. Reviews of geophysics, 2002, 40(3): 2-1-2-27. 3. 李孝宾,宋政宏,杨军 等,利用分布式光纤声波传感器监测大容量气枪震源信号,地震地质。 2020,待刊。