

鲁甸 M_s 6.5 地震区域水平形变应变场演化特征*

陈阜超, 陈聚忠, 郭良迁, 张风霜

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 根据鲁甸地震区的连续 GPS 观测站资料求解的站速度, 使用刚性-线弹性运动方程拟合计算得到区域运动场和主应变率场。基于该结果研究了鲁甸地震区的运动场特征和应变应力场变化, 讨论了它们与地震孕育发生的关系。结果显示, 2012~2013 年运动场北部分界带断裂走滑, 南部横向运动受阻, 应变应力场压性较强, 有利于应变应力积聚和地震孕育, 2014 年运动场分界带贯穿南北, 应变应力场张性增加, 有利于应变应力释放而发生地震。

关键词: 水平运动场; 主应变率场; 断层主应变率; 鲁甸地震

中图分类号: P35.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)04-0541-08

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 我国引进并且开展大规模 GPS 空间大地测量, 随着资料增多, GPS 结果在地学研究中得到广泛应用, 在地震监测预报中也得到重视, 研究不断深入, 既用于研究地壳浅部运动的连续场变化, 也探讨与地壳块体运动相当深部的变化, 并从不同的角度提取地震孕育发生的信息(王琪等, 2001; 李延兴等, 2003, 2004; 江在森等, 2003, 2006; 郭良迁等, 2009, 2010, 2011; 张培震等, 2004)。使用 GPS 资料总结研究已发生地震的地壳变化过程和应变应力状态, 对于了解地震形成机理和进行地震预测有重要意义。

2014 年 8 月 3 日云南鲁甸发生了 M_s 6.5 地震(27.1°N, 103.3°E), 震源深度 11 km。震源应力显示地震形成于水平作用力。鲁甸 M_s 6.5 地震发生在北东向昭通—鲁甸断裂带的次级断裂——包谷垱—小河北西向断裂上。昭通—鲁甸断裂带控制了地震的孕育和形成。该次地震紧邻南北地震带的南段安宁河—则木河—小江断裂带, 位于其东侧。这里 GPS 站点相对较多, 它们的观测资料为研究地震孕育发生过程中的地壳活动和应变应力状态奠定了基础。

本文以 2011~2014 年鲁甸地震区 GPS 连续观

测站点资料计算得到的站速度和应变场为基础, 对鲁甸 M_s 6.5 地震前和震时的地壳变化进行研究, 探讨地震形成及发生的应变应力演化特征。

1 计算模型

为研究与本次地震相关的水平位移场和应变应力场, 选用(24°~30°N, 100°~106.5°E)范围内的 GPS 连续观测站点速率, 使用刚性-线弹性运动方程(王琪等, 2001)进行拟合求解区域运动参数, 计算水平位移场、应变率和断裂带的活动参量。

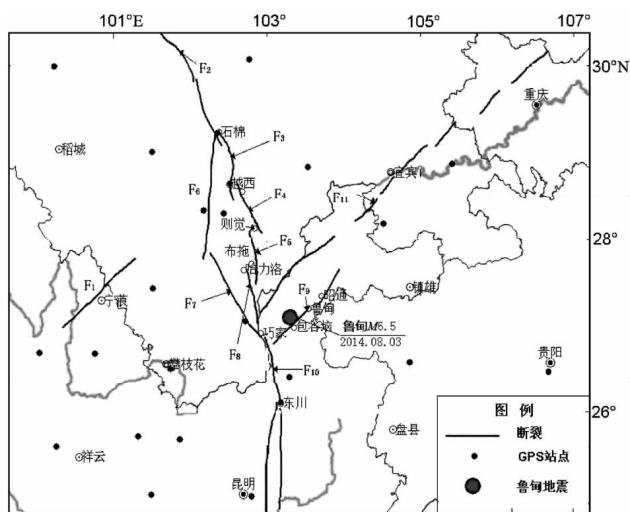
$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 \\ \zeta_1 & \zeta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_3 \\ \zeta_3 \end{bmatrix} xy. \quad (1)$$

式(1)中的 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 、 A_0 、 B_0 、 C_0 、 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 是未知变量, 其中前 3 个是地块旋转参数, 后 9 个是应变参数。方程右边第 1 项为地块整体旋转运动, 第 2~4 项为地块内部连续变形。

笔者计算鲁甸地区(25.03°~30.07°N, 100.03°~106.67°E)的 GPS 连续观测站观测资料不同时间段的运动场和应变率(图 1)。

* 收稿日期: 2015-01-05.

基金项目: 地震科技星火计划(XH13037Y)资助.



F₁: 宁蒗断裂; F₂: 鲜水河断裂; F₃: 石棉—越西断裂; F₄: 德吉—则觉断裂; F₅: 布拖断裂; F₆: 安宁河断裂; F₇: 则木河断裂; F₈: 哈力洛—巧家断裂; F₉: 昭通—鲁甸断裂; F₁₀: 小江断裂; F₁₁: 峨边—华蓥山断裂

图1 鲁甸地区的主要断裂和GPS站点分布

Fig. 1 Distribution of the main faults and GPS sites in the Ludian area

2 区域运动场

根据GPS连续观测站的年速率使用刚性—线弹性运动方程分别拟合计算得到2011年、2012年、2013年和2013-08~2014-08年震前鲁甸地震区的区域运动场。根据运动图像特征,可将4个时间段的运动场分为2011~2013年和2014年两个演化时段(图2)。

2011~2013年的运动场显示出在26°N以北地区以北北西向分布的石棉—越西断裂、德吉—则觉断裂、布拖断裂和哈力洛—巧家断裂为界分为东区 and 西区两部分。西区总体上向南东方向位移,东区向北位移,显示出位移场分区的边界断裂带呈左旋走滑活动。26°N以南的南区总体上向西位移。南区中的近南北向小江断裂带没有成为位移场分区界线,断层两侧位移速率无明显差异,连续性好。

在26°N以北地区的西区,2011年运动速率为5.94 mm/a,运动方向为NE136.8°;2012年运动速率为3.12 mm/a,运动方向为NE167.9°;2013年运动速率为3.50 mm/a,运动方向为NE165.7°。

前期运动速率相对较大,后两期运动速率小于前期。后两期运动方向向南偏转。

在26°N以北地区的东区2011年运动速率为5.07 mm/a,运动方向为NW350.1°;2012年运动速率为5.02 mm/a,运动方向为NW338.1°;2013年运动速率为3.82 mm/a,运动方向为NW328.7°。前两期运动速率相对较大,后期减小。2011~2013年运动方向依次向西偏转。

运动场在26°N以北地区的东区和西区分界带宽约100 km。

在26°N以南地区的南区2011年运动速率为6.06 mm/a,运动方向为SW258.3°;2012年运动速率为5.27 mm/a,运动方向为SW253.9°;2013年运动速率为5.33 mm/a,运动方向为SW264.1°。前期运动速率较大,后两期速率有所减小。后期的运动方向有向西偏转的趋势。

2013-08~2014-08的位移场和前期相比,南区不复存在,运动区分为东西两区。东西两个位移区分界带的北段大致和安宁河—则木河断裂带位置吻合,南段在小江断裂带以东。西区位移矢量围绕研究区西边缘中段呈半圆形顺时针旋转,东区总体上向北运动,分界带仍然为左旋走滑,其中北段为挤压—走滑,南段为拉张—走滑(图2d)。分界带宽约近100 km。西区运动速率为1.50 mm/a,东区运动速率为3.92 mm/a,运动方向为NW351.2°。东区速率大于西区。

3 区域应变场

在平面二维应变应力场分析中,最小主应变轴与最小应力(一般为压应力)主轴对应一致,最大主应变轴与最大应力(一般为张应力)主轴对应一致,应变大小与应力对应成比例。所以主应变大小反映了应力作用强弱。研究区域主应变可以了解区域应力状态及其变化。2011年、2012年、2013年和2013-08~2014-08各时段鲁甸地区的主应变场张压性质和应变率大小呈现出一定的差别。在图3中可看出,两个水平主应变轴是互相垂直的,一个应变轴的两个箭头向内(→←)表示挤压,箭头向外(←→)表示拉张,箭杆的长短表示应变率大小。箭的展布方向表示应力作用方向(图3)。

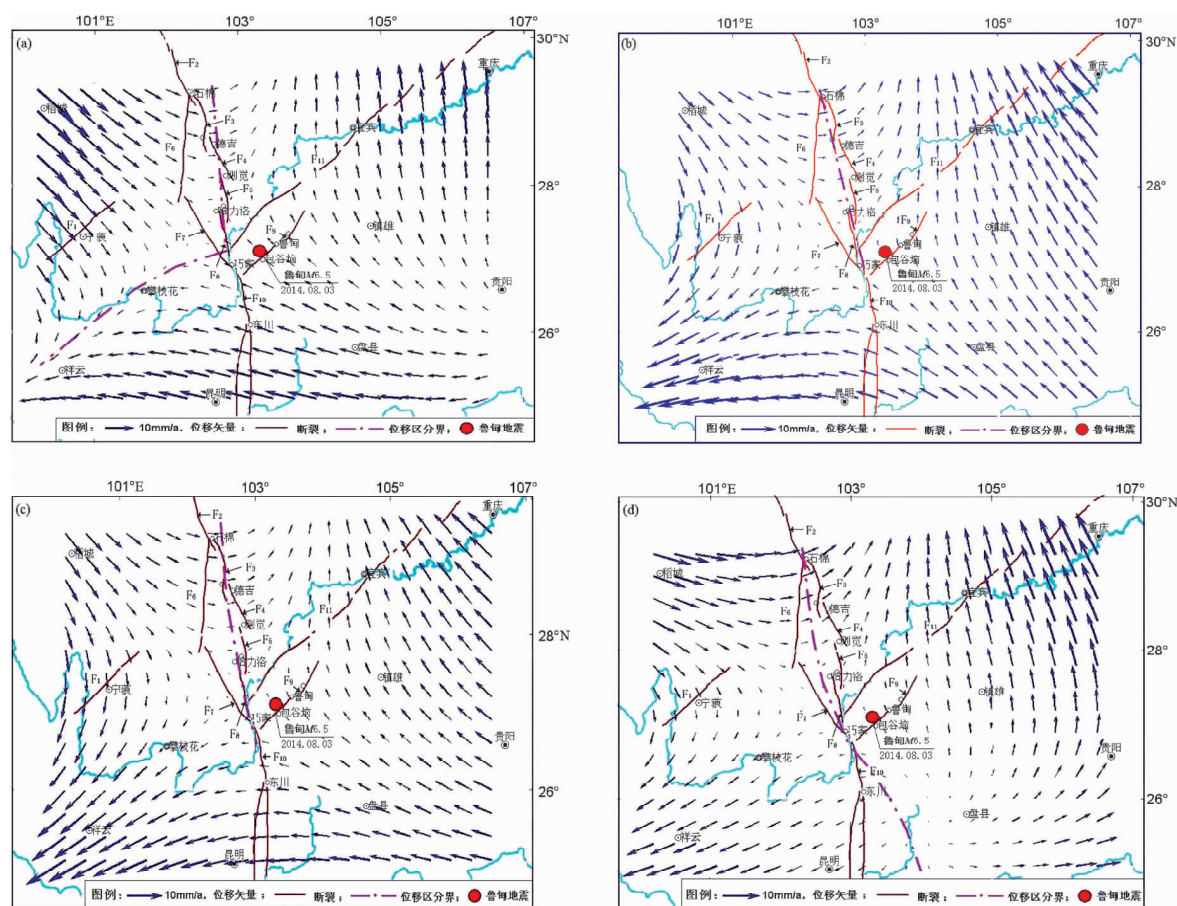


图2 鲁甸地区地壳运动速度场

(a) 2011 年; (b) 2012 年; (c) 2013 年; (d) 2013-08 ~ 2014-08

Fig. 2 Crustal motion velocity field of Ludian area

2011 年的鲁甸地区主应变场大致以小江断裂带为界分为东西两部分 (图 3a)。西区的最小主应变轴呈北西向展布, 平均为 $NW309^\circ$, 西区的最小主应变率西侧较大, 向东逐渐减小, 平均为 $-51.86 \times 10^{-9}/a$ 。西区的最大主应变轴为北东向, 平均为 $NE39^\circ$, 最大主应变率相对较小, 平均为 $15.01 \times 10^{-9}/a$ 。西区的最小主应变率 (即绝对值) 大于最大主应变率, 反映出压应力作用较强。分界断裂带以东区域的最大主应变率相对较显著, 平均为 $24.32 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变轴在东区的北部呈北北东向展布, 南部呈北东—北东东向展布, 平均方向为 $NE34^\circ$ 。东区的最小主应变轴呈北西—北北西向展布, 平均为 $NW304^\circ$, 最小主应变率较小, 平均为 $-4.55 \times 10^{-9}/a$ 。东区的最大主应变率大于最小主应变率, 表明东区的北东—北东东向张应力作用较强。

2012 年的主应变与前期的分区相似 (图 3b), 亦可分为东西两个应变区, 分界带亦在安宁河—则

木河—小江断裂带附近。西区最小主应变轴仍然呈北西向展布, 平均为 $NW317^\circ$, 最小主应变率平均为 $-23.45 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变轴呈北东向展布, 平均为 $NE46^\circ$, 最大主应变率平均为 $27.65 \times 10^{-9}/a$, 二者量值相差较小, 最大主应变率比前期有所增加。东区的北部最小主应变轴呈近东西向展布, 南部呈北西—北北西向展布。东区最小主应变率平均为 $-19.97 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变率为 $13.50 \times 10^{-9}/a$, 最小主应变率大于最大主应变率。它们反映出东区的压应力作用相对较强。与 2011 年的主应变率相比, 东区的压应力作用亦明显增强。

2013 年应变场与前期相似, 分为东西两个区域 (图 3c)。西区的最小主应变轴继续保持着北西向, 最大主应变轴为北东向。西区的最小主应变率平均为 $-21.96 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变率南部相对较大, 北部相对较小, 平均为 $27.45 \times 10^{-9}/a$ 。东区北部的最小主应变轴为近东西向, 最小主应变率平均为 $-20.81 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变轴呈南

北向, 最大主应变率平均为 $8.52 \times 10^{-9}/a$, 最小主应变率大于最大主应变率。东区南部的最小主应变轴变为北西向, 最大主应变轴为北东向, 最大主应变率平均为 $17.39 \times 10^{-9}/a$, 最小主应变率平均为 $-13.31 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变率大于最小主应变率。

2013-08~2014-08 主应变场是临近鲁甸地震前的变化, 分为两部分, 分界带呈北东东向延伸 (图 3d)。西北部应变区最小主应变轴呈北西向展布, 最小主应变率为 $-24.39 \times 10^{-9}/a$, 最大主应变轴呈北东向展布, 最大主应变率为 $19.98 \times 10^{-9}/a$ 。东南部应变区的最小主应变率较小, 为 $-0.87 \times 10^{-9}/a$, 最小主应变轴方向距应变区分界带较近地带呈北西-东西向, 最小主应变率为负值, 在远处的东南部最小主应变轴呈北东

向展布, 而且最小主应变率变为正值。东南部应变区的最大主应变率相对较大, 为 $19.73 \times 10^{-9}/a$, 总体上最大主应变轴也从分界带向外由北东-南北向变为北西向。2013-08~2014-08 主应变场的西北区最小主应变率较大, 且为压性, 东南区的最大主应变率较大, 并且为张性。它们反映出西北区压应力作用相对较明显, 应力主轴展布方向稳定, 东南区张应力作用相对明显, 应力主轴展布方向变化较大。

上述研究表明, 鲁甸地区的主应变率变化可以分为 2011~2013 年和 2014 年两个大的阶段, 前期呈现东西分区, 后期呈现西北东南分区。西区最小主应变轴呈北西向, 不同时段变化较小, 相对稳定, 东区变化相对较大。主应变率在不同时段不同区域差别明显。

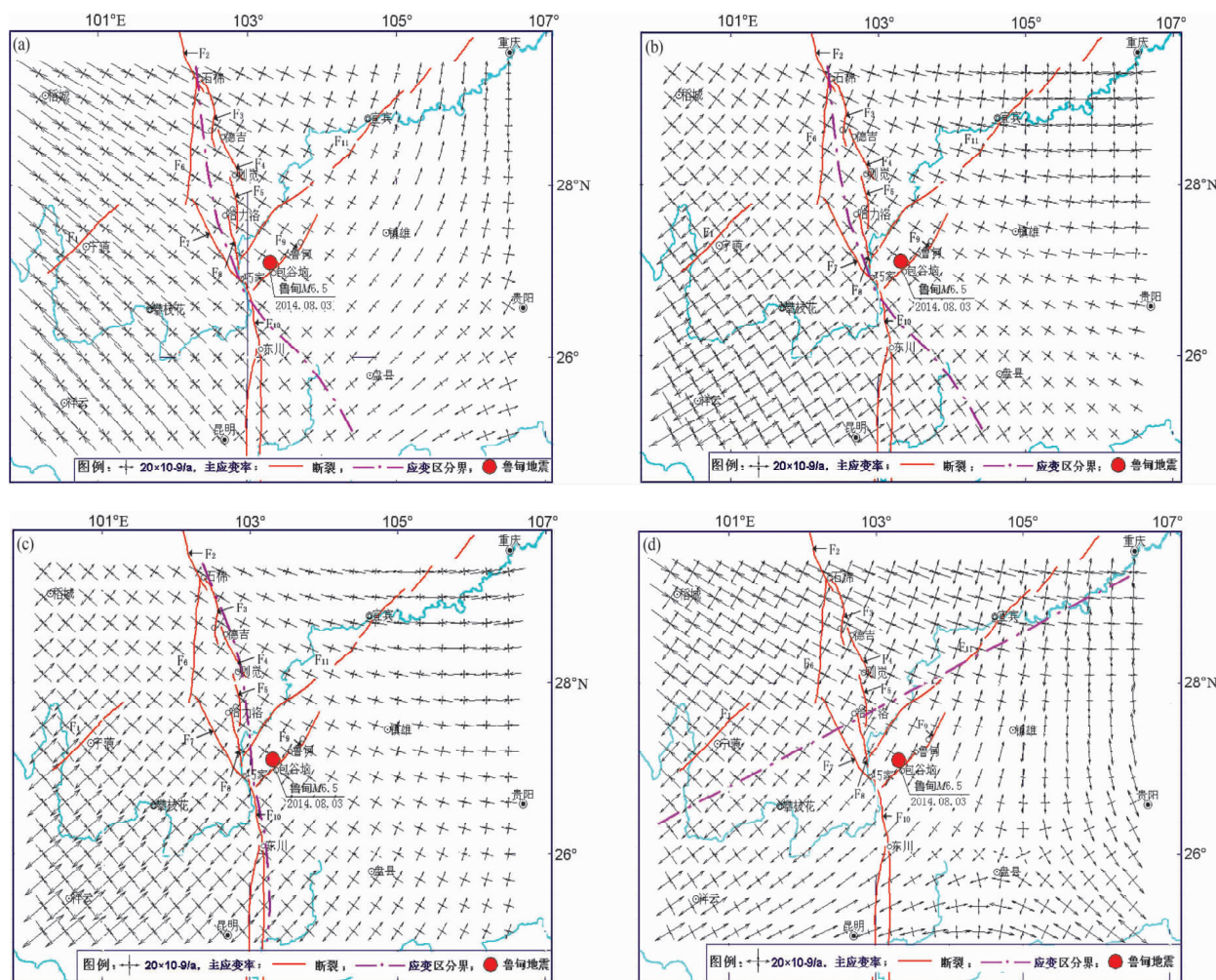


图 3 鲁甸地区主应变率场

(a) 2011 年; (b) 2012 年; (c) 2013 年; (d) 2013-08~2014-08

Fig. 3 Principal strain rate field of Ludian area

4 区域整体应变率

鲁甸地区整体主应变率（表 1）各时段变化表明，最小主应变率（ E_1 ）均为负值，属压性，最大主应变率（ E_2 ）均为正值，属张性。研究区最小主应变轴（ A_1 ）为北西—南东向，最大主应变轴（ A_2 ）为北东—南西向，最小主应变率和最大主应变率接近，最大剪应变率（ R ）相对较大。它们反映出本区域总体同时受北西—南东向压应力作用和北东—南西向张应力作用，区域剪切活动较强。

表 1 鲁甸地区主应变率

Tab. 1 Principal strain rate in Ludian area

时段	E_1	A_1	E_2	A_2	R
2011	-30.28	312.8	15.20	42.8	45.48
2012	-17.34	312.6	19.76	42.6	37.10
2013	-17.36	307.9	18.75	37.9	36.11
2013-08~2014-08	-13.37	307.1	18.65	37.1	32.02

注：应变率 E_1 、 E_2 、 R 的单位是 $1 \times 10^{-9}/a$ ；应变轴 A_1 、 A_2 单位是（°）。

5 断裂带应变率

图 4 和表 2 是不同时间段安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带、昭通—鲁甸断裂带的主应变率。

2011 年以来安宁河断裂带的压应变主轴均为北西西向，张应变主轴均为北北东向，反映出安宁河断裂带主要受北西向压应力和北东向张应力作用。安宁河断裂带近南北走向，压应力主轴与断裂带走向交角较大，张应力主轴与断裂带交角较小，而且多数时间段压应变率大于张应变率，断裂带主要为左旋压扭性活动。

则木河断裂带北西走向，各个时段的压应变主轴亦呈北西西向，张应变主轴为北北东向，说明则木河断裂带也主要受北西向压应力和北东向张应力作用。压应变主轴与断裂带交角较小，张应力主轴与断裂带交角较大，压应变率在多数时间段小于张应变率，表明断裂带以左旋张扭性活动为主。

小江断裂带南北走向，各个时段的压应变主

轴跟安宁河断裂带与则木河断裂带的大致相同，为北西向，张应变主轴为北东向，它们均与断裂走向斜交，而且两个主应变轴与断裂走向的夹角大致相等。因此在两个主应变轴对应的应力作用下，断裂带表现为走滑活动。2011~2013 年压应变率逐渐减小，张应变率在 2012~2013 年相对较大，在 2011 年和 2013-08~2014-08 时间段略小，但是在 2011 年和 2013-08~2014-08 的差别不大。同时段的压应变率和张应变率比较，则 2012 的量值差别较小，2013-08~2014-08 的量值差别明显，张应变率相对较大。总体说明该断裂带以张扭活动为主。

昭通—鲁甸断裂带北东走向，它对鲁甸 $M_s6.5$ 地震起了控制作用。其上 2011~2014-08 的压应变主轴均为北西向，与断裂走向近于垂直，反映出断裂主要受压应力作用。断裂的压应变率与张应变率相比，2011~2013 年压应变率相对较大，2013-08~2014-08 压应变率较小，张应变率相对较大。对于鲁甸地震来说，2011~2013 年压应变率对地震孕育起了主要作用，2013-08~2014-08 压应变率较小，张应变率增加，对于地震起触发作用。

表 2 断裂带的主应变率

Tab. 2 Principal strain rate of fault zone

断裂名	主应变项	2011 年	2012 年	2013 年	2013-08~ 2014-08
安宁河 断裂带	压应变主轴	301.13	301.17	304.87	297.80
	压应变率	-43.87	-18.83	-20.84	-26.80
	张应变主轴	31.13	31.17	34.87	27.80
则木河 断裂带	张应变率	16.30	18.20	13.59	18.97
	压应变主轴	307.54	313.20	310.04	304.02
	压应变率	-38.47	-18.97	-19.02	-12.63
小江断裂带	张应变主轴	37.54	43.20	40.04	34.02
	张应变率	16.28	20.17	20.36	17.43
	压应变主轴	314.94	321.02	312.44	320.70
昭通—鲁甸 断裂带	压应变率	-30.31	-21.11	-16.86	1.09
	张应变主轴	44.94	51.02	42.44	50.70
	张应变率	18.68	23.16	25.75	17.61
	压应变主轴	305.80	304.60	302.00	296.42
	压应变率	-22.07	-17.27	-16.82	-6.32
	张应变主轴	35.80	34.60	32.00	26.42
	张应变率	19.06	15.02	14.75	16.27

注：应变主轴单位是（°），应变率单位是 $1 \times 10^{-9}/a$ 。

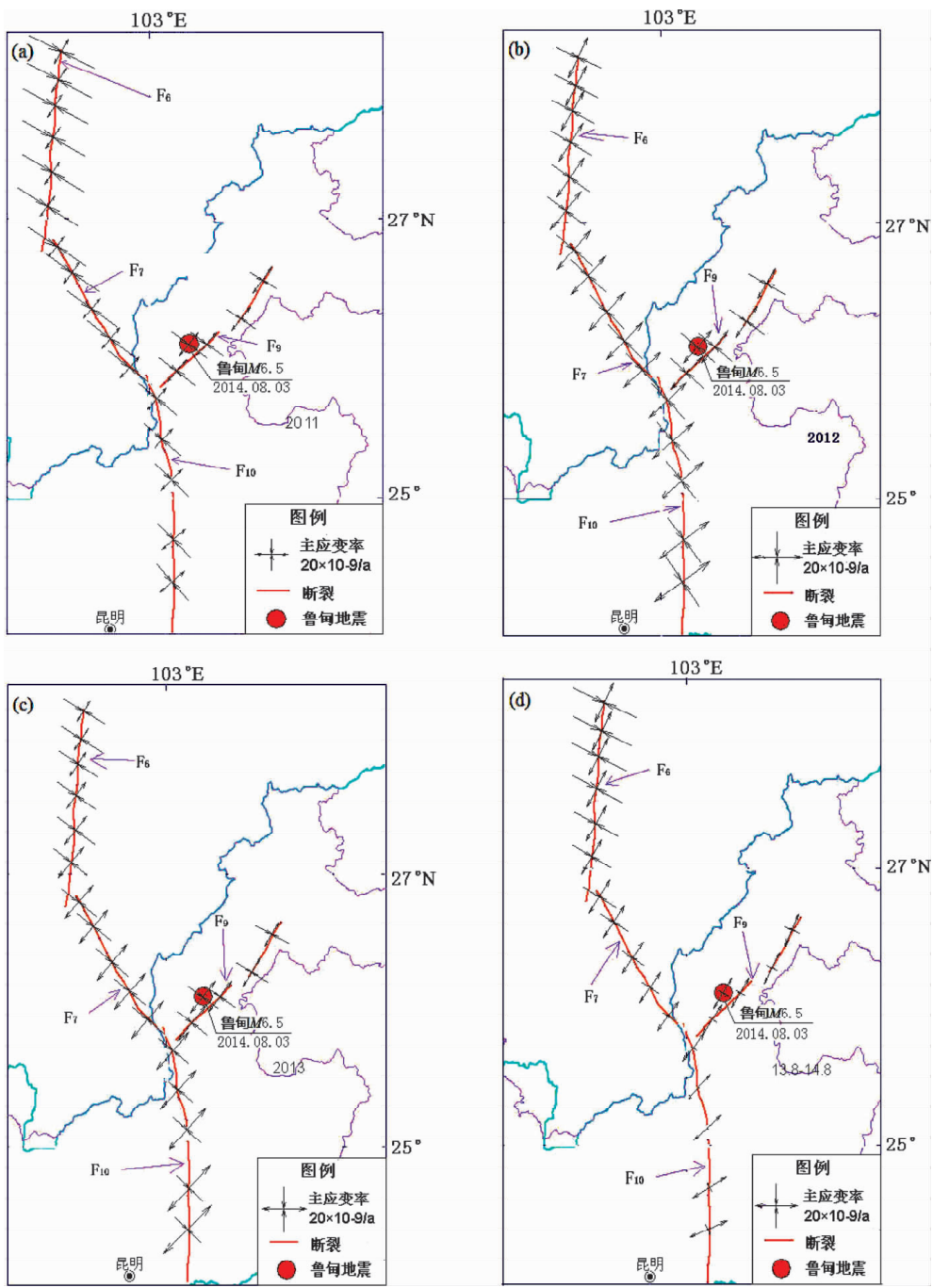


图 4 2011 年 (a)、2012 年 (b)、2013 年 (c)、2013-08-2014-08 (d) 研究区断层主应变率

Fig. 4 Principal strain rate field of Ludian area in 2011 (a), 2012 (b), 2013 (c), 2013-08~2014-08 (d)

6 震中区应变

2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震的震源应力 P 轴为 $299^\circ/\angle 2^\circ$, T 轴为 $30^\circ/\angle 6^\circ$, 节面 I 产状: $NE74^\circ/\angle 84^\circ/\angle 177^\circ$ (走向/倾角/滑动角), 节面

II 产状: $NE165^\circ/\angle 87^\circ/\angle 6^\circ$, 地震为走滑型。震中区 2011 年主压应变率为 $-27.39 \times 10^{-9}/a$, 2012 年和 2013 年分别为 $-17.63 \times 10^{-9}/a$ 、 $-17.03 \times 10^{-9}/a$ 。2011~2013 年的主压应变轴为 $NW306.8^\circ \sim 310.9^\circ$ 。震中区 2011~2013 年的张应变主轴为 $NE36.8^\circ \sim 40.9^\circ$, 主张应变率 $17.02 \sim$

$18.05 \times 10^{-9}/a$ 。2013-08~2014-08 主压应变率为 $-5.93 \times 10^{-9}/a$, 主压应变轴为 NW301.3°, 主张应变率为 $16.19 \times 10^{-9}/a$, 张应变主轴为 NE31.3°。它们说明震中区前期的压应力相对较大, 临近地震时张应力相对明显。震源应力 P 轴与主压应变轴方向接近, 地震断层节面与主压应变轴和主张应变轴对应的主应力作用下产生的最大剪切方向相近。

7 结论与讨论

(1) 2011~2013 年鲁甸地震区运动场的位移矢量基本相同, 均可分为西区、东区和南区。南区向西运动, 西区向南东运动, 东区向北运动。东西两区分界带与石棉—德吉—布拖断裂—巧家断裂带的位置大体一致, 显示左旋走滑。东区和西区与南区的分界带不与构造复合。2014 年的运动场分为东西两个运动区, 西区仍然向南运动, 东区向北运动, 分界带北段与前期的重合, 南段是北段的延伸, 它亦呈左旋走滑。位移场分界带是形变异常带, 与地应力变化和地震孕育有关。

2011~2013 年南区对北部东西两区分界带断裂运动起了阻碍作用, 这对鲁甸地震的能量积累起了一定的作用。2014 年东西两区分界带贯穿南北, 突破前期南部的阻碍, 对鲁甸地震发生可能有触发作用。

(2) 2011~2013 年鲁甸地震区的主应变轴反映出西区的压应力主方向为北西—南东向, 张应力主方向为北东—南西向, 主压应力和主张应力都相对较大; 同时期东区的北部压应力主方向为东西向, 中南部为北西—南东向, 张应力主方向北部为南北向, 中南部为北东—南西向。2014 年西北区的压应力主方向为北西—南东向, 东南区为东西向至北西—南东向, 而且有向震中收敛的趋势。2014 年西北区的主压应力和主张应力相差较小, 东南区以主张应力为主导。鲁甸震中偏于东区, 东区前期的主压应力相对较大, 对地震孕

育有利, 后期主张应力增加, 对地震发生有利。

(3) 断裂带的主应变轴和主应变率揭示出, 安宁河—则木河—小江断裂带主要受北西—南东向主压应力和北东—南西向主张应力作用, 其活动性为左旋走滑。昭通—鲁甸断裂带受垂直于断裂的主压应力作用和平行于断裂的主张应力作用, 断裂主要表现为挤压活动。

(4) 鲁甸 $M_s6.5$ 地震震中的主应变揭示出, 2011~2014 年压应力主轴为 $301^\circ \sim 310.9^\circ$, 张应力主轴为 $31^\circ \sim 40.9^\circ$ 。地震断层节面与最大剪应力作用方向基本一致。控制地震孕育的北东向昭通—鲁甸断裂带 2011~2013 年压性活动明显, 有利于地震形成, 2014 年压性减弱, 张性增加, 有利于地震发生(李延兴等, 2007; 张培震等, 2008)。

参考文献:

- 郭良迁, 薄万举, 杨国华, 等. 2011. 玉树 $M_s7.1$ 级地震前的形应变场变化特征[J]. 地球物理学报, 54(8): 1990-1996.
- 郭良迁, 李延兴, 胡新康, 等. 2009. 中国大陆地壳运动与汶川 $M_s8.0$ 级地震孕育的关系[J]. 地球物理学报, 52(2): 531-537.
- 郭良迁, 占伟, 杨国华, 等. 2010. 山西断陷带的近期位移和应变率特征[J]. 大地测量与地球动力学, 30(4): 36-42.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 江在森, 杨国华, 王敏, 等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 1-9.
- 李延兴, 李智, 张静华, 等. 2004. 中国大陆及周边地区的水平应变场[J]. 地球物理学报, 47(2): 222-231.
- 李延兴, 张静华, 何建坤, 等. 2007. 由空间大地测量得到的太平洋板块现今构造运动与板内形应变场[J]. 地球物理学报, 50(2): 437-447.
- 李延兴, 张静华, 周伟, 等. 2003. 汶川 $M_s8.0$ 地震孕育发生的机制与动力学问题[J]. 地球物理学报, 46(3): 519-530.
- 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D辑), 31(7): 529-536.
- 张培震, 沈正康, 王敏, 等. 2004. 青藏高原及周边现今构造形变的运动学[J]. 地震地质, 26(3): 367-377.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066-1073.

Evolution Characteristics of Regional Horizontal Deformation and Strain Field Induced by Ludian $M_s6.5$ Earthquake

CHEN Fu-chao, CHEN Ju-zhong, GUO Liang-qian, ZHANG Feng-shuang

(*First Crust Deformation and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China*)

Abstract

Firstly, using the data recorded by continuous GPS observation sites in Ludian seismic region, we calculated the velocity at observation sites, and got the crustal movement field and principal strain rate field by the fitting calculation of rigid-linear elastic motion equation. Secondly, based on the obtained results, we researched the movement field characteristics and strain stress field changes of Ludian seismic region and discussed their relationship with earthquake preparation. The results show that the movement field of the fault in the boundary belt in the north was strike-slip, however the lateral movement field of the boundary belt was hindered from a strong strain compression stress field in the south of the study area, which was conducive for the forming of the stress and strain accumulation and earthquake preparation during 2012 and 2013. The movement field of boundary belt ran throughout north to south, and the extensional of strain stress field increased in 2014, which was advantageous to release the strain stress and induce to occur an earthquake.

Key words: horizontal movement field; principal strain rate field; fault principal strain rate; Ludian $M_s6.5$ earthquake