中国川滇地区公共速度模型构建: 思路与进展

姚华建^{1,2,3*}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理实验室, 合肥 230026;

2. 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 蒙城 233500;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

* 通讯作者, E-mail: hjyao@ustc.edu.cn

收稿日期: 2020-04-22; 收修改稿日期: 2020-06-10; 接受日期: 2020-06-15; 网络版发表日期: 2020-07-06

中国地震科学实验场项目(编号: CSES20180101)和国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1503400)资助

1 引言

印度板块与欧亚大陆的俯冲碰撞导致青藏高原及周缘区域地壳上地幔物质发生大规模的变形, 物质从青藏高原中部向东部运移, 并主要通过青藏高原东南缘(中国西南川滇地区)向东南亚地区逃逸, 在川滇地区形成了以鲜水河-小江断裂带、龙门山断裂带、红河断裂带等为代表的一系列活动断裂带和地震带. 2000年以来川滇地区发生多次6级以上中强地震(尤其是2008年8.0级汶川地震), 造成了重大的人员伤亡和财产损失, 因此地震监测预报及防震减灾工作一直是川滇地区最为重要的工作之一.

目前, 研究地震活动性和地震灾害分布特征、地震孕育发生的结构和构造背景、地震震源物理、地震预警及预测等问题是中国地震科学研究的重要内容, 而区域高精度、多尺度三维速度结构参考模型的构建则是这些研究工作的基础. 目前在国际上以美国南加州地震中心(SCEC)为代表的科研机构在南加州地区公共速度模型(community velocity model, CVM)构建方面开展了系统的、卓有成效的研究. 他们从1996年开始这项工作, 模型构建数据不断丰富, 反演方法不断完善, 目前已经推出两个不同版本的公共速度模型

(CVM-S4.26, Lee等, 2014; CVM-H15.1.0, Shaw等, 2015). 公共速度模型的构建为南加州地区的地震学研究提供了重要的基础, 也为中国川滇地区及世界其他地区公共速度模型的构建提供了有益的经验 and 思路.

2 川滇地区公共速度模型构建现状

与美国南加州地区相比, 中国川滇地区的公共速度模型构建工作起步较晚, 2016年中国地震局地震科学实验场开始组织实施川滇地区公共速度模型构建的系统性调研和研究工作. 在此之前, 虽然近十几年来川滇地区固定与流动台网布设的密度和质量有了本质的提高(图1a), 发表的川滇地区结构模型成果也已经很多, 但已发表模型的尺度复杂多样, 采用的数据类型和反演方法也是多种多样, 并未形成公认的、广泛使用的川滇地区公共速度模型. 并且不同数据获得的模型仍然存在明显的差异, 甚至同一类型的数据获得的模型由于其反演方法、模型参数化及正则化方式的不同, 也导致反演得到的模型存在差异.

目前这些不同分辨率和不同尺度的速度结构模型的精确度、适用度、可更新度评价等方面的研究工作几乎没有. 且构建模型所使用的地震信息(例如, 位

中文引用格式: 姚华建. 2020. 中国川滇地区公共速度模型构建: 思路与进展. 中国科学: 地球科学, 50: 1319–1322, doi: [10.1360/SSTe-2020-0106](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0106)

英文引用格式: Yao H. 2020. Building the community velocity model in the Sichuan-Yunnan region, China: Strategies and progresses. Science China Earth Sciences, 63: 1425–1428, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9645-3>

图1 川滇地区不同尺度地震台阵

(a) 固定(黑色三角)和流动(蓝色三角)宽频带台站; (b) 滇西宾川盆地密集短周期面状台阵(蓝色三角; 近400个短周期地震仪, 台站间距约2km), 图形区域如(a)中黑框所示; (c) 滇西程海断层密集短周期线性台阵(蓝色三角; 约8km长, 150个短周期地震仪, 台站间距约50m), 图形区域如(b)中黑框所示

置、震源机制等)的精度还有待进一步提高. 这些基础性工作的滞后或缺乏, 也制约了川滇地区其他研究工作的深入开展, 例如公共断层模型的构建、强地面运动计算及地震灾害预测、震源动力学模拟等.

3 多尺度公共速度模型构建的整体思路

在中国地震科学实验场的支持下, 也得益于前期大量调研和研讨的基础, 已形成川滇地区公共速度模型构建的整体性思路(图2a). 主要基于地震学资料, 我们在川滇地区开展“多尺度速度结构模型构建-地震震源参数确定-速度模型及震源参数评价”的系统性研究工作, 三个研究单元相互支持, 更好地提升公共速度模型构建的可靠性和精度. 根据地震科学研究与地震工程应用的需求, 基于不同横向尺度和台站间距的地震台阵的波形数据, 采用地震学联合成像或全波形反演的方法, 我们需要在川滇地区构建四种不同尺度的公共速度模型(图2b), 即区域块体尺度、断裂带尺度、断层尺度和城市尺度, 其横向分辨率分别约为

10~50、1~5、0.1~0.5及1km.

区域块体尺度的公共速度模型可以通过川滇地区固定及流动宽频带台站(图1a, 台站间距约为10~50km)的数据反演获得. 该模型对于认识川滇地区主要块体分布与物性差异、构造特征与地球动力学问题、区域地震震源参数反演、中强地震孕育的结构与构造背景等科学问题具有重要的意义. 断裂带尺度、断层尺度和城市尺度的结构模型主要通过密集面状和线性流动台阵数据来反演获得(图1b和1c). 在川滇地区, 一些大型的活动断裂带是由多条断层组成, 例如龙门山断裂带、小江断裂带等. 为了更好地获得不同断层间的结构物性特征以及相互作用关系, 我们需要横向分辨率达到1~5km甚至更高的断裂带尺度速度结构模型. 地震的孕育发生往往从某一条活动断层开始, 然后破裂沿断层传播, 甚至跳跃到其他相邻断层, 因此断层本身的精细物性结构(横向分辨率达0.1~0.5km甚至更高)对于认识地震的孕育、发生和破裂传播过程至关重要. 例如断层破碎带结构, 通常需要跨断层布设超密集线性甚至面状台阵(台站间距达到数十米到数百米)才能获得.

图2 川滇地区公共速度模型构建的整体思路(a)以及四种不同尺度速度结构模型构建的思路(b)

区域块体尺度、断裂带尺度和断层尺度的模型将为地震主要孕育和发生的中上地壳提供关键的速度结构信息. 人口密集的城镇地区受地震灾害影响很大, 因此获得川滇地区主要城市的地壳浅层结构对于探查城市区域的断层分布、强地面运动模拟、地震灾害评估、城市规划等具有十分重要的地震工程意义, 其分辨率至少达到公里量级才能可靠地模拟较高频(1Hz及更高)的地震动. 因此在主要城市区域通过布设台站间距达到公里量级的面状密集台阵, 才有可能达到所需要的城市尺度模型的横向分辨率.

4 川滇地区公共速度模型构建进展

从2017年开始, 在中国地震科学实验场的支持下, 我们开始构建川滇地区多尺度速度结构模型, 目前已经取得初步进展. 对于区域块体尺度模型, 我们首先采用川滇地区114个固定台站高质量的背景噪声面波相速度频散、远震瑞利面波ZH振幅比及P波接收函数资料联合反演的方法, 获得了川滇地区地壳上地幔顶部三维横波速度结构模型(Yang等, 2020), 其横向分辨率约为50~100km. 以此模型为基础, 我们融合了固定台站双台间的远震和背景噪声面波相速度频散数据(周期范围为5~150s), 采用面波走时三维直接反演方法(Fang等, 2015)获得了川滇地区地壳上地幔(0~300km深度)三维横波速度结构模型(张智奇等, 2020), 更好地揭示了青藏高原东南缘地壳上地幔不同模式的构造运动.

在Yang等(2020)获得的模型基础上, 我们进一步使用川滇地区固定台站和部分流动台站记录的大量区域地震体波走时数据以及背景噪声瑞利面波走时数据(周期范围为5~50s), 采用体波和面波走时三维联合反演的方法(Fang等, 2016)构建了川滇地区第一版的区

域公共速度模型SWChinaCVM-1.0(网络版附图1, <http://earthcn.scichina.com>), 其横向分辨率在绝大部分地区可达50km. 该模型清晰地揭示了川滇地区壳内低速异常体的复杂空间分布特征, 以及高低速区域边缘密集地震分布的特征. 与川滇地区已经获得的其他三维速度模型相比, SWChinaCVM-1.0模型是可以同时较好拟合区域事件体波走时和中短周期瑞利面波走时的川滇地区地壳上地幔顶部高分辨率P波和S波速度结构模型. 目前该模型已经被应用于区域构造演化、地震定位、震源机制反演、接收函数成像、三维速度模型评价等方面的研究.

目前, 多个团队已经在云南宾川盆地(图1b; 张云鹏等, 2020)和程海断层(图1c; Yang和Duan, 2019)、安宁河-则木河-小江断裂带、红河断裂带、龙门山断裂带、川东南页岩气开发区域等川滇地区的城镇、断裂带和重点地震监测区域布设了不同尺度和台站间距的密集面状和线性地震台阵, 这些台阵为川滇地区多尺度和高分辨率模型的构建提供重要的数据支撑.

5 展望

目前我们主要基于固定台站的体波及面波走时成像获得了中国西南川滇地区1.0版本的三维公共速度模型SWChinaCVM-1.0, 后续将进一步加入密集流动台站(图1a)的体波和面波走时资料, 构建更高横向分辨率(约15~30km)的区域速度模型, 包括方位及径向各向异性速度结构模型. 此外, 在目前三维走时联合反演的框架下融合接收函数、瑞利面波ZH振幅比数据, 发展多种地震学数据的三维联合反演方法, 将有助于获得更可靠的区域三维速度结构模型. 最后, 基于区域地震事件的波形数据, 以及背景噪声互相关面波波

形数据, 采用全波形成像或伴随成像的方法(例如, Lee等, 2014; Dong等, 2019)构建更高精度的三维公共速度模型。

除了采用主被动源结合的走时和波形成像方法获得断裂带速度模型之外, 还需要利用断裂带区域发生的中小地震波形的模拟、围陷波分析、频谱分析等方法, 获得高分辨率的断裂带和断层破碎带速度结构模型。近些年来环保主动震源(例如, 气枪震源、甲烷震源等)技术快速发展, 未来可以在城市内部或边缘开展环保主动震源的激发工作, 结合背景噪声方法, 可以更好地提升城市地区结构成像的空间分辨率。将这些高分辨率的断裂带、断层和城市区域模型融入到整个川滇地区的公共速度模型中, 将最终得到多尺度的公共速度模型。如何评价多尺度公共速度模型的可靠性和精度是将来的一个重要任务。此外, 针对重点活动断裂带, 采用背景噪声与重复震源(例如, 重复地震、主动震源)开展速度结构随时间变化的研究, 可以更好地提升地震物理过程及预报方面的研究能力。

除公共速度模型构建之外, 川滇地区还需进一步构建统一结构模型, 例如公共界面模型(莫霍面、岩石圈-软流圈交界面等)、公共衰减结构模型、公共密度结构模型、公共电导率结构模型、公共断层模型, 以及公共流变学结构模型。这些研究可以更好地服务于川滇地区地震科学和地震工程研究, 也为中国其他地区统一结构模型的构建提供可借鉴的思路和方案。

致谢 感谢两位审稿人和执行主编对本文提出的修改建议, 感谢来自中国地震局、国内多所高校和研究所的科研人员对川滇地区公共速度模型构建工作所提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- 张云鹏, 王宝善, 林国庆, 王伟涛, 杨微, 吴中海. 2020. 利用密集台阵近震层析成像研究云南宾川上地壳速度结构. 地球物理学报, doi: 10.6038/cjg2020N0455
- 张智奇, 姚华建, 杨妍. 2020. 青藏高原东南缘地壳上地幔三维S波速度结构及其动力学意义. 中国科学: 地球科学, doi: 10.1360/SSTe-2020-0016
- Dong X, Yang D, Niu F. 2019. Passive adjoint tomography of the crustal and upper mantle beneath eastern Tibet with a W2-Norm misfit function. *Geophys Res Lett*, 46: 12986–12995
- Fang H, Yao H, Zhang H, Huang Y C, van der Hilst R D. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: Methodology and application. *Geophys J Int*, 201: 1251–1263
- Fang H, Zhang H, Yao H, Allam A, Zigone D, Benzion Y, Thurber C, van der Hilst R D. 2016. A new algorithm for three-dimensional joint inversion of body wave and surface wave data and its application to the Southern California plate boundary region. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 3557–3569
- Lee E J, Chen P, Jordan T H, Maechling P B, Denolle M A M, Beroza G C. 2014. Full-3-D tomography for crustal structure in Southern California based on the scattering-integral and the adjoint-wavefield methods. *J Geophys Res-Solid Earth*, 119: 6421–6451
- Shaw J H, Plesch A, Tape C, Suess M P, Jordan T H, Ely G, Hauksson E, Tromp J, Tanimoto T, Graves R, Olsen K, Nicholson C, Maechling P J, Rivero C, Lovely P, Brankman C M, Munster J. 2015. Unified Structural Representation of the southern California crust and upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 415: 1–15
- Yang Y, Yao H, Wu H, Zhang P, Wang M. 2020. A new crustal shear-velocity model in Southwest China from joint seismological inversion and its implications for regional crustal dynamics. *Geophys J Int*, 220: 1379–1393
- Yang H, Duan Y. 2019. High-resolution crustal structure illuminated by ultra-dense array recordings. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 93: 284

(责任编辑: 杨顶辉)