

doi:10.3799/dqkx.2014.159

鲁甸地震($M_s6.5$)临震预测、中期预测 及中地壳流变结构

曾佐勋^{1,2,3}, 刘根深³, 李献瑞^{3,4}, 贺赤诚^{2,3}, 杨学祥⁵, 杨冬红^{6,7*}

1. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学华中构造力学研究中心, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

5. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

6. 吉林大学古生物学与地层学研究中心, 吉林长春 130026

7. 吉林大学东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130026

摘要: 2014年8月3日16时30分,在云南省昭通市鲁甸县(27.1°N,103.3°E)发生 $M_s6.5$ 地震,震源深度10 km,死亡617人,失踪112人,受伤3143人,受灾人口108.84万人。根据月亮赤纬角、太阳黑子极值年等周期变化及两者的叠加效应,总结出2013—2014年是云南强震高危期,具备 M_s7 地震的发生条件。次年,利用基础SW前兆仪的临震预测指纹法信息,制定了2014年底211号地震预测表,预测了2014年8月四川(26.18°N,105.33°E)将发生 $M_s5.3$ 地震。2014年8月3日云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震表明:这次地震的指纹法预测时间相差1天,震中相差226 km,震级误差 $M_s1.2$ 。通过构造背景、地壳速度结构和震源机制研究,NW向的包谷埡—小河左旋走滑断裂是鲁甸地震的发震断裂。中下地壳低速(高导)体与包谷埡—小河断裂交接部位是流变界面能量释放的位置,即本次地震的震源位置,为板内地震三层次构造模式提供了一个新的案例。

关键词: 鲁甸地震;临震预测;中期预测;包谷埡—小河断裂;三层次构造模式;天然地震。

中图分类号: P315.7

文章编号: 1000-2383(2014)12-1751-12

收稿日期: 2014-09-20

Imminent and Medium-Term Predictions for Ludian Earthquake ($M_s6.5$) and Rheological Structure of the Middle Crust

Zeng Zuoxun^{1,2,3}, Liu Genshen³, Li Xianrui^{3,4}, He Chicheng^{2,3}, Yang Xuexiang⁵, Yang Donghong^{6,7*}

1. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, China

4. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

6. Research Center of Palaeontology & Stratigraphy, Jilin University, Changchun 130026, China

7. Key-Lab for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: At 16:30 of August 3rd, 2014, an earthquake with a magnitude of $M_s 6.5$ occurred in Ludian County of Zhaotong City, Yunnan Province (27.1°N, 103.3°E). The depth of the hypocenter is 10 km. Due to this disaster, 617 people were died, 112 people disappeared and 108 840 000 people were injured. According to the superposition effects of the moon declination angle, sunspot extreme year cycles and the two, summed up 2013—2014 years is Yunnan strong earthquake periods of high risk, with the condition for the occurrence of M_s7 earthquake. The following year, forecast method based SW fingerprint information

基金项目: 国家“985”创新平台建设项目子课题(地震及其次生地质灾害研究);国家自然科学基金重点项目(No.41230206);国家自然科学基金青年科学基金项目(No.41404041)。

作者简介: 曾佐勋(1954—),男,教授,主要从事构造地质学教学和科研。E-mail: zuoxun.zeng@126.com

* **通讯作者:** 杨冬红, E-mail: yangdonghong@jlu.edu.cn

using the earthquake precursory instrument, developed by the end of 2014 211 earthquake prediction table, predict 2014 August Sichuan (26.18°N, 105.33°E) M_s 5.3 earthquake will occur. The Ludian M_s 6.5 earthquake occurred on August 3, 2014 indicates that the error of the predicted date is only 1 day, the predicted epicenter is about 226 km away from the actual earthquake epicenter. Besides that the actual magnitude is M_s 1.2 larger than the predicted magnitude. According to the comprehensive analysis in tectonic setting, the S-wave crustal velocity structure and the focus mechanism of the Ludian earthquake, we believe that the Baogunao-Xiaohe left-lateral strike-slip fault triggered the Ludian earthquake, while the junction of the middle-low crust's low-velocity (high-conductivity) body and the Baogunao-Xiaohe fault is the location of the focus releasing the accumulated energy which practically is the epicenter. This provides a new case study of the three-level tectonic model for intraplate earthquakes.

Key words: Ludian earthquake; imminent prediction; medium-term prediction; Baogunao-Xiaohe fracture; three-level tectonic model; earthquakes.

0 引言

2014年8月3日16:30,云南省昭通市鲁甸县(27.1°N, 103.3°E)发生 M_s 6.5地震,震源深度10 km.死亡617人,失踪112人,受伤3143人,受灾人口108.84万人.这是近18年来云南发生震级最高的地震.

地震作为一种地质过程,在其孕育、发展和发生进程中,有其自身的规律,并且会在地球物理场和地球化学场及其引起的自然现象等诸多方面表现出异常特征.例如,震前的卫星重力异常(费琪,2008,2009;曾佐勋等,2013)、卫星热红外异常(徐秀登等,1994;强祖基等,1997,2010;徐秀登和徐保华,2013)、天然电磁脉冲异常(曾佐勋和王杰,2013)、次声波异常(李均之等,2006;吕君等,2012;潘黎黎等,2013)、地球排气异常(姚清林等,2005;王杰等,2013;曾佐勋等,2013)、震兆云霞异常(吕大炯等,1978;吕大炯,1981;Harrington and Shou,2005;Shou,2006;Shou *et al.*,2010;曾佐勋等,2013)、气候异常(耿庆国,1984)、地电异常、地应力异常、地倾斜异常、地磁异常等. SW前兆仪,综合多种观测分量,包括不同方向的地磁分量、地电分量、地应力分量、谐振分量、地倾斜分量等.这些不同分量通过9通道或者15通道输出各异常分量—时间曲线,压缩时间轴,就可以输出异常几何图形.通过长期观测发现,不同地区的地震具有不同的几何图形.相同地区的地震具有相同或相似的几何图形.反过来,可以根据特定几何图形,找到将要发生地震的震中位置.这就类似于每个人都有特定指纹,根据指纹可以找到对应的人.所以,利用SW前兆仪输出图形预测地震的方法称为指纹法.小地震可以在400~500 km范围内引起前兆异常效应,中强地震可以在数千 km范围内引起前兆异常效应,大地震具有全球的前兆

异常效应.利用SW前兆仪不同通道的异常信息,可以预测不同距离区间的地震.从2006年以来,已经做了不少成功的临震预测.甘肃定西岷县(M_s 6.6)地震就是其中的成功案例之一(刘根深等,2013).此外,潮汐激发地震也已成为近期令人关注的地震研究课题(李加林和张元东,1993;杜品仁,1994;Cochran *et al.*,2004;杨学祥等,2004;杨冬红和杨学祥,2006,2008;杨冬红等,2006;Métivier *et al.*,2009;杨冬红,2009;徐道一和孙文鹏,2011;杨冬红等,2011),可以用于中长期地震预测.本文在鲁甸地震构造背景分析基础上,介绍基于天文因素分析的云南大震中期预测和鲁甸地震指纹法临震预测,并探讨鲁甸地震的深部流变结构与发震构造机制.

1 鲁甸地震构造背景

鲁甸位于川、滇交界的东侧,滇东北高原南部,地处牛栏江北岸地区,是昭通地区西南门户.区内地势东西两侧高,中间低平,地貌错综复杂(胡金等,2007).其在区域构造位置上处于川滇块体与华南地块之间的边界带上,靠近川滇菱形块体东侧.区内主干构造为近SN向断裂和NE向次级断裂,反映了研究区内应力场主压应力方向大致为NWW-SEE向.川滇块体被近SN向的安宁河—则木河—小江断裂带围限,并朝南东方向作“挤出”运动(朱航和闻学泽,2012),区内靠南发育的一系列NE向断裂则是变形与活动较强的大凉山次级块体与相对稳定的华南地块的边界带(闻学泽等,2013).

研究区内近SN向断裂较发育,主要包括安宁河断裂,则木河断裂,小江断裂带,大凉山断裂带,峨边—烟峰断裂带以及马边—盐津断裂带.其中安宁河断裂(F1)作为川滇活动地块东边界的主要活动断裂,始于元古代,新近纪末至第四纪初.其东西两

支差异活动较为明显,形成一系列断裂盆地(冉勇康等,2008)。主干断层总体呈南北向,倾向东或西,倾角较陡。则木河活动断裂带(F2)北接安宁河断裂带,南接小江断裂带,其总体走向为 NNW 330° ,主断面向北东陡倾,倾角约 75° (Gkarlaouni *et al.*,2008)。小江断裂带北段(F3)断层面倾向 SWW,倾角为 65° (朱航和闻学泽,2012),其与安宁河和则木河断裂带共同作为川滇活动地块东部边界断裂,活动性较强,第四纪以来均以左旋走滑性质为主(魏文薪等,2012),其中安宁河断裂略兼逆冲分量(程建武等,2010)。大凉山断裂带(F4)较鲜水河—小江断裂系中其他断裂带年轻,缺乏破坏性地震记录。其北段倾向西,南段主要倾向东。晚第四纪以来的活动主要以左旋走滑为主,走滑速率为 $3\sim 4\text{ mm/a}$ (周荣军等,2003;韩渭宾和蒋国芳,2005;魏占玉等,2012)。峨边—烟峰断裂带(F5)自北向南走向由 NW 转为 NNW,总长约 160 km,构成弧顶指向 NE 的弧形压性构造带。断裂总体倾向 SW,倾角 $60^\circ\sim 80^\circ$,更新世以来主要以逆冲为主,兼有左旋滑动的性质(韩德润,1993;张世民等,2005)。马边—盐津断裂带(F6)是荣经—马边—盐津断裂带的南延部分,宽约 35 km。该断裂带纵向走向为 NW-NNW,总体倾向为 SW,亦构成了弧顶指向 NE 的压性构造带。其地震活动性较为活跃,晚第四纪的运动方式以逆冲为主,兼有左旋走滑错动(张培震,2008)。

区内主要 NE 向断裂包括莲峰断裂带,龙树断裂,鲁甸—昭通断裂,会泽—彝良断裂以及研究区边界的华蓥山断裂带。莲峰断裂带(F7)由 2~3 个倾向 NW 的铲式断层组成,基底滑脱带深约 11~15 km。为早期形成的逆冲推覆构造带的基础上,新生代进一步发展而成的大型逆冲—右行走滑活动断裂带。龙树断裂(F8)和鲁甸—昭通断裂(F9)组成与莲峰断裂带平行的昭通断裂带,倾向 SE,倾角较陡,属昭通断裂带后方的反冲断裂,活动性也较为明显,以逆冲为主伴有走滑性质(闻学泽等,2013)。鲁甸—昭通断裂(F9)总体走向 30° ,倾向 NW,倾角较陡。该断裂对昭通、鲁甸第四纪盆地的发育有一定的控制作用(谢英情等,2005)。晚第四纪以来地震活动较为明显,主要表现为逆冲兼右行走滑性质(闻学泽等,2013)。会泽—彝良断裂带(F10)倾向 NW,由一系列压扭性高角度逆冲断层组成,活动性质以右行走滑为主兼逆冲性质(白光顺,2011;闻学泽等,2013)。华蓥山断裂(F11)与莲峰断裂带延伸方向一致,活动性质相同,倾向 SE,为四川盆地东界断裂带。(盛强

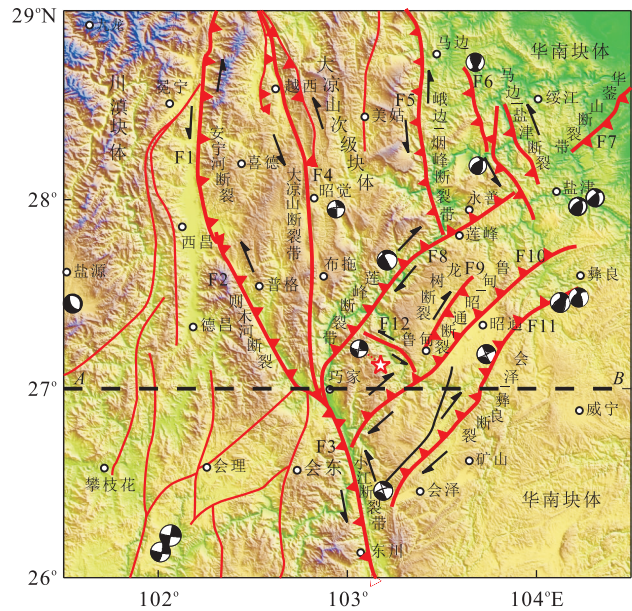


图 1 云南鲁甸地震区域构造背景

Fig.1 The tectonic background of Ludian earthquake in Yunnan Province

F1.安宁河断裂;F2.则木河断裂带;F3.小江断裂带北段;F4.大凉山断裂带;F5.峨边—烟峰断裂带;F6.马边—盐津断裂带;F7.莲峰断裂带;F8.龙树断裂;F9.鲁甸—昭通断裂;F10.会泽—彝良断裂带;F11.华蓥山断裂带;F12.包谷垭—小河断裂;AB.研究区内 S 波速度结构剖面位置;震源机制解资料来自 CMT, <http://www.globalecm.org/CMTsearch.html>

和谢新生,2010)。

根据中国地震局地球物理研究所余震分布精确定位分析,鲁甸地震余震总体优势定位为北西向,结合其震源机制解,判断其发震断裂为 NW 向的包谷垭—小河断裂(F12,如图 1)。其与北东向鲁甸—昭通断裂呈共轭展布,是大型左旋走滑小江断裂系中数条次级断裂中的一条,主要运动表现为左行走滑性质。

2 鲁甸地震($M_s 6.5$)指纹法临震预测过程与结果分析

鲁甸地震的临震预测是基于华中构造力学研究中心在北京的良乡地震监测站的九通道 SW 前兆仪做出的。经长期观测,笔者发现利用 SW 前兆仪不同通道的异常信息,可以预测不同距离区间的地震。前面三通道指纹信号主要针对华北地区(400~500 km)的地震,中间三通道指纹信号主要针对全国范围的地震,后面三通道指纹信号针对全球范围的地震。对于中间三通道指纹信号,也有距离范围之

分.例如,岷县地震采用第五通道指纹信号(刘根深等,2013),而本文预测的鲁甸地震则采用第六通道信号指纹.利用2014年在北京良乡的第六通道指纹信号,作为专家内部交流,2014年7月30日,中国地质大学(武汉)构造力学研究中心良乡地震监测站刘根深向耿庆国、陈维升、张启文、陈一文、曾佐勋、刘承昌、孙延好、郭树军等25位专家发出了2014年第211号地震预测表.预测2014年8月4日四川(26.18°N,105.33°E)将要发生 M_s 5.3地震.其预测方法和过程如下.

2.1 时间预测

2014年7月31日发出的临震预测意见,依据的是前一天(30日)收到的指纹信号.按照多年总结的规律,一般是提前6天收到临震信号.因此,预测发震时间为7月30日+5天,即2014年8月4日.鲁甸地震实际发震时间为2014年8月3日,比预测日期提前1天.

2.2 地点预测

首先查看以前所有“指纹图像”,找出与当天(2014年7月30日)指纹特征相似的前一发震日期的图像.经过对比发现,2014年7月30日SW仪第六通道信号“指纹”特征(图2a),与2014年3月30日同通道“指纹”特征(图2b)在宏观上极其相似.而与2014年3月30日“指纹”相对应的地震发生于2014年4月4日,震中位于川南(26.18°N,105.33°E).所以,便以(26.18°N,105.33°E)作为预测震中.据中国地震台网资料显示,鲁甸地震(M_s 6.5)实际震中坐标为(27.1°N,103.3°E),即本次预测震中的误差为226 km.

2.3 震级预测

指纹法对震级预测是根据输出指纹图(曲线)波幅大小来确定的.如图2b中纵坐标显示的2014年3月30日指纹波幅跃迁为240 mV;对应2014年4月4日地震为 M_s 5.3;而图2a显示的波幅跃迁为330 mV,对应鲁甸地震为 M_s 6.5.遗憾的是,目前还没有建立起波幅—震级定量关系,2014年7月30日做出预测时没有对波幅做出严格测量,导致预测震级(M_s 5.3)偏低,与实际震级(M_s 6.5)相差 M_s 1.2.

综上所述,以上对地震三要素的预测,时间准确(误差1天),震中位置预测误差226 km,震级预测误差偏大(M_s 1.2),有待进一步提高三要素的预测命中率.另外还需要与其他多种方法配合,不断缩小预测误差.需要指出的是,内蒙业余地震研究志愿者孟繁荣提前四天在业余地震研究圈内预测到了

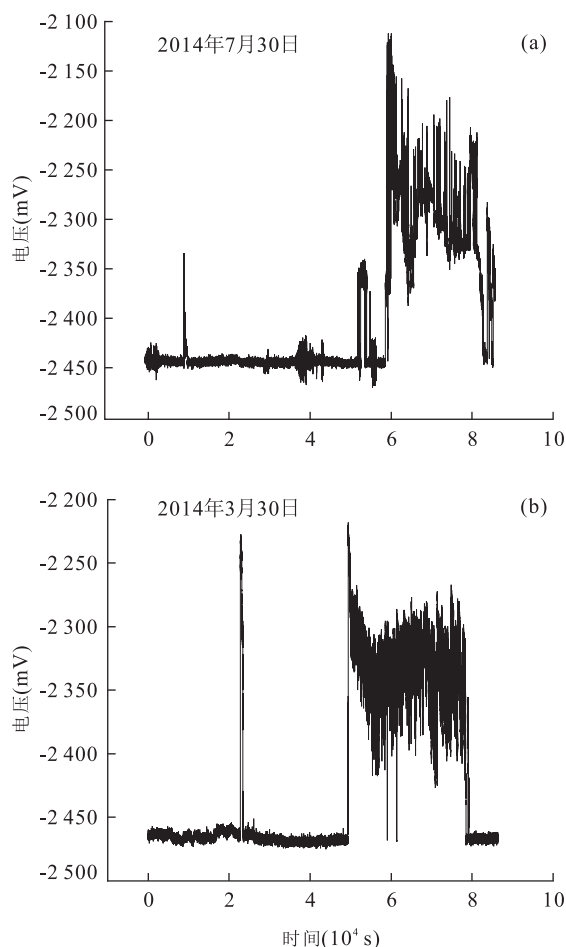


图2 2014年7月30日(a)与2014年3月30日(b)第六通道“指纹”对比

Fig.2 Comparison between fingerprints from the channel 6 observed on July 30th, 2014(a) and on March 30th, 2014(b)

120 h内昭通县有大地震(<http://www.infzm.com/content/102952>).

3 云南发生大震的中期预测

1996年2月3日云南丽江发生 M_s 7.0地震,对应2014年8月3日发生云南昭通市鲁甸县发生 M_s 6.5地震,二者时间差与月球18.6年周期精确吻合.18.6年周期是地球的主章动周期,也是月亮的交点运动周期,其对地球的影响可能主要是通过月亮交点潮的作用,对地震的孕育和发生产生重要影响.月亮轨道与地球赤道之间的夹角称为月亮赤纬角,最大值为28.5°,最小值为18.5°,变化周期为18.6 a,这可能正是造成月亮交点潮成为影响全球主要地震带区中地震活动的重要天文因子的原因(胡辉等,2014).

Sidorenkov(2009)列出了 1900—2010 年地球旋转速率中引潮力(D)的变化曲线(Sidorenkov, 2009),认为自然过程极端事件的发生与 18.6 a 的周期变化有关, D 的极小值在 1903、1923、1942、1960、1978 和 1997 年;最大值为 1914、1932、1950、1969、1988 和 2007 年,下一个极小值可能发生在 2014—2016 年。

胡辉等人在 2003 年、2009 年和 2013 年就先后指出了云南地震的 11 a 和 18.6 a 周期,现在得到实践的验证(表 1)(胡辉等,2003,2014;杨冬红,2009;徐秀登和徐保华,2013;杨冬红和杨学祥,2013)。

最近,我们通过计算得出,潮汐有 2.2、11.0、18.6 和 22.0 年周期变化。潮汐可以使偏离地球质心的内核在液核中产生潮汐波动,潮汐周期与太阳周期的共振效应对解释大气、地磁、地震、海温的 11.0、18.6 和 22.0 年周期变化更有说服力。这可以解释地磁、地震、大气的 11.0 年、18.6 年和 22.0 年周期变化是受太阳活动和强潮汐的共同驱动和激发。从表 1 中,我们可以看到云南 1913—1999 年 $M_s7.0$ 以上强震(共 13 次)有以下规律性:(1)4 个强震活跃期有 3 个首发于月亮赤纬角(白赤交角)的最大值年;(2)4 个强震活跃期有 4 个结束于月亮赤纬角的最小值年附近;(3)强震活跃期历时 7~12 年,与月亮赤纬角的最大值至最小值 9.3 年周期相对应。(4)4 个强震活跃期有 3 个首发于太阳黑子谷年,一个首发于太阳黑子峰年。太阳黑子极值年是云南 $M_s7.0$

地震多发年。3 个强震活跃期与太阳黑子 11 年周期对应,始于太阳黑子谷年,在下一个太阳黑子谷年或其前结束。

数据表明,云南在月亮赤纬角极值时易发生 $M_s7.0$ 地震,如月亮赤纬角的最大值 1913、1950、1970、1988 年和月亮赤纬角的最小值附近的 1941、1976、1995、1996 年都发生了 $M_s7.0$ 地震,占 9/13。

数据还表明,太阳黑子极值年易发生地震,太阳黑子峰年次年 1988 和谷年 1913、1976、1996 年都发生了 $M_s7.0$ 地震,占 7/13。

另外,太阳黑子极值年与月亮赤纬角极值年的叠加年(三年内)易发生地震,如 1913、1976、1996 年都发生了 M_s7 地震,占 8/13(杨冬红等,2006;杨冬红,2009;杨冬红等,2013)。

正是基于以上分析,在 2013 年已经指出,2013—2014 年有利于云南地震发生的天文条件依然存在,2009 年以来云南连续 3 年发生严重干旱,云南大震的风险不是减少了,而是增加了(<http://blog.sciencenet.cn/blog-2277-665779.html>; <http://blog.sciencenet.cn/blog-2277-816841.html>)。2004—2018 年是全球特大地震频发时期,2013—2014 年是云南强震最危险时期,云南发生 $M_s7.0$ 地震的条件基本成熟,我们必须做好预防的准备(杨冬红等,2013; <http://blog.sciencenet.cn/blog-2277-665779.html>; http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_7952088.aspx)。虽然分别于 8 月 3 日和 10 月 7 日发

表 1 20 世纪以来白赤交角、太阳黑子与云南强震关系

Table 1 The relationship among the moon declination angle, sunspot number and major earthquake in Yunnan province

白赤交角		太阳黑子		云南强震活跃期	震级大于 $M_s7.0$ 强震
最大年	最小年	谷值	峰值		
1913	1922	1913 1923	1917	第 1 活跃期	1913 峨山 $M_s7.0$ 1925 大理凤仪 $M_s7.0$
1932	1941	1933 1944	1937	第 2 活跃期	1941 澜沧耿马 $M_s7.0$ 1941 勐海 $M_s7.0$
1950	1959	1954	1957		1950 勐海 $M_s7.0$
1969	1978	1964 1976	1968	第 3 活跃期	1970 通海峨山 $M_s7.7$ 1974 昭通大关 $M_s7.1$ 1976 龙陵 $M_s7.3$ 1976 龙陵 $M_s7.4$
1987	1996	1986 1996	1989	第 4 活跃期	1988 澜沧 $M_s7.6$ 1988 耿马 $M_s7.2$ 1995 孟连 $M_s7.3$ 1996 丽江 $M_s7.0$
2005—2007	2014—2016	2009 2022	2014	第 5 活跃期	只发生了普洱 $M_s6.4$ (2007 年)、盈江 $M_s5.9$ (2008 年)、本次鲁甸 $M_s6.5$ (2014 年)和景谷 $M_s6.6$ (2014 年)地震,暂未发生 $M_s7.0$ 以上地震

注:观测确定 2008—2009 年为太阳黑子谷年,2014 年预测为太阳黑子峰年(据胡辉等(2003),杨冬红(2009),杨冬红和杨学祥(2013)修改)。

生了 $M_s 6.5$ (云南鲁甸) 和 $M_s 6.6$ (云南景谷) 地震, 并不能排除云南近期还有 $M_s 7.0$ 或多次 $M_s 6.5$ 以上地震的发生的可能性. 还需要强调的是, 此次昭通鲁甸地震事前中国地震局在年度会商中有圈定, 在中国地球物理学会天灾预测中也作为重点地区进行了圈定和中期预测 (<http://www.infzm.com/content/102952>).

4 鲁甸地震深部地球物理结构与发震机制

4.1 速度结构剖面

对云南地区的现代化地震调查始于 1965 年, Kan *et al.* (1986) 根据人工地震折射剖面得到云南中部及西部的地壳结构. 云南地区的地壳厚度约为 55 km, 可分为 3 层结构, 由上到下对应的 P 波速度分别为 6.0, 6.3 和 6.6~6.8 km/s. 天然地震 S 波速度结构 (图 3) 研究发现 (张晓曼等, 2011), 剖面西端中地壳存在一个高速夹层, 速度为 3.6 km/s, 而其下部则为一低速层, 速度为 3.4 km/s, 并且向东延伸. 剖面东段, 包谷垭—小河断裂东侧存在一低速层, 埋深约为 20~40 km. 在鲁甸地震震源位置下方 40~70 km 处, 上地幔及莫霍面显示局部上隆, 这可能是地幔或软流圈高密度物质沿深部断裂上涌导致, 而根据张晓曼等 (2011) 的研究认为, 局部深层物质的运移也是该区大震发生的诱因. 这可以认为是对于杨巍然等 (2009) 的板内地震三层次构造模式的理论支持.

近年来, 国内外学者对云南地区的地球物理调查不断加深, 为了解云南地区的深部结构提供了丰富的资料. 除以上剖面反映的壳内低速层外, 不少学者提供了研究区外的低速层分布范围, 证明其在川滇块体内部存在的普遍性 (Huang *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; He *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2008; 吴建平等, 2013). 青藏高原的碰撞隆升及侧向挤出模式已被实验证实, 由此在川滇地区产生的区域性下地壳流动, 物质流动通道的存在及其形态已被多种地球物理资料所证实 (Bai *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2014). 对壳内低速层产生的原因, 已有学者做了阐述 (杨晓松等, 2003). 但地壳具有横向不均一性, 不同地区的壳内低速层应具有各自特有的成因. 研究区位于印度板块与欧亚板块碰撞形成的青藏高原南部, 其成因势必受到上述下地壳物质流动通道

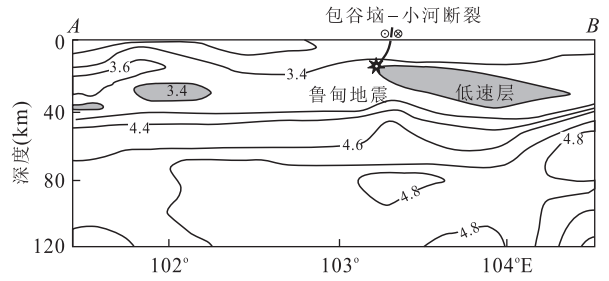


图 3 地壳及上地幔 S 波速度结构剖面 (张晓曼等, 2011)

Fig.3 The profile of S-wave velocity structure of crust and upper mantle

的影响. 早期学者发现该低速层的埋深与研究区的居里面深度及天然地震震源深度基本吻合, 为壳内的韧性剪切带 (熊绍柏等, 1993), 随着资料的不断积累, 人们提出壳内低速层的成因与地幔热液物质沿超壳断裂的上涌有关 (胥颐等, 2013), 但也有学者认为研究区内壳内低速层是原生的或重熔的岩浆房或其他流体 (熊绍柏等, 1993; Huang *et al.*, 2009). 笔者认为其与软流圈的热隆和供热是分不开的 (杨巍然等, 2009).

4.2 卫星重力异常特征

卫星重力场的研究对了解地壳内部质量的空间分布有重要意义, 对了解大地震的发震环境有指导作用. 卫星重力异常中使用的阶次与场源深度的关系, 可参考 Bowin (1983) 提供的模型, 经过简化和推导, 得到重力场球谐函数阶次与场源深度之间的近似关系式:

$$H = \frac{R}{n-1},$$

式中: n 为重力场球谐函数阶次 (重力异常阶次), R 为地球半径 (取 6 400 km), H 为场源深度.

我们采用 eigen-6c2 模型, 计算得到研究区内 8-638 阶卫星布格重力异常 (图 4). 根据上述公式, 8-638 阶卫星重力异常图反映的是地下 10~914 km 处物质密度异常, 高阶反映的是浅层物质产生的异常, 低阶只作为背景值存在 (袁学诚, 2005). 因此图 4 主要反映的是地下 10 km 处的布格重力异常特征.

研究区内, 布格重力异常值在 $(-1.358\ 118\ 8 \sim -3.847\ 942\ 0) \times 10^2$ mGal 之间, 由北东经研究区中部到北西逐渐降低, 平均 $-2.403\ 258\ 5 \times 10^2$ mGal. 研究区中部昭觉—巧家—东川一带为一平缓的重力特征, 布格重力值在 $-250 \sim -260$ mGal 之间, 其北东及北西侧均存在一个变化较陡的重力梯度带. 北东侧以美姑—莲峰—昭通为界, 北西侧以越西—喜

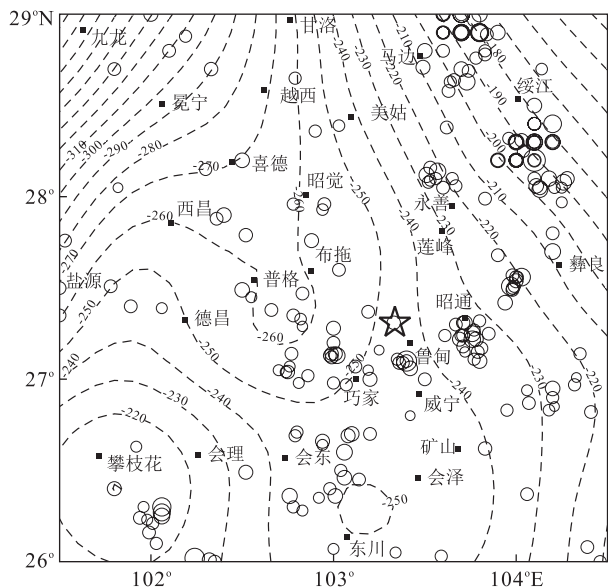


图 4 研究区 8-638 阶(10 km)卫星重力异常及历史地震分布

Fig.4 The satellite gravity anomalies of 8-638 order and history earthquakes distribution map in study area

德—盐源为界。研究区南西侧攀枝花地区显示较高的重力值,为 -210 mGal 左右。

结合区内构造展布特征,安宁河—则木河—小江断裂带位于重力梯度较平缓的位置,但两侧出现较大的重力变化,认为小江断裂带为切割莫霍面的超壳断裂,由此可推测安宁河—则木河断裂亦切割地壳,进入上地幔,这与人工地震折射剖面得到的结果相一致(崔作舟和卢德元,1987)。北东向的莲峰断裂和鲁甸—昭通断裂与卫星重力梯度带近垂直相交,推测这两条近平行的断裂带为地壳浅部断裂。

地震空间分布上,我们选用中国地震局数据共享中心提供的 1970—2014 年研究区内震级大于 $M_s 4.0$ 地震,将其投影到卫星布格重力异常图上。研究区内的地震主要集中在安宁河—则木河—小江断裂带及其分支断裂鲁甸—昭通断裂附近,根据 Wu and Zhang(2012)的研究,该区地震主要分布在 $10\sim 20$ km 之间,位于区内低速层之上,反映大地震受控于低速层。另根据重力异常特征,这些地震主要位于具有重力异常块体之间的接触带上,亦反映其受地壳密度不均匀性的影响(楼海和王椿镛,2005)。

4.3 发震机制

板内地震的三层次构造模式将地震过程概括为软流圈隆起供热、中部地壳流变层聚能和浅部脆性断层触发构造和释放能量(杨巍然等,2009)。研究区内软流圈顶部埋深约为 100 km(邢集善等,2009),

为一局部隆起,满足板内地震三层次结构中的软流圈上隆的深层次条件;如前所述,研究区内普遍发育壳内低速(高导)层(体),流变层(体)能够吸收来自软流圈上隆带来的热量,使自身能干性更加降低,流动性增强。从大地构造上看,青藏高原隆升及侧向挤压作用,在研究区内表现为浅层地表发生显著的水平向南位移,在流变层(体)与上覆或者周围脆性地壳接触界面上,两侧物质差异运动引起应力集中,同时在低速(高导)体内流体压力不断增强。当流体压力引起的应力和区域构造应力的总应力超过脆性地壳的强度时,在引潮力触发下,能量以地震的形式爆发性释放出来。

5 结论

指纹法对于鲁甸地震的预测时间相差 1 天,震级偏小,震中偏差 226 km,有待进一步提高精度。并且需要与其他方法相互补充,不断缩小三要素预测的误差。

云南地区的大震受到月亮轨道与地球赤道之间的夹角(月亮赤纬角) 18.6 a 变化周期控制,可以作为云南大震中长期预测参考。

NNW 向左旋走滑的包谷埡—小河断裂为鲁甸地震的控震断裂。中地壳低速(高导)层(体)与包谷埡—小河断裂交接部位,是流变界面能量积累和释放的震源位置。低速(高导)层(体)内的流体压力引起的应力和区域构造应力合成的总应力达到上覆或者周边脆性地壳破坏强度时,在引潮力触发下,引起破坏性地震大发生。这不仅为板内地震三层次构造模式提供了一个新的案例,而且深化和发展了地震成因机制的研究。

致谢:感谢三位审稿人建设性的修改意见!

References

- Bai, D., Unsworth, M. J., Meju, M. A., et al., 2010. Crustal Deformation of the Eastern Tibetan Plateau Revealed by Magnetotelluric Imaging. *Nature Geoscience*, 3 (5): 358–362. doi:10.1038/NGEO830
- Bai, G. S., 2011. Faults and Tectonic Stress Field Analysis of Kuangshanchang-Daibu Structural Belt in Huize, Yunnan Province (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).
- Bowin, C., 1983. Depth of Principal Mass Anomalies Contributing to the Earth's Geoidal Undulations and Gravity

- Anomalies. *Marine Geodesy*, 7(1-4): 61-100. doi: 10.1080/15210608309379476
- Cheng, J. W., Guo, G. H., Yue, Z. J., 2010. Basic Characteristics and Earthquake Risk Analysis of the Anning River Fault Zone in the West of Sichuan Province. *Journal of Seismological Research*, 33(3): 265-272 (in Chinese with English abstract).
- Cochran, E. S., Vidale, J. E., Tanaka, S., 2004. Earth Tides can Trigger Shallow Thrust Fault Earthquakes. *Science*, 306(5699): 1164-1166. doi: 10.1126/science.1103961
- Cui, Z. Z., Lu D. Y., Chen, J. P., et al., 1987. The Deep Structures and Tectonic Features of the Crust in PanXi Area. *Acta Geophysica Sinica*, 30(6): 566-580 (in Chinese with English abstract).
- Du, P. R., 1994. 18.6 Years Seismic Cycle and the Preliminary Exploration for Its Cause. *Acta Geophysica Sinica*, 37(3): 362-369 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Q., 2008. Characters of Deep Structure for Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 5(4): 387-395 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Q., 2009. Major Earthquakes by Rheological Diapirism of Crust-Mantle Material—Evidence from Satellite Gravity Data. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 282-293 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Q. G., 1984. The Relationship between Drought and Earthquake and the Medium-Term Prediction of Large Earthquake. *Science in China (Ser. B)*, (7): 658-667 (in Chinese with English abstract).
- Gkarlaouni, C., Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G., et al., 2008. Implication of Fault Interaction to the Meaning of Chinese Sichuan-Yunnan Region Earthquake Risk Assessing. *Journal of Seismological Research*, 30(2): 176-197 (in Chinese with English abstract).
- Han, D. R., 1993. The Tectonic Pattern and Seismic Characteristics of Mabian-Yongshan Seismic Zone. *Seismology and Geology*, 15(3): 253-260 (in Chinese with English abstract).
- Han, W. B., Jiang, G. F., 2005. Study on Seismicity of Daliangshan and Anninghe-Zemuhe Fault Zones. *Journal of Seismological Research*, 28(3): 207-212 (in Chinese with English abstract).
- Harrington, D., Shou, Z., 2005. Dam Earthquake Prediction & Space Technology. <http://www.earthquakesignals.com/zhonghao296/copies/harrington.pdf>, 2005-03-26.
- He, Z., Ye, T., Su, W., 2005. 3-D Velocity Structure of the Middle and Upper Crust in the Yunnan Region, China. *Pure and Applied Geophysics*, 162(12): 2355-2368. doi: 10.1007/s00024-005-2780-x
- Hu, H., Han, Y. B., Li, Y. Q., et al., 2014. A Study of the Correlation of Lunar Nodal Tides with Global High-Magnitude Earthquakes. *Astronomical Research and Technology*, 11(3): 317-322 (in Chinese with English abstract).
- Hu, H., Zhao, H. S., He, H. W., 2003. Relationship between Lunisolar Effect and Strong Seismic Activity in Yunnan. *Publications of Yunnan Observatory*, (4): 49-55 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J., Li, B., Tang, L. M., et al., 2007. Study on Characteristics and Formation Factor of Geological Hazards in Ludian County of Yunnan Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 18(4): 15-19 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J., Zhao, D., Zheng, S., 2002. Lithospheric Structure and Its Relationship to Seismic and Volcanic Activity in Southwest China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, (1978-2012), 107(B10): ESE13-1-ESE13-14. doi: 10.1029/2000JB000137
- Huang, R., Wang, Z., Pei, S., et al., 2009. Crustal Ductile Flow and Its Contribution to Tectonic Stress in Southwest China. *Tectonophysics*, 473(3-4): 476-489. doi: 10.1016/j.tecto.2009.04.001
- Kan, R., Hu, H., Zeng, R., et al., 1986. Crustal Structure of Yunnan Province, People's Republic of China, from Seismic Refraction Profiles. *Science*, 234(4775): 433-437. doi: 10.1126/science.234.4775.433
- Li, J. Z., Chen, W. S., Xia, Y. Q., et al., 2006. The Precursors of $M_s 8.1$ Earthquake Occurred in West of Mountain Gap of Kunlun, China. *Progress in Geophysics*, 21(2): 340-344 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Zhang, Y. D., 1993. Examination and Application of the Relation between Special Celestial Phenomenon Combination Period and Earthquake Occurrence. *Earthquake*, (3): 32-37 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Zeng, Z., Wang, J., et al., 2013. Imminent Prediction for Minxian Earthquake ($M_s 6.6$) Using Fingerprint Method. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 156-161 (in Chinese with English abstract).
- Lou, H., Wang, C. Y., 2005. Wavelet Analysis and Interpretation of Gravity Data in Sichuan-Yunnan Region, China. *Acta Seismologica Sinica*, 27(5): 515-523 (in Chinese with English abstract).
- Lü, D. J., Gao, J. G., Sun, S. H., et al., 1978. Earthquake Clouds and Exploring of Its Formation. *Chinese Journal of Nature*, (5): 279-280 (in Chinese).
- Lü, J., Guo, Q., Feng, H. N., et al., 2012. Anomalous Infrasonic Waves before a Small Earthquake in Beijing. *Chinese*

- Journal of Geophysics*, 55(10): 3379—3385 (in Chinese with English abstract).
- Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C.P., et al., 2009. Evidence of Earthquake Triggering by the Solid Earth Tides. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3—4): 370—375. doi:10.1016/j.epsl.2008.12.024
- Pan, L.L., Zeng, Z.X., Wang, J., 2013. Precursory Abnormal Infrasonic Signals Predating the Lushan Earthquake ($M_s7.0$) and Yushu Earthquake ($M_s5.2$). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 73—79 (in Chinese with English abstract).
- Qiang, Z.J., Kong, L.C., Guo, M.H., et al., 1997. Experimental Study of Satellite Thermal Infrared Heating Mechanism. *Acta Seismologica Sinica*, 19(2): 197—201 (in Chinese).
- Qiang, Z.J., Ma, A.N., Zeng, Z.X., et al., 2010. A Study of the Method of Satellite Thermal Infrared Earthquake Prediction in Imminence. *Earth Science Frontiers*, 17(5): 254—262 (in Chinese with English abstract).
- Ran, Y.K., Chen, L.C., Cheng, J.W., et al., 2008. Late Quaternary Geomorphic Deformation and Rupture Behavior Triggered by Strong Earthquake of the Anninghe Fault to the North of Mianning. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*, 38(5): 543—554 (in Chinese).
- Sheng, Q., Xie, X.S., 2010. New Discovery of Late Quaternary Right-Lateral and Reverse Displacement in Huayingshan Fault Zone in Gaoxian County, Sichuan Province. In: Institute of Crustal Dynamics, ed., Crust Structure and Crust Stress Corpus. Seismological Press, 1—10 (in Chinese).
- Shou, Z., 2006. Precursor of the Largest Earthquake of the Last Forty Years. *New Concepts in Global Tectonics*, (41): 6—15.
- Shou, Z., Xia, J., Shou, W., 2010. Using the Earthquake Vapour Theory to Explain the French Airbus Crash. *Remote Sensing Letters*, 1(2): 85—94. doi: 10.1080/01431160903469061
- Sidorenkov, N.S., 2009. The Interaction between Earth's Rotation and Geophysical Processes. John Wiley & Sons, New Jersey, .
- Sun, X., Bao, X., Xu, M., et al., 2014. Crustal Structure beneath SE Tibet from Joint Analysis of Receiver Functions and Rayleigh Wave Dispersion. *Geophysical Research Letters*, 41(5): 1479—1484. doi: 10.1002/2014GL059269
- Wang, C. Y., Chan, W. W., Mooney, W. D., 2003. Three-Dimensional Velocity Structure of Crust and Upper Mantle in Southwestern China and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, (1978—2012), 108(B9). doi:10.1029/2002JB001973
- Wang, J., Zhang, X., Pan, L. L., et al., 2013. Anomalies of Temperature Increase and Methane Release before Lushan Earthquake ($M_s7.0$). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Wei, W.X., Jiang, Z.S., Wu, Y.Q., et al., 2012. Study on Motion Characteristics and Strain Accumulation of Xiaojiang Fault Zone. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 32(2): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. Y., He, H. L., Shi, F., et al., 2012. Slip Rate on the South Segment of Daliangshan Fault Zone. *Seismology and Geology*, 34(2): 282—293 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X.Z., Du, F., Yi, G.X., et al., 2013. Earthquake Potential of the Zhaotong and Lianfeng Fault Zones of the Eastern Sichuan-Yunnan Border Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3361—3372 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.P., Yang, T., Wang, W.L., et al., 2013. Three Dimensional P-Wave Velocity Structure around Xiaojiang Fault System and Its Tectonic Implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(7): 2257—2267 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Zhang, Z., 2012. Spatial Distribution of Seismic Layer, Crustal Thickness, and V_p/V_s Ratio in the Permian Emeishan Mantle Plume Region. *Gondwana Research*, 22(1): 127—139. doi: 10.1016/j.gr.2011.10.007
- Xie, Y.Q., Fu, Z.X., Fei, M.L., et al., 2005. Structural Setting and Activity Characteristics of the Huize, Yunnan, $M_s5.3$ Earthquake Sequence. *Journal of Seismological Research*, 28(4): 408—414 (in Chinese with English abstract).
- Xing, J.S., Yang, W.R., Xing, Z., et al., 2009. Mesozoic Asthenosphere Upwelling of Eastern China and Its Effects on Structure-Magma-Mineralization-Concentrated Region. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 225—239 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, S.B., Zheng, Y., Yin, Z.X., et al., 1993. The 2-D Structure and Its Tectonic Implications of the Crust in the Lijiang-Panzhuhua-Zhejiang Region. *Acta Geophysica Sinica*, 36(4): 434—444 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D.Y., Sun, W.P., 2011. Application of The Eta-Type Tectonic Series Suggested by Li Si-Guang to Earthquake Prediction. *Journal of Geomechanics*, 17(1): 64—73 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.D., Xu, B.H., 2013. The Infrared Warming Abnormali-

- ty Analysis of Lushan Earthquake. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 25–28 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. D., Xu, X. M., Qiang, Z. J., 1994. Basic Features of the Satellite Impending Earthquake Abnormality and Some New Understanding of the Causes of Its Formation. *Journal of Zhejiang Normal University (Nat. Sci.)*, 17(3): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Yang, X. T., Liu, J. H., 2013. Tomographic Study of Crustal Velocity Structures in the Yunnan Region Southwest China. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(6): 1904–1914 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., 2009. Tidal Cyclical and Its Application in Disaster Prediction (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Yang, D. B., Yang, X. X., 2011. The Influence of Tides and Earthquakes in Global Climate Changes. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(4): 926–934 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Yang, X. X., 2006. Earthquakes and Disasters in Pacific Decade Oscillation. *Northwestern Seismological Journal*, 28(1): 95–96 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Yang, X. X., 2008. The Hypothesis of the Oceanic Earthquakes Adjusting Climate Slowdown of Global Warming. *Progress in Geophysics*, 23(5): 1813–1818 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Yang, X. X., 2013. Study and Model on Variation of Earth's Rotation Speed. *Progress in Geophysics*, 28(1): 58–70 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Yang, X. X., Liu, C., 2006. Global Low Temperature, Earthquake and Tsunami (Dec. 26, 2004) in Indonesia. *Progress in Geophysics*, 21(3): 1023–1027 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Zeng, Z. X., Li, D. W., et al., 2009. Three-Level Tectonic Model for Intraplate Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. S., Ma, J., Zhang, X. J., 2003. Summarization of Genesis of Low-Velocity Layer in Continental Crust. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. X., Han, Y. B., Chen, Z., et al., 2004. New Evidence of Earthquake and Volcano Triggering by Strong Tides. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 616–621 (in Chinese with English abstract).
- Yao, H., Beghein, C., van der Hilst, R. D., 2008. Surface Wave Array Tomography in SE Tibet from Ambient Seismic Noise and Two-Station Analysis-II, Crustal and Upper-Mantle Structure. *Geophysical Journal International*, 173(1): 205–219. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03696.x
- Yao, Q. L., Qiang, Z. J., Wang, Y. P., 2005. CO Release from the Tibetan Plateau before Earthquakes and Increasing Temperature Anomaly Showing in Thermal Infrared Images of Satellite. *Advances in Earth Science*, 20(5): 505–510 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., 2005. 3D Lithospheric Structure of Western China and Its Enlightenment on Petroleum Prospecting. *Geology in China*, 32(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z., Sibgatulin, V. G., Song, S., et al., 2013. Imminent Prediction and Rheology Tectonics for Nima Earthquake ($M_s 5.2$). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 149–155 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. X., Wang, J., 2013. Lushan Earthquake: A Successful Case for Medium-Term Prediction. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., 2008. The Current Tectonic Deformation, Strain Distribution and Deep Dynamic Process in Western Sichuan Province in the East of Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*, 38(9): 1041–1056 (in Chinese).
- Zhang, S. M., Nie, G. Z., Liu, X. D., et al., 2005. Kinematical and Structural Patterns of Yingjing-Mabian-Yanjin Thrust Fault Zone, Southeast of Tibetan Plateau, and Its Segmentation from Earthquakes. *Seismology and Geology*, 27(2): 221–233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. M., Hu, J. F., Hu, Y. L., et al., 2011. The S-Wave Velocity Structure in the Crust and Upper Mantle as Well as the Tectonic Setting of Strong Earthquake beneath Yunnan Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(5): 1222–1232 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, R. J., Li, X. G., Huang, Z. Z., et al., 2003. Average Slip Rate of Daliang Mountain Fault Zone in Sichuan in Late Quaternary Period. *Journal of Seismological Research*, 26(2): 191–196 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H., Wen, X. Z., 2012. Effects of Static Stress Triggering of the Major Earthquake Sequence on Xiaojiang-Zemuhe Fault Zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 199–206 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

Gkarlaouni, C., Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G., 等,

- 2008.断层相互作用对中国川滇地区地震危险评估的意义.地震研究,30(2):176—197.
- 白光顺,2011.云南会泽矿山厂一待补构造带断裂构造解析及构造应力场分析(学位论文).昆明:昆明理工大学.
- 程建武,郭桂红,岳志军,2010.安宁河断裂带晚第四纪活动的基本特征及强震危险性分析.地震研究,33(3):265—272.
- 崔作舟,卢德源,陈纪平,1987.攀西地区的深部地壳结构与构造.地球物理学报,(6):566—580.
- 杜品仁,1994.18.6年地震轮回及其成因初探.地球物理学报,37(3):362—369.
- 费琪,2008.汶川大地震的深部构造特征.工程地球物理学报,5(4):387—395.
- 费琪,2009.壳幔物质流变的底辟作用孕育大地震——卫星重力资料的证据.地学前缘,16(3):282—293.
- 耿庆国,1984.早震关系与大地震中期预报.中国科学(B辑),(7):658—667.
- 韩德润,1993.马边—永善地震带构造形式及地震特征.地震地质,15(3):253—260.
- 韩渭滨,蒋国芳,2005.大凉山断裂带与安宁河—则木河断裂带的地震活动性分析.地震研究,28(3):207—212.
- 胡辉,韩延本,李语强,等,2014.全球大地震与月亮交点潮的相关研究.天文研究与技术—国家天文台台刊,11(3):317—322.
- 胡辉,赵洪声,和宏伟,2003.日月影响与云南未来地震趋势研究.云南天文台台刊,(4):49—55.
- 胡金,李波,唐立梅,等,2007.云南省鲁甸县地质灾害特征与成因研究.地质灾害与环境保护,18(4):15—19.
- 李加林,张元东,1993.特殊天象组合期与地震发震关系的检验及应用.地震,(3):32—37.
- 李均之,陈维升,夏雅琴,等,2006.昆仑山口西 $M_s8.1$ 级地震前兆.地球物理学进展,21(2):340—344.
- 刘根深,曾佐勋,王杰,等,2013.岷县地震($M_s6.6$)指纹法临震预测.地学前缘,20(6):156—161.
- 楼海,王椿镛,2005.川滇地区重力异常的小波分解与解释.地震学报,27(5):515—523.
- 吕大炯,1981.地震云观测.科学通报,(3):169—171.
- 吕大炯,高建国,孙士铨,等,1978.地震云及其成因的探讨.自然杂志,(5):279—280.
- 吕君,郭泉,冯浩楠,等,2012.北京地震前的异常次声波.地球物理学报,55(10):3379—3385.
- 潘黎黎,曾佐勋,王杰,2013.芦山地震($M_s7.0$)及玉树地震($M_s5.2$)震前次声波异常信号分析.地学前缘,20(6):73—79.
- 强祖基,孔令昌,郭满红,等,1997.卫星热红外增温机制的实验研究.地震学报,19(2):197—201.
- 强祖基,马蔼乃,曾佐勋,等,2010.卫星热红外地震短临预测方法研究.地学前缘,17(5):254—262.
- 冉勇康,陈立春,程建武,等,2008.安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为.中国科学(D辑:地球科学),38(5):543—554.
- 盛强,谢新生,2010.四川华蓥山断裂带晚第四纪逆走滑特征及地震意义.中国地震局地壳应力研究所,地壳构造与地壳应力文集.北京:地震出版社,1—10.
- 王杰,张雄,潘黎黎,等,2013.芦山地震($M_s7.0$)前甲烷释放与大气增温异常.地学前缘,20(6):29—35.
- 魏文薪,江在森,武艳强,等,2012.小江断裂带的运动及应变积累特征研究.大地测量与地球动力学,32(2):11—15.
- 魏占玉,何宏林,石峰,等,2012.大凉山断裂带南段滑动速率估计.地震地质,34(2):282—293.
- 闻学泽,杜方,易桂喜,等,2013.川滇交界东段昭通—莲峰断裂带的地震危险背景.地球物理学报,56(10):3361—3372.
- 吴建平,杨婷,王未来,等,2013.小江断裂带周边地区三维P波速度结构及其构造意义.地球物理学报,56(7):2257—2267.
- 谢英情,付正新,非明伦,等,2005.云南会泽5.3级地震构造背景及其序列活动特征.地震研究,28(4):104—110.
- 邢集善,杨巍然,邢作云,等,2009.中国东部中生代软流圈上涌与构造—岩浆—矿集区.地学前缘,16(4):225—239.
- 熊绍柏,郑晔,尹周勋,等,1993.丽江—攀枝花—一者海地二维地壳结构及其构造意义.地球物理学报,36(4):434—444.
- 徐道一,孙文鹏,2011.歹字型构造体系在地震预测中的应用.地质力学学报,17(1):64—73.
- 徐秀登,徐保华,2013.芦山地震的红外增温异常分析.地学前缘,20(3):25—28.
- 徐秀登,徐向民,强祖基,1994.红外临震异常的基本特征与成因机理再认识.浙江师范大学报(自然科学版),17(3):43—47.
- 胥颐,杨晓涛,刘建华,2013.云南地区地壳速度结构的层析成像研究.地球物理学报,56(6):1904—1914.
- 杨冬红,2009.潮汐周期性及其在灾害预测中应用(博士学位论文).吉林:吉林大学.
- 杨冬红,杨德彬,杨学祥,2011.地震和潮汐对气候波动变化的影响.地球物理学报,54(4):926—934.
- 杨冬红,杨学祥,2006.“拉马德雷”冷位相时期的全球强震和灾害.西北地震学报,28(1):95—96.
- 杨冬红,杨学祥,2008.全球变暖减速与郭增建的“海震调温假说”.地球物理学进展,23(5):1813—1818.
- 杨冬红,杨学祥,2013.地球自转速度变化规律的研究和计算模型.地球物理学进展,28(1):58—70.
- 杨冬红,杨学祥,刘财,2006.2004年12月26日印尼地震海啸与全球低温.地球物理学进展,21(3):1023—1027.
- 杨巍然,曾佐勋,李德威,等,2009.板内地震过程的三层次构造模式.地学前缘,16(1):206—217.

- 杨晓松,马瑾,张先进,2003.大陆壳内低速层成因综述.地质科技情报,22(2):35-41.
- 杨学祥,韩延本,陈震,等,2004.强潮汐激发地震火山活动的新证据.地球物理学报,47(4):616-621.
- 姚清林,强祖基,王弋平,2005.青藏高原地震前 CO 的排放与卫星热红外增温异常.地球科学进展,20(5):505-510.
- 袁学诚,2005.论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示.中国地质,32(1):1-12.
- 曾佐勋,Sibgatulin, V.G., 宋松,等,2013.尼玛地震(M_s 5.2)临震预测和流变构造.地学前缘,20(6):149-155.
- 曾佐勋,王杰,2013.芦山地震:一个成功的中期预测案例.地学前缘,20(3):21-24.
- 张培震,2008.青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程.中国科学(D辑:地球科学),38(9):1041-1056.
- 张世民,聂高众,刘旭东,等,2005.荣经-马边-盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征.地震地质,27(2):221-233.
- 张晓曼,胡家富,胡毅力,等,2011.云南壳幔 S 波速度结构与强震的构造背景.地球物理学报,54(5):1222-1232.
- 周荣军,黎小刚,黄祖智,等,2003.四川大凉山断裂带的晚第四纪平均滑动速率.地震研究,26(2):191-196.
- 朱航,闻学泽,2012.小江-则木河断裂带大地震序列的静应力触发作用.地球科学——中国地质大学学报,37(1):199-206.