

张振国, 孙耀充, 徐建宽等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸地震强地面运动初步模拟及烈度预测. 地球物理学报, 57(9): 3038-3041, doi:10.6038/cjg20140928.

Zhang Z G, Sun Y C, Xu J K, et al. 2014. Preliminary simulation of strong ground motion for Ludian, Yunnan earthquake of 3 August 2014, and hazard implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(9): 3038-3041, doi:10.6038/cjg20140928.

2014 年 8 月 3 日云南鲁甸地震强地面运动 初步模拟及烈度预测

张振国^{1,2,3}, 孙耀充^{1,2,3}, 徐建宽^{1,2,3}, 张伟^{1,2,3}, 陈晓非^{1,2,3}*

1 中国科学技术大学, 地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学技术大学, 地震学与地球内部物理实验室, 合肥 230026

3 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 合肥 230026

摘要 2014 年 8 月 3 日云南省昭通市鲁甸县发生了 $M_s 6.5$ 级地震. 在已知的三维介质模型、地形数据基础上, 利用震源运动学初步反演模型(张勇等, 2014), 作者采用曲线坐标网格三维曲线有限差分方法模拟了鲁甸地震波场传播过程, 并计算了模拟区域地震烈度分布. 结果表明: 地震最大烈度为 VII 度, 破坏主要集中在鲁甸县以及巧家县、会泽县靠近鲁甸县的边界. 另外, 模拟结果还显示地震动在山峰、山脊处具有较大的幅度. 计算表明断层东北侧的低速沉积盆地的波动放大效应加强了该地区的地震灾害.

关键词 鲁甸地震; 强地面运动; 地震烈度

doi:10.6038/cjg20140928

中图分类号 P315

收稿日期 2014-08-07, 2014-08-17 收修定稿

Preliminary simulation of strong ground motion for Ludian, Yunnan earthquake of 3 August 2014, and hazard implication

ZHANG Zhen-Guo^{1,2,3}, SUN Yao-Chong^{1,2,3}, XU Jian-Kuan^{1,2,3}*,
ZHANG Wei^{1,2,3}, CHEN Xiao-Fei^{1,2,3}*

1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3 Mengcheng National Geophysical Observatory, Hefei 230026, China

Abstract An $M_s 6.5$ earthquake occurred at Ludian county, Yunnan province on August 3, 2014. With the available three-dimensional velocity model and topography data, as well as the preliminarily inverted kinematic source model (Zhang et al. 2014), we simulated the seismic wave propagation of Ludian earthquake with 3D curved grids finite-difference method, and calculated the distribution of seismic intensity for the modeling region. The simulated results reveal that the highest seismic intensity caused by this earthquake is about degree 7, mainly in Ludian County and the boundaries between Ludian County and Qiaojia and Huize County. The simulation result

基金项目 国家自然科学基金项目(41090293, 41274053)资助.

作者简介 张振国, 男, 1987 年生, 中国科学技术大学固体地球物理学在读博士. 主要研究领域包括: 地震三维复杂介质中传播效应, 数值计算, 地震动力学模拟等. E-mail: zgzhang7@mail.ustc.edu.cn

* **通讯作者** 陈晓非, 男, 中国科学技术大学地球和空间科学学院教授. 主要研究领域包括: 复杂地球介质中地震波传播, 震源破裂动力学及地震物理学, 近场强地面震动定量模拟及震害分析等. E-mail: xfchen1@ustc.edu.cn

also implies that ground motion has large amplitudes at the mountain peaks and ridges. The numerical modeling indicates that the amplification effect of low velocity basin at the northeastern of the earthquake fault may aggravate the seismic hazard.

Keywords Ludian earthquake; Strong ground motion; Seismic intensity

1 引言

2014年8月3日16时30分,云南省昭通市鲁甸县发生了 $M_s 6.5$ 级地震,震中位置为北纬 27.1° ,东经 103.3° ,震源深度12 km.地震发生约2 h之后,北京大学地空学院张勇等人给出了鲁甸地震运动学反演过程(张勇等,2014).反演结果显示,鲁甸地震的矩震级为 $M_w 6.1$,主要破裂集中在12 km深度附近.尽管此次地震不算特大地震,但该地震造成了大的人员伤亡和财产损失.到目前为止鲁甸地震造成615人死亡,114人失踪,受伤人员达3143(中国地震信息网,2014).由于地震位于山区,地震还造成了山体滑坡,道路损坏,给救援带来更大困难.另外滑坡还导致了河道阻塞,形成堰塞湖,对下游居民安全造成隐患.本文利用该震源运动模型模拟计算鲁甸地震的近场强地面运动、计算出相应的烈度分布图,并在此基础上评估与分析该地震的震害分布特征,为科学抗震减灾与后续恢复重建提供初步的科学依据.

2 模型和方法

图1给出了计算区域及周边地貌情况,其中黑色边框代表计算区域,断层在地表的投影用蓝色框表示,红色五角星为震源在地表的位置.整个计算区域尺度为 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$,深度为65 km.由于发震断层近似垂直,断层在地表的投影区域很窄.图1中还给出了CMT (<http://www.globalcmt.org/>)对鲁甸地震给出的震源机制解,显示该地震近似为垂直走滑型破裂.

本文采用曲线网格有限差分方法(Zhang and Chen, 2006; Zhang et al., 2012)快速模拟鲁甸地震的强地面运动并分析其造成的地震灾害.该方法根据起伏地表建立曲线网格,并采用牵引力镜像法来处理自由表面条件,使得该方法能够准确地处理复杂地形问题.本次模拟选取GTOPO30地形数据,其水平分辨率大约为1 km.图1显示,该目标区域地形起伏较大,这将对强地面运动起重要影响.

速度介质模型对强地面运动模拟结果有重要的影响.由于没有其他更为可靠的关于本地震区域的速度结构模型,本文采用了基于全球速度结构的CRUST1.0模型(Laske et al., 2013),其水平分辨率为 1° ,即大约110 km. CRUST1.0模型包含了三层地壳、三层沉积层以及冰和水层以及莫霍面以下的均匀地幔.本文模拟区域在内陆,因此不考虑CRUST1.0中顶部的水层以及冰层.速度结构显示(图1b),地震东北侧存在厚度为1~2 km的低速层,这对地震灾害有重要影响.

鲁甸地震发生之后,张勇等人利用全球地震台网远震体波数据快速反演了该地震的震源破裂过程(张勇等,2014).该反演结果显示,地震发生在一长50 km、宽25 km断层面上,断层出露到地表,走向 162° ,倾角 86° .震中位置北纬 27.1° ,东经 103.3° ,震源深度12 km,矩震级为 $M_w 6.1$.断层滑动出露到地表,地表附近的滑动较小,主要滑动集中在震中附近、沿断层倾斜方向12 km深度处,最大滑移量约为0.5 m.

反演给出的震源模型中,子断层的空间分辨率为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$,空间采样频率是4,即间隔0.25 s给定一个滑动速率.为了计算上的合理,我们将断层面重采样为 $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$.由于张勇给出的震源模型中任意子断层的滑动角随时间是可变的,在空间重采样中我们考虑到了这一因素,即在每个时间间隔上都对整个断层面上的所有断层的滑动速率进行插值.

3 强地面运动模拟结果

图2给出了鲁甸地震模拟的 V_r 分量快照.红色五角星代表震源模型中的震中位置($27.1^\circ\text{N}, 103.3^\circ\text{E}$).根据震源反演结果(张勇等,2014)分析,地震主要能量由位于震中附近下方的位错产生,以水平走向错动为主,因此在断层垂向上产生了能量较强S波.本文采用的速度模型CRUSTAL1.0是全球范围内的速度模型,横向分辨率较低,大约为110 km.介质模型显示断层东北方向有厚度为1~2 km的低速(图1b).从图2(b—f)可以看出,地震在此处有较强的

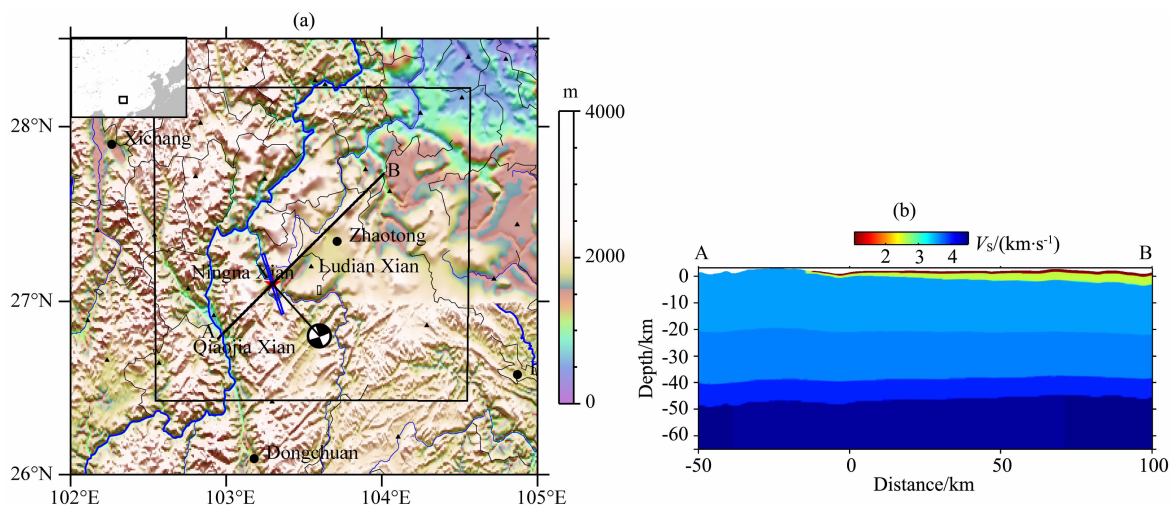


图1 (a)模拟计算区域以及周边地形图,其中红色五角星代表鲁甸地震震中,蓝色矩形框表示断层在地表的投影。(b)经过震中一个剖面(图(a)中黑线)的 V_s 波速

Fig. 1 (a) Topographic map of the simulation region and its vicinity. The red five-point star represents the hypocenter of Ludian earthquake, the blue rectangle means the surface projection of fault plane. (b) The velocity of V_s for the profile defined by the solid line crossing the hypocenter in (a)

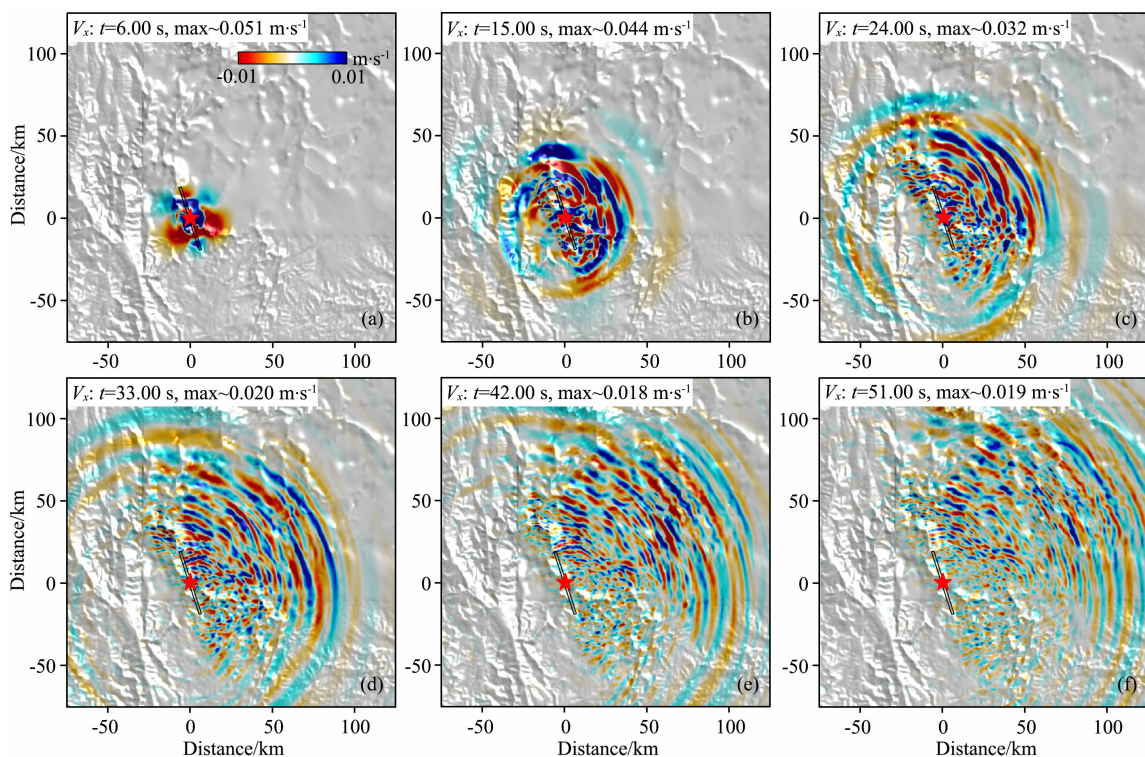


图2 鲁甸地震模拟速度波场快照

Fig. 2 Snapshots of simulated velocity field of Ludian earthquake

层震荡,振幅明显比另外一侧强,持续时间也变得 longer.

图3给出了由模拟计算得到的水平峰值速度(PGV-h),和根据《中国地震烈度表(GB/T 17742-2008)》计算的地震烈度分布.计算结果显示该地震

最大地震烈度为Ⅶ度.地震灾害区域主要集中在断层附近,并向北东方向延伸.鲁甸县大部分遭受Ⅵ到Ⅶ级地震烈度,巧家县与会泽县的主要灾害集中在与鲁甸县毗邻区域,局部地区有Ⅵ度左右的破坏.从烈度分布图还可以看出,山峰地区的峰值速度比

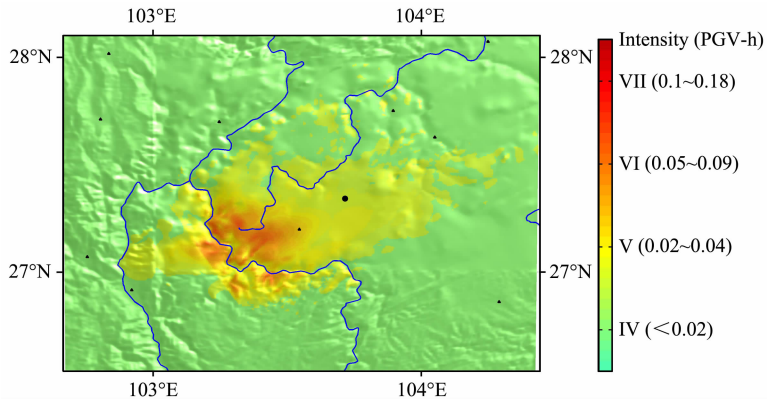


图3 理论地震烈度图分布

Fig. 3 Calculated seismic intensity map for the Ludian earthquake

山谷地区以及地势平缓地区的值偏大. 这主要是地震波在山顶、山脊区域多次反射波相干叠加形成的地震波干涉效应所致. Lee 等(2008)以及 Zhang 等(2008)的研究详细讨论了起伏地表对地震波场传播的影响. 计算烈度(图 3)显示,靠近牛栏江的山坡地区,地震烈度相对较大,容易造成滑坡,形成堰塞湖,这与遥感监测一致. 地震灾害主要集中在鲁甸县(526 人死亡,109 人失踪),以及靠近鲁甸县的巧家县(76 人死亡,5 人失踪)、会泽县(12 人死亡)的部分区域. 地震灾害向东北方向延伸,昭通市区的地震烈度在 V 到 VI 度之间,地震调查还显示昭通市的昭阳区死亡一人(中国地震信息网,2014).

4 初步结论

本文基于云南鲁甸地震运动学反演模型,并根据发震地区及邻近地区的三维速度模型和地形数据,利用地震波模拟方法在地震发生之后及时模拟了该地震的近场地震波传播. 根据地震波场的模拟结果,计算了该区域内的地震烈度分布. 结果表明:总体上地震动在北东东方向明显比西南方向大,震中最大烈度为 VII 度. 除震中地区,山区的山脊地震烈度较大. 地震东北方向地表与低速层底部的多次反射波加强了该区域的地震破坏,加上山区地形的局部放大效应使得该地震造成了较大的人员伤亡. 因此在今后的防震减灾工作中,应进一步加强对危险区内的山区、低速盆地的震害防御工作.

致谢 感谢北京大学地空学院张勇博士等人提供震源模型.

References

- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0: a 1-degree global model of earth's crust. *Geophys. Res. Abstr.*, 15: EGU2013- EGU2658.
- Lee S J, Chen H W, Huang B S. 2008. Simulations of strong ground motion and 3D amplification effect in the Taipei Basin by using a composite grid finite-difference method. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98: 1229-1242.
- Zhang W, Chen X F. 2006. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation. *Geophys. J. Int.*, 167(1): 337-353.
- Zhang W, Shen Y, Chen X F. 2008. Numerical simulation of strong ground motion for the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake of 12 May 2008. *Science in China Series D: Earth Science*, 51(12): 1673-1982.
- Zhang W, Zhang Z G, Chen X F. 2012. Three-dimensional elastic wave numerical modelling in the presence of surface topography by a collocated-grid finite-difference method on curvilinear grids. *Geophys. J. Int.*, 190(1): 358-378.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T, et al. Rupture process of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan, $M_w 6.1$ ($M_s 6.5$) earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(9): 3052-3059, doi:10.6038/cjg20140930.

附中文参考文献

- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_w 6.1$ ($M_s 6.5$) 地震破裂过程. *地球物理学报*, 57(9): 3052-3059, doi: 10.6038/cjg20140930.
- 2014年8月3日云南省昭通市鲁甸县 $M_s 6.5$ 级地震, <http://www.cea-igp.ac.cn/upload/Image/mrtp/2707253497.jpg>.
- 中国地震信息网,《云南鲁甸 6.5 级地震已造成 615 人死亡》, <http://www.csi.ac.cn/publish/main/1/734/100900/100901/20140807215459641565662/index.html> (2014年8月7日查看).

(本文编辑 胡素芳)