

一、模型研制的目的、必要性和需求分析

目的：建立川滇地区包括地形地貌、主要活动断裂地表迹线、地震目录、活动断裂地下三维结构的统一断层模型数据库；初步揭示主要活动断裂在三维空间的展布、几何结构。

必要性：三维断层建模是深入研究活动断层地下几何结构的重要基础；建立三维公共断层模型 *CFM*，是实现地震物理预测技术的关键环节之一。

需求分析：目前国内针对活动断层三维建模的技术和方法还处于起步和发展阶段，有大量的关键技术和方法正在探索；同时对科研、安评、科普等方面都具有非常大的需求。

二、模型预期指标和技术路线

预期指标：建立川滇地区三维可视化、主要活动断裂三维模型 *V1+*。

技术路线：基于 *SKUA-GOCAD* 三维建模平台，参考复杂构造三维建模方法和流程，进行活动断层的三维建模和验证分析。

三、模型数据来源和质量分析

- (1) 地表活动断层数据（本项目）；
- (2) 震源机制解（*CQMT*，邵志刚，龙锋，王晓山等提供）；
- (3) 小震精定位（朱艾澜等，2005；黄媛等，2008；房立华等，2013）；
- (4) 地壳速度模型（刘启元等，2014；张海江等，2018；姚华建等，2018）；
- (5) 人工地震反射剖面（中国石油，中国石化，中国地质大学（北京），中国地科院地质所，中国地震局地球物理勘探中心）；
- (6) 大地电磁数据和剖面（中国地震局地质所詹艳，陈小斌等提供）。

四、模型研制关键技术方法

- (1) 正、逆断层相关褶皱理论；
- (2) 构造剖面平衡恢复与检验；
- (3) 多源数据融合与属性分析；
- (4) 多元约束活动断层三维建模技术（表 1）。表 1. 多元约束活动断层三维建模技术和方法

序号	资料来源	技术特点
1	浅表活动断层调查	露头、探槽、钻探、年代学等
2	长周期与同震形变观测 (GPS、InSAR、水准)	拟合、反演等
3	区域地质与构造形变 (高程、浅层地质构造)	构造定量解析方法(倾角分析、轴面制图)
4	震源机制解析	CMT、波形拟合等
5	小震精定位与余震序列	双差定位等
6	人工地震反射剖面 (深、浅地震探测)	叠前/叠后、偏移 (断层相关褶皱原理)
7	高密度流动台站观测	噪音成像等
8	地震学台站观测	高精度层析成像
9	高密度电、磁等物探	联合反演、AMF法

五、模型完成情况与成果

(1) 建立了川滇地区主要活动断裂地表迹线

研究组自项目实施以来，一方面，收集和整理了川滇地区涉及鲜水河-龙门山断裂带、安宁河-则木河-小江断裂带、红河断裂带等断裂带的地质与地球物理文献资料，包括：20 万地质图、第四纪和活动断层填图、钻孔数据、地震等地球物理剖面、科学探测台阵数据、精定位地震数据、地震震源机制解等。另一方面，开展川滇实验场主要断裂带 LiDAR 数据采集工作，并获得了沿主要断裂带的高精度地形数据。基于这些基础数据，结合野外地质

考察，开展了实验场区断裂地貌的填图，对已有的川滇地区活动断裂图进行了检测更新，在 *Google Earth* 平台中对之前坐标投影转换时造成的位置偏移进行了纠正，对不同版本的断裂分布图进行评价和取舍判断，初步建立了川滇地区主要断裂带的地表迹线重新评估，提供以 *KMZ* 和 *ArcGIS Shape* 文件等形式的产品共享，并对主要断裂的产状和运动学参数进行数据汇总，以 *Excel* 文件的形式为后续工作参考。为活动断裂地下三维结构的统一断层模型数据库的建立提供了地表位置等数据支撑。

(2) 初步建立了川滇地区三维建模综合数据库和平台（图 1）；

(3) 完成川滇地区主要活动断裂三维断层初始模型 *V1.1* 版（图 2）；

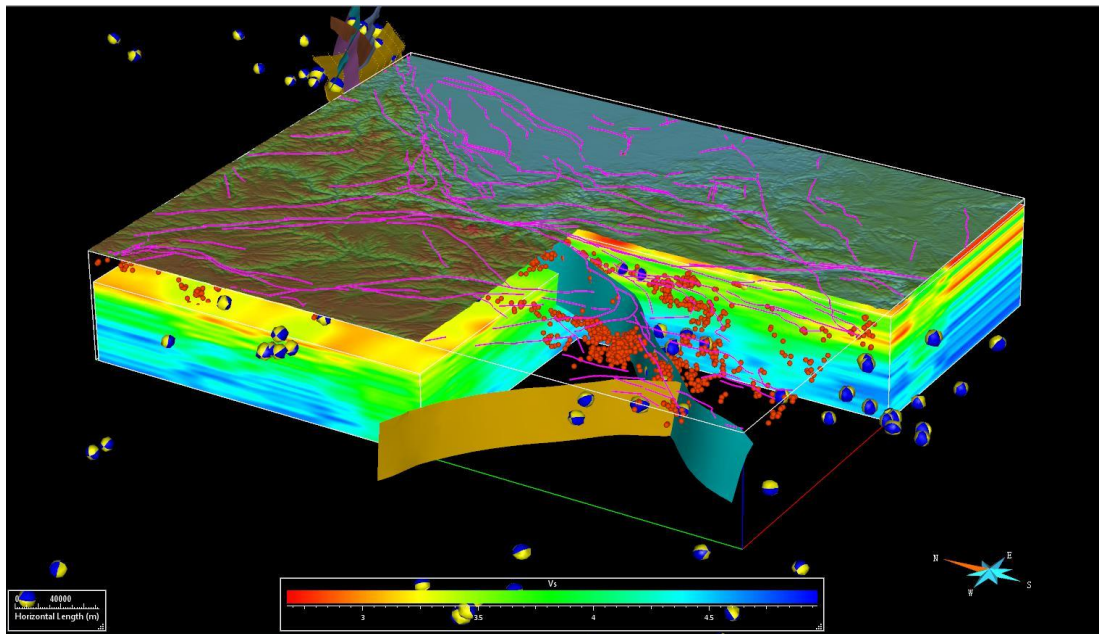


图 1. 川滇地区三维建模平台和综合数据库

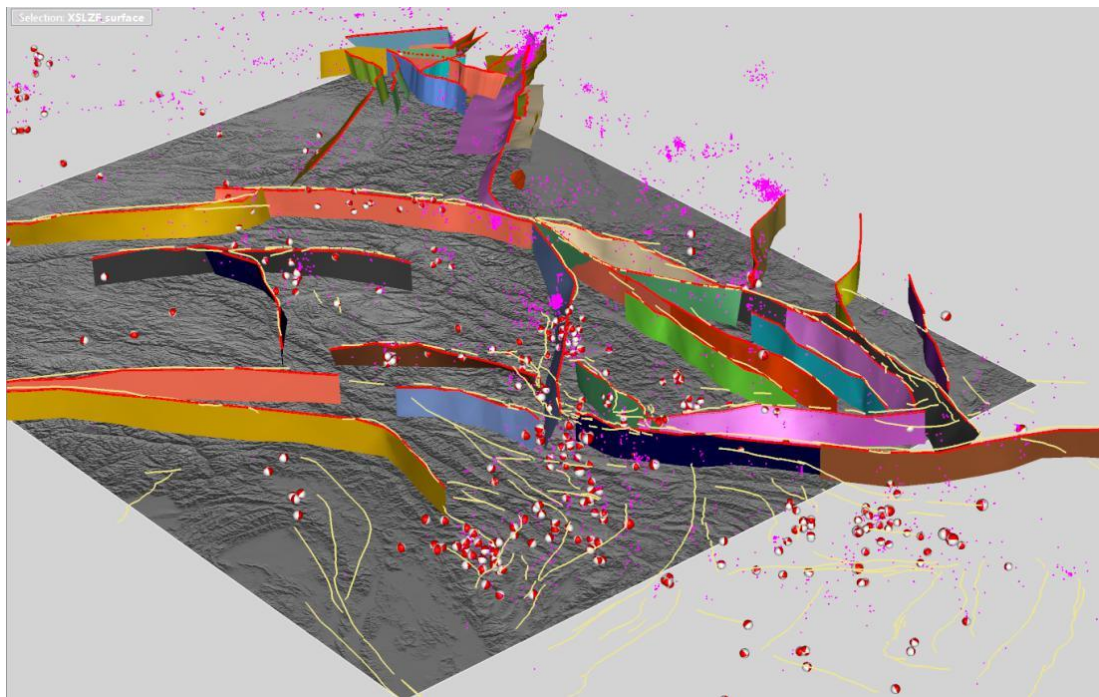


图 2. 川滇地区主要活动断裂三维断层模型 *V1.1*

(3) 发表文章成果(如下):

Lu Renqi, Liu Yiduo, Xu Xiwei, Tan Xibin, He Dengfa, Yu Guihua, Cai Minggang, Wu Xiyan;
Three-Dimensional Model of the Lithospheric Structure Under the Eastern Tibetan Plateau: Implications for the Active Tectonics and Seismic Hazards; *Tectonics*; 2019, 38, 1292-1307.
<https://doi.org/10.1029/2018TC005239>.

Tan Xibin, Liu Yiduo, Lee Yuanhsi, Lu Renqi, Xu Xiwei, Suppe John, Shi Feng, Xu Chong;
Parallelism between the maximum exhumation belt and the Moho ramp along the eastern Tibetan Plateau margin: Coincidence or consequence?; *Earth and Planetary Science Letters*; 507, 73-84.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.12.001>.

Lu Renqi, Xu Xiwei, He Dengfa, Suppe John, Liu Bo, Wang Fuyun, Tan Xibin, Li Yingqiang;
Seismotectonics of the 2013 Lushan Mw 6.7 earthquake: Inversion tectonics in the eastern margin of the Tibetan Plateau; *Geophysical Research Letters*; 2017 44, 8236-8243.

徐晶, 邵志刚, 刘静, 季灵运. 川滇菱形块体东边界库伦应力演化及强震发生概率估算[J]. 地球物理学报, 2019, 62 (11).

韩龙飞, 刘静, 袁兆德, 邵延秀, 王伟, 姚文倩, 王鹏, 梁欧博, 徐心悦. 基于高分辨率地形数据的冲洪积扇特征提取与演化模式讨论——以海原断裂带老虎山地区冲洪积扇为例[J], 地震地质, 2019, 41(2): 251-265.

葛玉魁, 刘静, 张金玉, 李亚林, 日喀则弧前盆地的埋藏和剥蚀历史——来自低温年代学的约束[J], 地震地质, 2019, 41(2): 447-466.

姚文倩, 刘静, Michael Oskin, 韩龙飞, 李雪, 王恒, 徐心悦, 李占飞, 张金玉. 利用 R 语言半自动化提取河流阶地——以米家山黄河阶地为例[J]. 地震地质, 2019, 41(2): 363-376.

张金玉, 刘静, 王恒, 石许华, 姚文倩, 徐晶, 徐心悦. 基岩断面宇宙成因核素暴露定年: 重建正断层古地震序列[J]. 地震地质, 2018, 40(5): 1149-1169.

王鹏, 刘静, 张智慧, 李志刚, 张金玉, 王伟, 邢秀臣. 隐伏断层在强震砂土液化中的作用——以 2008 年汶川 Mw 7.9 地震为例[J], 地质通报, 2018, 37(5): 747-758.

六、模型验证(测试)与精度评价

不同地区资料覆盖程度不一, 研究程度和进展也有所区别。

在断裂地表位置和运动学参数方面, 基于各断裂带分布地理位置的差异性、第四纪年代学方法的局限性, 以及相关科研项目的部署和分配等方面的制约, 目前川滇实验场主要活动断裂带的研究程度依然存在较大差异。

目前三维断层模型还是测试 V1.1 版, 三维断层模型在龙门山地区精度较高; 鲜水河断裂带、安宁河-则木河断裂带次之, 其它地区断层约束程度还比较低。

七、模型使用说明

三维断层模型使用说明, 参考附件文档 *Readme*。

八、应用案例

2019 年 6 月 17 日在四川宜宾地区发生了长宁 $M6.0$ 级地震。为进一步刻画同震破裂断层精细的几何结构，基于长宁地震余震重定位结果和主震震源机制等数据（房立华等，2019），研究在川滇实验场三维建模平台基础上，根据三维建模平台和相关模拟技术，初步建立了长宁地震破裂断层的三维模型。

三维模拟结果表明长宁地震破裂断层具有复杂的几何结构（图 3），并触发了其它分支断层的活动。断层主破裂面（F2）在空间上呈复杂的几何形态，主要包括西北段沿长宁背斜轴向的 SW 倾向断层面和东南段 NE 倾向断层面。F2 断层主体沿北西方向延伸，倾角范围在 $60^{\circ}\sim90^{\circ}$ 之间，平均值在 80° 左右，具有高角度倾滑特征。此外，还存在近垂直背斜轴向的两支分支断层（F1 和 F3）。震区的地表断层交错复杂，但与同震破裂断层并不直接关联。

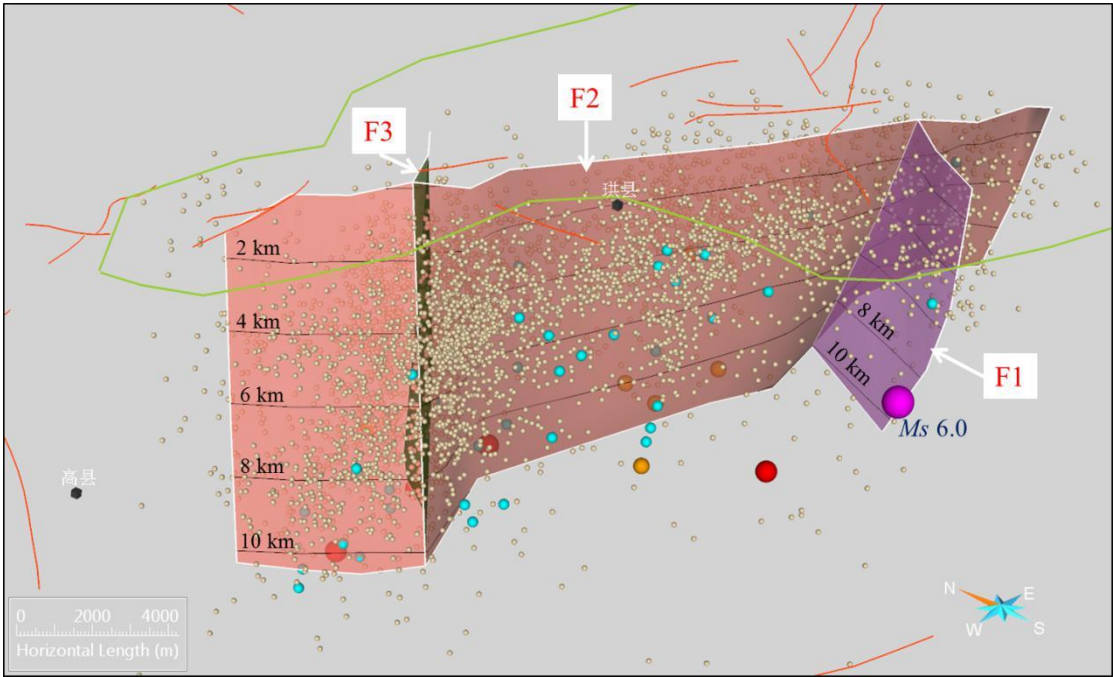


图 3. 长宁 $M_s 6.0$ 地震破裂断层三维模型图

（紫色圆球为长宁 $M6.0$ 主震位置，红色圆球为 $5.0\leq M<6.0$ 级地震，黄色圆球为 $4.0\leq M<5.0$ 级地震，蓝色圆球为 $3.0\leq M<4.0$ 级地震，其它小圆球为 $-1.0\leq M<3.0$ 小震；红色实线为地表断层分布，绿色实线为长宁背斜西北端）

Please cite the following reference if this model is used in your research:

Lu Renqi. (2019). The fault model in China Seismic Experimental Site. CSES Scientific Products., doi:10.12093/04md.02.2019.02.v1