

徐声鑫, 王岩, 辜有启. 云南地区 GPS 面膨胀格网异常动态变化与 $M \geq 5.0$ 地震关系分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 6-16. [XU Shengxin, WANG Yan, GU Youqi. Analysis of the Relationship between the Anomalous Dynamic Change of GPS Surface Expansion Grid and the Earthquakes with $M \geq 5.0$ in Yunnan [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 6-16]

云南地区 GPS 面膨胀格网异常动态变化与 $M \geq 5.0$ 地震关系分析

徐声鑫, 王岩, 辜有启

(云南省地震局, 昆明 650041)

摘要: 基于 2011—2014 年云南地区 GPS 连续观测资料, 利用高精度数据处理软件 (GAMIT/GLOBK) 处理后获得位移场, 对位移场进行网格化插值获得均匀分布于 56 个网格的位移场。基于每个网格位移场时间序列求取其面膨胀时间序列, 对去除趋势项后的面膨胀时间序列, 设定二倍标准差作为异常阈值。以 2011 年 6 月 20 日腾冲 5.2 级、2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级、2014 年 5 月 24、30 日盈江 5.6、6.1 级和 2013 年 3 月 3 日洱源 5.5 级地震为样本, 对地震孕育过程中面膨胀格网异常的空间分布和时间尺度的变化走势进行分析。结果表明: 5 次地震前云南地区的面膨胀格网异常存在大区域的动态变化, 且震前相对集中, 面膨胀异常格网分布相对集中的区域可作为未来地震发生地点的参考性指标; 从 5 次地震的震中位置和异常格网的分布状况来看, 5 次地震震中都没有位于异常格网内, 而是位于异常格网边缘, 这表明面膨胀异常区边缘可能更加危险。

关键词: GPS 面膨胀; 格网异常; 动态变化

中图分类号: P315; P227 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-006-011

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.02

Analysis of the Relationship between the Anomalous Dynamic Change of GPS Surface Expansion Grid and the Earthquakes with $M \geq 5.0$ in Yunnan

XU Shengxin, WANG Yan, GU Youqi

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650041, China)

Abstract: Based on the GPS continuous observation data of Yunnan area from 2011 to 2014, the displacement field was obtained by processing with high-precision data processing software (GAMIT / GLOBK), and the displacement field was grid-interpolated to obtain a displacement field uniformly distributed on 56 grids. The surface expansion time series of each grid displacement field is calculated based on the time series of the displacement field. For the surface expansion time series after removing the trend term, a double standard deviation is set as the abnormal threshold. Taking the Tengchong M_s 5.2 earthquake on June 20th 2011, Ludian

收稿日期: 2020-04-10

基金项目: 北斗地基增强系统地震行业分系统: 云南省地震局共享子系统建设与北斗应用实验项目 (BDS-2019-YN-01); 国家重点研发计划课题 (2018YFC1503604) 和李建成院士工作站 (2015IC015) 共同资助

作者简介: 徐声鑫 (1985-), 男, 工程师, 主要从事 GNSS 数据处理与分析工作。

E-mail: 408705228@qq.com

M_s 6.5 earthquake on August 3rd, 2014, Yingjiang M_s 5.6 and M_s 6.1 earthquakes on May 24th and 30th, 2014 and Eryuan M_s 5.5 earthquake on March 3rd, 2013 as samples, the paper analyzes the spatial distribution and time-scale change trend of the surface expansion grid anomaly during earthquake preparation. The results show that: before the five earthquakes, the surface expansion lattice anomalies in Yunnan area have dynamic changes in large areas, and they are relatively concentrated before the earthquake. The areas with relatively concentrated surface expansion and abnormal grid distribution can be used as reference for future earthquake occurrence sites. From the epicenter location of the five earthquakes and the distribution of the anomalous grid, the epicenters of the five earthquakes are not located in the anomalous grid, but at the edge of the anomalous grid, indicating that the edge of the surface expansion anomaly may be more dangerous.

Keywords: GPS surface expansion; Grid anomaly; Dynamic change

0 引言

云南地处印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘,地震活动频度高、震级大、分布广,属于板缘、板内地震混合型地区^[1]。云南地区的地震活动背景与其特殊的区域构造环境、地震成带分布及断裂带的活动密切相关。地震的孕育、发生是一个极其复杂的、缓慢的过程,经历不同的发展阶段^[2]。GPS 作为先进的测量手段,其 24 h 连续观测的特点最大限度的满足了地壳运动形变实时监测的要求。随着“中国大陆构造环境监测网络”的相继建成和顺利运行,为 GPS 观测资料应用于地壳活动性分析、地球动力学研究及地震预测预报奠定了基础。

近年来,不少学者针对 GPS 连续观测数据如何应用于云南地区的地震预测预报进行了探索和研究,洪敏、王伶俐等基于早期观测数据,结合国内外研究现状,通过理论研究和资料试算,对云南省 GPS 基准站数据处理不同参考基准进行了对比研究,最后选定位于华南块体的文山 GPS 基准站作为云南 GPS 位移数据处理的参考基准,解决了全球框架下解算得到的位移因包含板块自身运动,区域微动变化无法在块体间相对运动中识别出来的难题^[3-5]。邵德盛、洪敏等针对 GPS 在短临预测方面应用相对薄弱的问题,通过对点位移的深加工处理,提出了面膨胀综合预测指标法^[2,6],将 GPS 观测结果应用于地震短临预测,并取得了较好的效果。

基于 GPS 连续观测资料获取的面膨胀参数,物理意义明确,能直观反映不同区域的张压特性^[7-8]。本文基于 2011—2014 年云南地区 GPS 连续观测资料,利用高精度数据处理软件 (GAMIT/GLOBK) 处理后获得位移场。对位

移场进行网格化插值获得均匀分布于 56 个网格的位移场 (图 1)。基于每个网格位移场时间序列求取其面膨胀时间序列,对去除趋势项后的面膨胀时间序列,设定二倍标准差作为异常阈值。以 2011 年 6 月 20 日腾冲 5.2 级、2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级、2014 年 5 月 24、30 日盈江 5.6、6.1 级和 2013 年 3 月 3 日洱源 5.5 级地震为样本,对地震孕育过程中面膨胀格网异常的空间分布和时间尺度的变化走势进行分析。

1 GPS 数据处理与面膨胀格网异常提取

GPS 数据处理采用了美国麻省理工学院 (MIT) 和加州大学圣地亚哥分校 Scripps 海洋研究所 (SIO) 研制的 GAMIT/GLOBK 软件,该软件因具有运算速度快、版本更新周期短、自动化处理程度高以及代码开源性等特点被国内外科研工作者广泛应用。采用与全球 IGS 解算数据进行联合平差的方法,数据处理的基本流程是利用 GAMIT 软件获得“陆态网络”云南境内 28 个基准站及中国大陆周围 15 个 IGS 测站的区域单日松弛解。GAMIT 计算中加入中国大陆及周边地区的 15 个 IGS 站 (BAN2、IRKT、KIT3、USUD、KUNM、BJFS、TSKB、TWTF、LHAZ、KHAJ、IISC、PIMO、URUM、SELE、WUHN) 在相应时间段内的数据一并进行处理。完成 GAMIT 的计算之后,利用 GLOBK 软件将 SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) 给出的全球单日松弛解和计算所得的“陆态网络”区域单日松弛解进行联合平差计算。

在获取了各个站点位移时间序列的基础上,引入克里金插值方法对位移场进行网格化,该

方法理论基础严密,是一种线性、无偏、最优的内插估计算法,利用该方法进行应变场的求解,其插值的优越性已经得到了充分的认可^[9-10]。本文以 $1^\circ \times 1^\circ$ 为单元把云南地区划分成了 56 个格网,把点位移内插到这 56 个格网中,具体的格网编号与 GPS 站点分布见图 1。通过格网化的位移场按每个格网与相邻格网组网的方式求取应变场,可以获得 56 个格网的应变场参数时间序列^[2,6,12],具体解算方法为:

在二维空间中,假设某个测点 A 与其无限接近的另外一点间的位移变化量为 Δu 、 Δv , 设 A 点的应变状态分量为 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} , d_x 、 d_y 为两点间距离分量的变化量, ω 为旋转量, 那么有^[11]:

$$\begin{cases} u' = u + \varepsilon_x d_x + \varepsilon_{xy} d_y - \omega d_y \\ v' = v + \varepsilon_{xy} d_x + \varepsilon_y d_y - \omega d_x \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (2)$$

式 (1) 两边同时除两点间距离, 可转变为线应变与方位角之间的关系, 每个格网点通过联立与其他各个相邻格网点的方程组, 便可通过最小二乘法求解得到其应变状态分量 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} , 进一步可以计算其他的应变参数, 包括最大剪应变、面膨胀等参数^[12]。面膨胀 Δ 计算公式为^[7,12]:

$$\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (3)$$

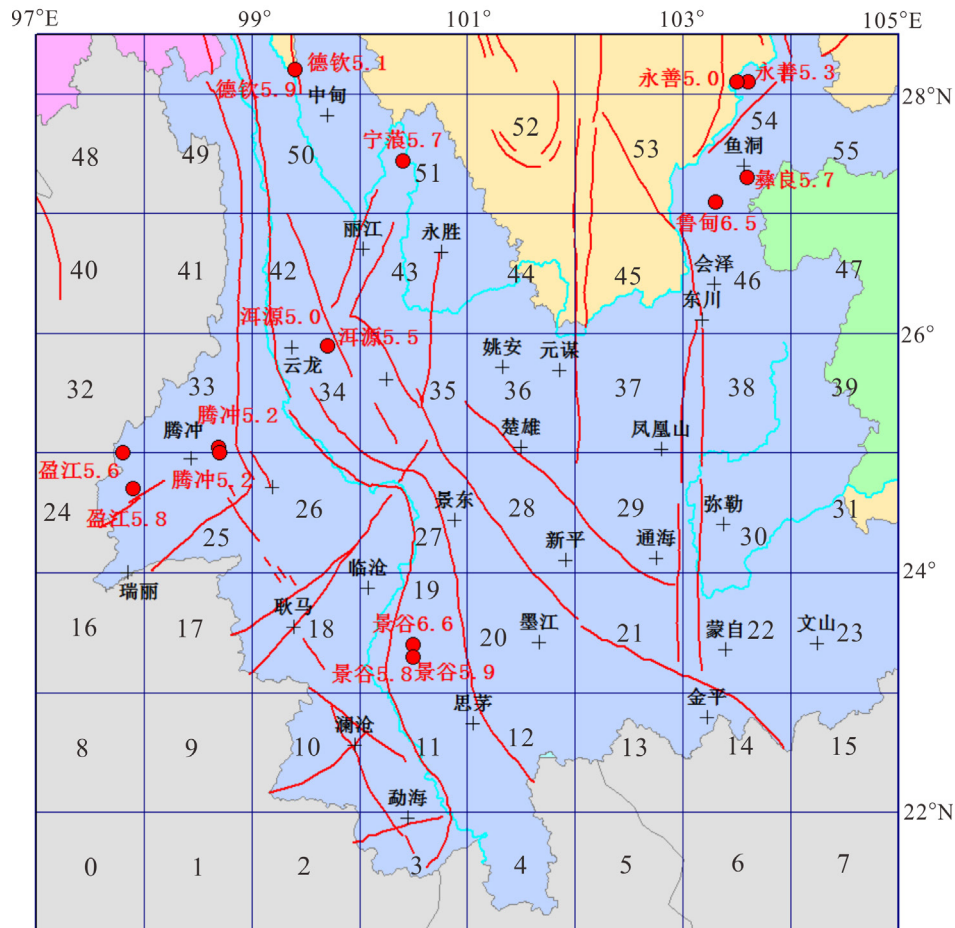


图 1 云南地区 GPS 连续站、格网划分结果及 2011—2014 年 $M \geq 5.0$ 地震分布图

Fig.1 Results of GPS continuous stations and grid division results in Yunnan area and the distribution of earthquakes with $M \geq 5.0$ earthquakes from 2011 to 2014

根据以上计算,可获取 56 个格网的面膨胀时间序列。从长趋势运动背景看,不同区域的应变场存在不同的变化速率。张压特性的长趋

势活动对于了解地壳运动的总体特征有效的信息。但是,在震前较短的时间段内,更需要获取在长趋势变化背景下的短期异常波动,因

此, 必须先对所有格网的面膨胀时间序列进行去趋势处理^[2,6]。本文采用的是线性去趋势方法, 去除应变时间序列中的线性趋势项, 并划定二倍标准差线作为单条面膨胀曲线的异常指标线^[2,6]。图 2 为 34 号格网的面膨胀时间序列图, 其中图 2(a) 显示该格网存在一定的趋势拉

张, 年拉张速率为 0.90×10^{-8} , Rms 为 ± 0.83 。通过去除趋势项, 并设定二倍标准差作为异常阈值, 上下限差分别为: 2.0×10^{-8} 和 -1.4×10^{-8} 。由图 2(b) 可以明显看到该格网在盈江 $M_S 5.8$ 、腾冲 $M_S 5.2$ 、德钦 $M_S 5.1$ 和 $M_S 5.9$ 、盈江 $M_S 5.6$ 和 $M_S 6.1$ 级地震前均有较好的前兆异常出现。

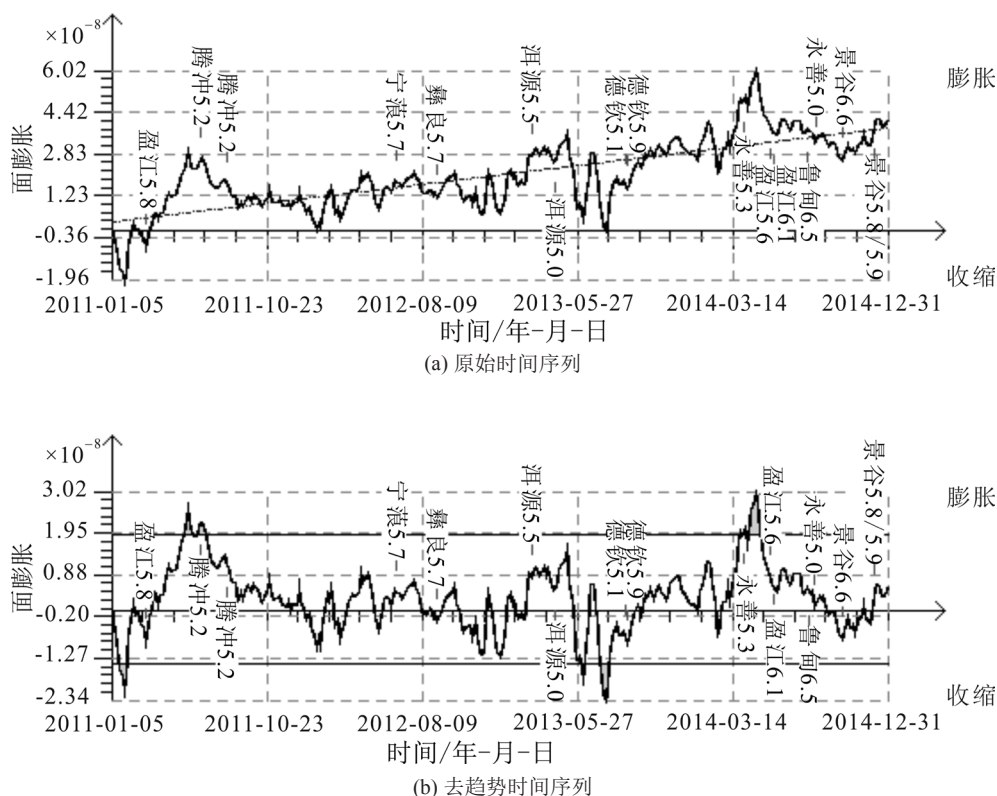


图 2 34 号格网面膨胀时间序列图
Fig.2 Expansion time series of No 34 grid

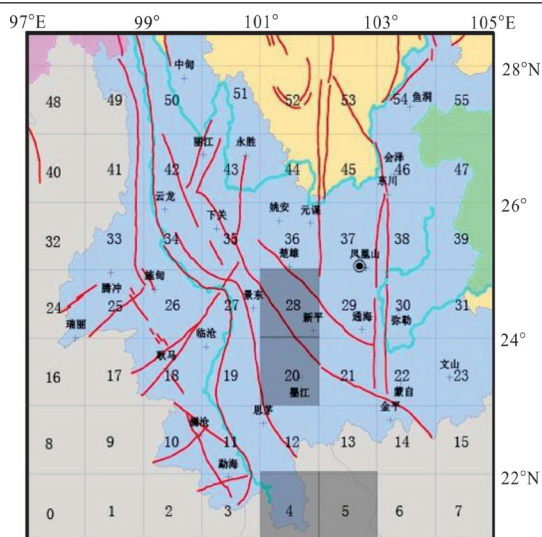
2 震例分析

2011—2014 年云南地区 ($21^{\circ} \sim 28.5^{\circ}N$, $97^{\circ} \sim 105^{\circ}E$) 共发生 $M \geq 5.0$ 地震 17 次 (其中 $M \geq 6.0$ 占 3 次, $5.5 \leq M < 6.0$ 占 8 次, $5.0 \leq M < 5.5$ 占 6 次), 震中分布见图 1。地震主要分布于小滇西—滇西—滇西北、滇东北、滇西南等地。通过对 17 个地震发生前的 GPS 面膨胀格网时序进行分析发现, 在各地震发生前短时间内, 均存在一定数量的异常格网, 但地震前的异常格网数量及分布特征存在一定的差异。考虑到篇幅所限,

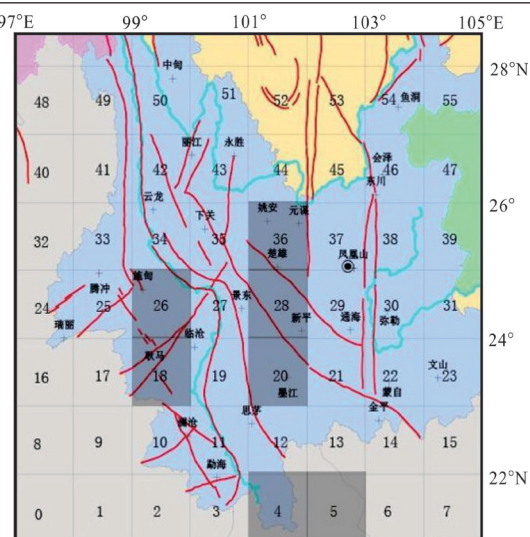
本文重点对 2011 年 6 月 20 日腾冲 5.2 级、2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_S 6.5$ 级、2014 年 5 月 24、30 日盈江 $M_S 5.6$ 、 $M_S 6.1$ 级和 2013 年 3 月 3 日洱源 $M_S 5.5$ 级地震进行了分析。为了直观的表征地震前面膨胀格网异常动态变化特征, 我们以 4 d 为窗长, 分别绘制不同时间节点的面膨胀异常格网变化情况图。

2.1 2011 年 6 月 20 日云南腾冲 5.2 级地震

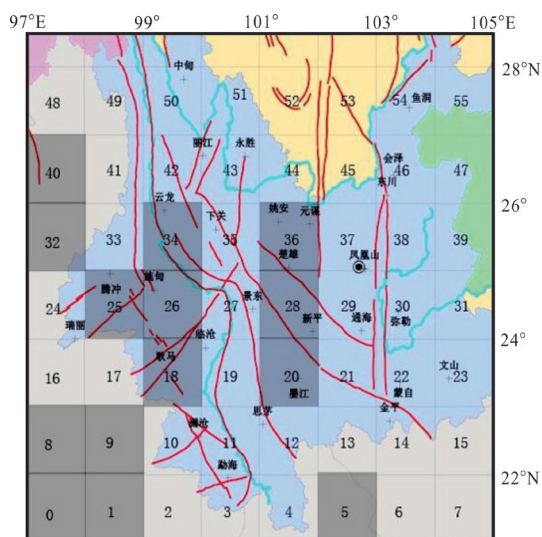
2011 年 6 月 20 日 18 时 16 分, 云南省保山市腾冲县 ($25.1^{\circ}N$, $98.7^{\circ}E$) 发生 5.2 级地震。震前面膨胀异常格网变化情况如图 3 所示。



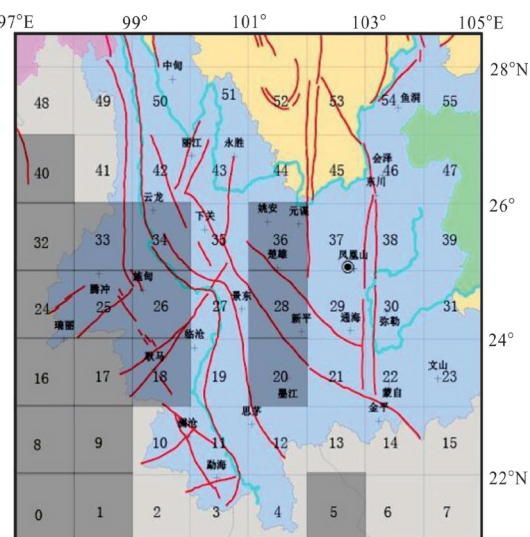
(a) 2011 年 5 月 17 日



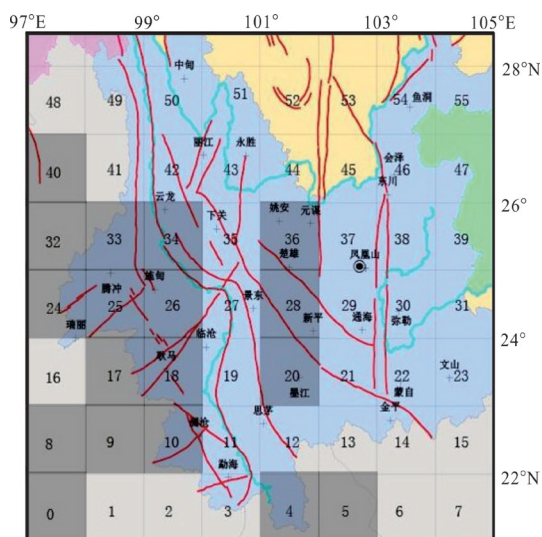
(b) 2011 年 5 月 21 日



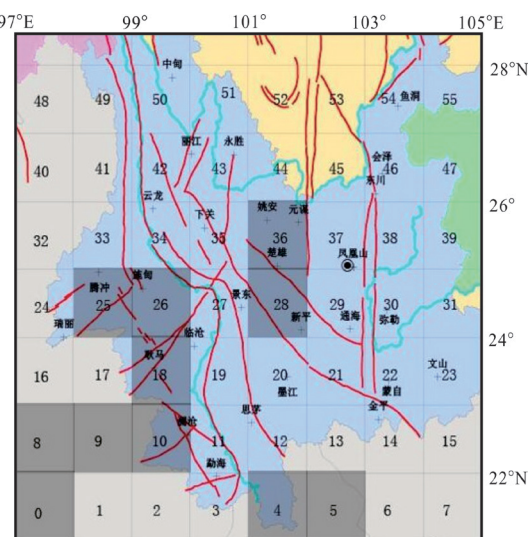
(c) 2011 年 5 月 25 日



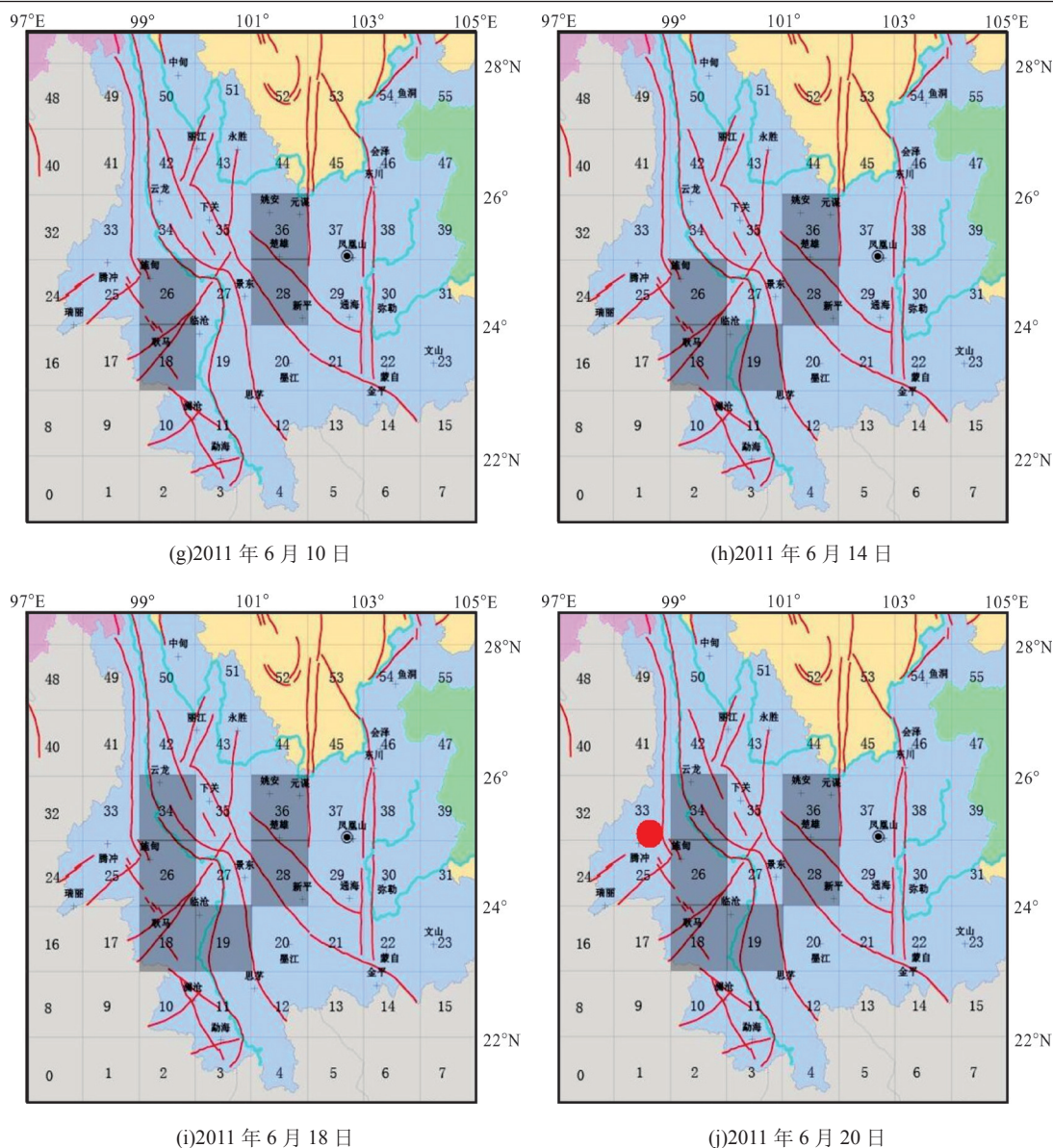
(d) 2011 年 5 月 29 日



(e) 2011 年 6 月 2 日



(f) 2011 年 6 月 6 日



(图中阴影格网为异常格网, 图 (j) 中红色大圆点为腾冲 5.2 级地震震中位置)

图 3 2011 年 6 月 20 日云南腾冲 5.2 级地震前面膨胀格网异常动态变化

Fig.3 Anomalous dynamic changes of the surface expansion grid before the Tengchong $M_s 5.2$ earthquake in Yunnan on June 20th, 2011

从面膨胀格网异常的变化趋势可以看出, 面膨胀异常格网首先出现在滇中的新平—墨江 (异常格网横跨了楚雄—建水断裂带与红河断裂带)、滇南的勐腊及境外的老挝地区 (图 3 (a))。此后小滇西的瑞丽—腾冲—施甸, 滇西南的耿马—澜沧及邻近区域的面应变异常格网有一个显著增强的过程 (图 3 (b)~3 (e)), 该过程一直持续至 6 月 2 日左右, 此时云南地区的异常格网数量最多, 达 18 个 (图 3 (e)), 此后短期内该区域异常格网数量迅速减少, 至 6 月 10 日左右达到最少, 此时云南地区只剩 4 个格网 (图 3 (g))。6 月 14 日开始, 云南地区的异常格网有少量增加 (图 3 (h)~3 (j)),

至 6 月 20 日腾冲 $M_s 5.2$ 级地震发生时, 云南地区共存在 6 个异常格网, 主要分布楚雄—新平和云龙—施甸—耿马—思茅等地, 总体呈正“U”字型分布, 腾冲 $M_s 5.2$ 级地震位于“U”字型边缘, 未发生在异常格网内部 (图 3 (j))。值得注意的是, 整个过程中新平附近的异常格网一直存在。

2.2 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震

2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分, 云南省昭通市鲁甸县 (27.1°N, 103.3°E) 发生 6.5 级地震。震前面膨胀异常格网变化情况如图 4 所示。

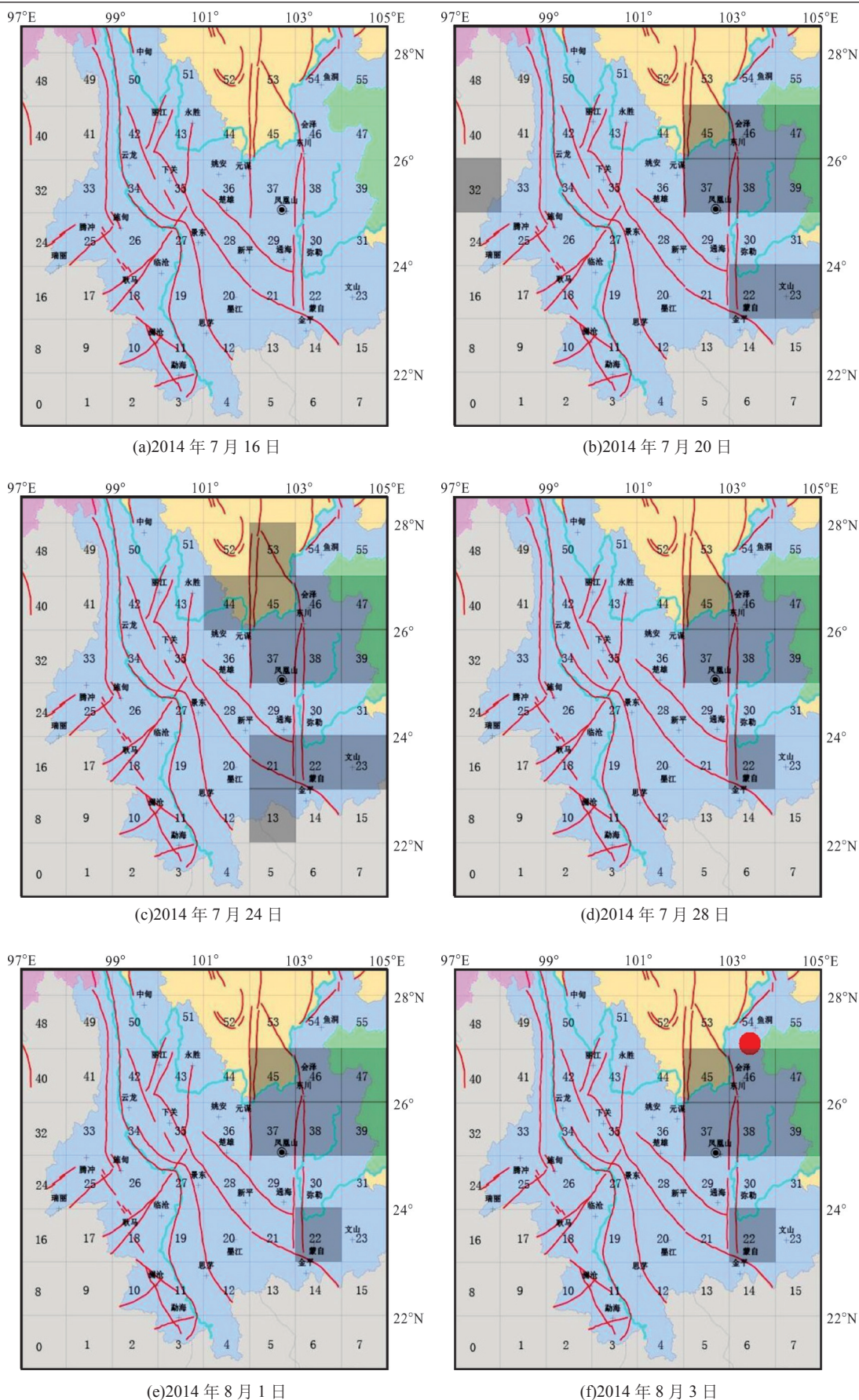


图 4 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 M_s 6.5 级地震前膨胀格网异常动态变化

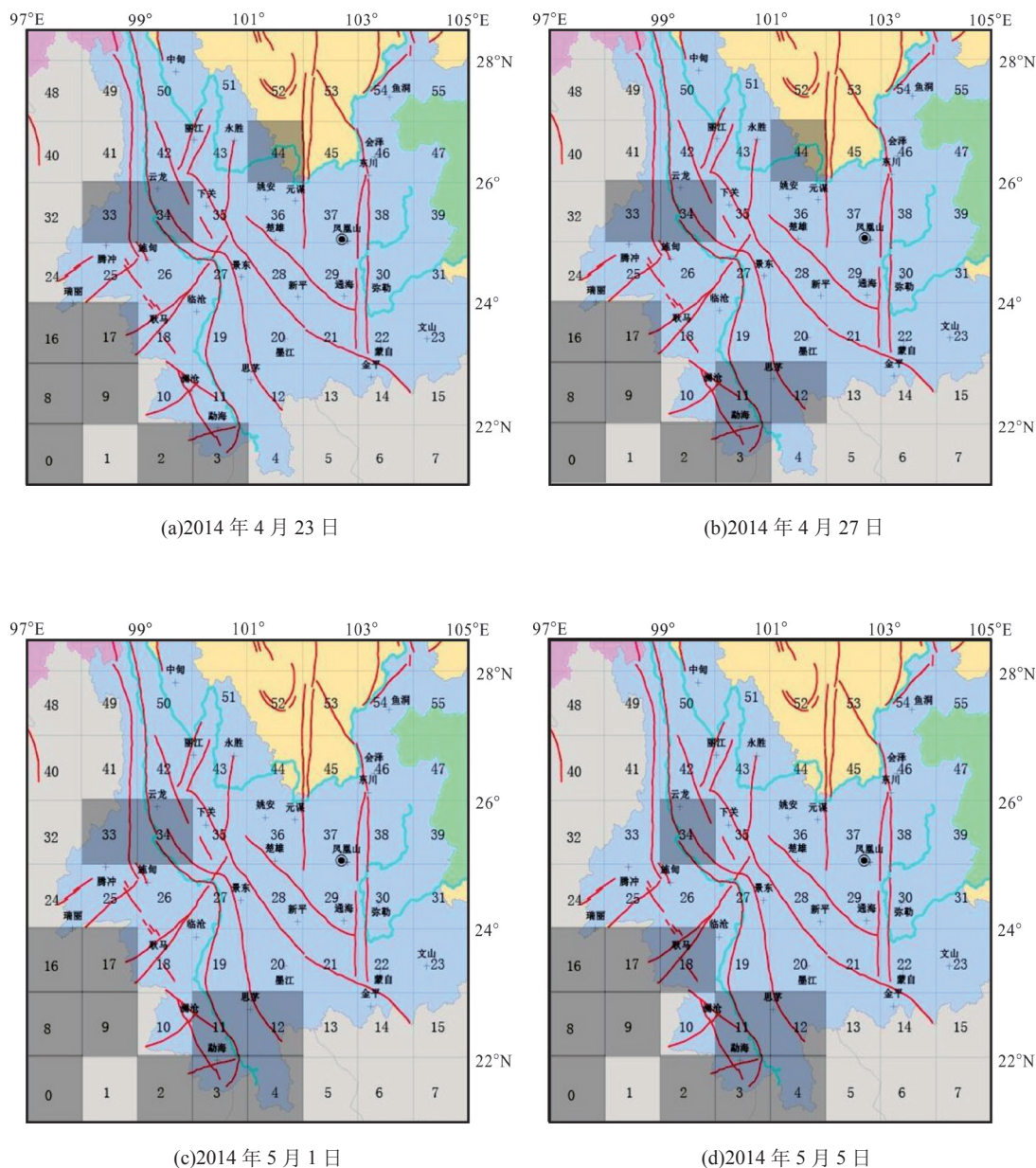
Fig. 4 Anomalous dynamic changes of the surface expansion grid before the Ludian M_s 6.5 earthquake on August 3rd, 2014

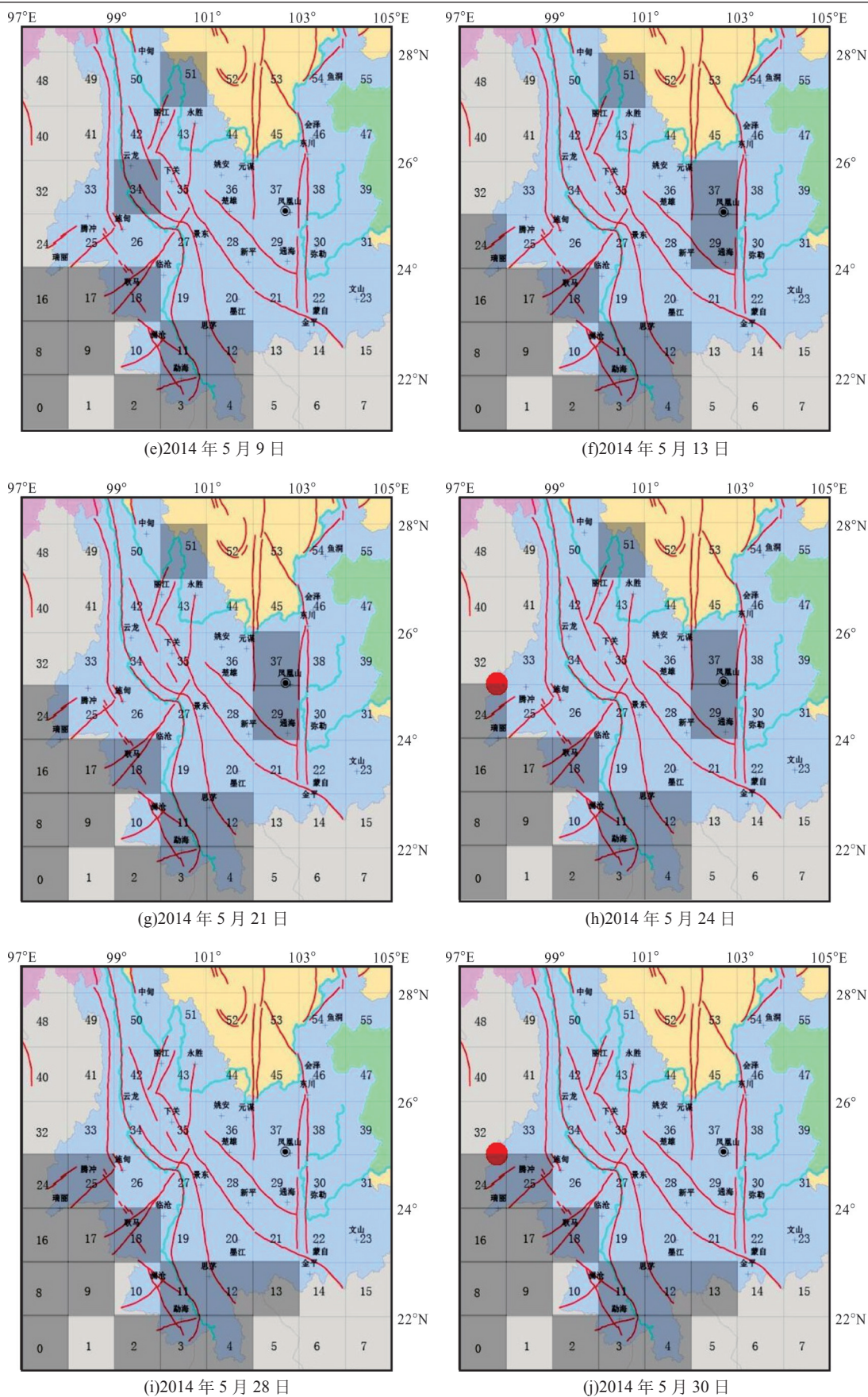
根据以上计算, 可获取 56 个格网的面膨胀时间序列。从长趋势运动背景看, 不同区域的应变场存在不同的变化速率。张压特性的长趋势活动对于了解地壳运动的总体特征是有用的信息。但是, 在震前较短的时间段内, 更需要获取在长趋势变化背景下的短期异常波动, 因此, 必须先对所有格网的面膨胀时间序列进行去趋势处理^[2,6]。本文采用的是线性去趋势方法, 去除应变时间序列中的线性趋势项, 并划定二倍标准差线作为单条面膨胀曲线的异常指标线^[2,6]。图 2 为 34 号格网的面膨胀时间序列图, 其中图 2(a) 显示该格网存在一定的趋势拉张, 年拉张速率为 0.90×10^{-8} , Rms 为 ± 0.83 。

通过去除趋势项, 并设定二倍标准差作为异常阈值, 上下限差分别为 2.0×10^{-8} 和 -1.4×10^{-8} 。由图 2(b) 可以明显看到该格网在盈江 $M_S 5.8$ 、腾冲 $M_S 5.2$ 、德钦 $M_S 5.1$ 和 $M_S 5.9$ 、盈江 $M_S 5.6$ 和 $M_S 6.1$ 级地震前均有较好的前兆异常出现。

2.3 2014 年 5 月 24、30 日盈江 $M_S 5.6$ 、 $M_S 6.1$ 级地震

2014 年 5 月 24 日 4 时 49 分, 云南省德宏州盈江县 ($25.0^\circ\text{N}, 97.8^\circ\text{E}$) 发生 5.6 地震。5 月 30 日 9 时 20 分, 震区 ($25.0^\circ\text{N}, 97.8^\circ\text{E}$) 再次发生 6.1 地震。震前面膨胀异常格网变化情况如图 5 所示。





(图中阴影格网为异常格网, 图 (h) 和图 (j) 中红色大圆点分别为盈江 5.6、6.1 级地震震中位置)

图 5 2014 年 5 月 24、30 日盈江 M_s 5.6、 M_s 6.1 级地震前面膨胀格网异常动态变化

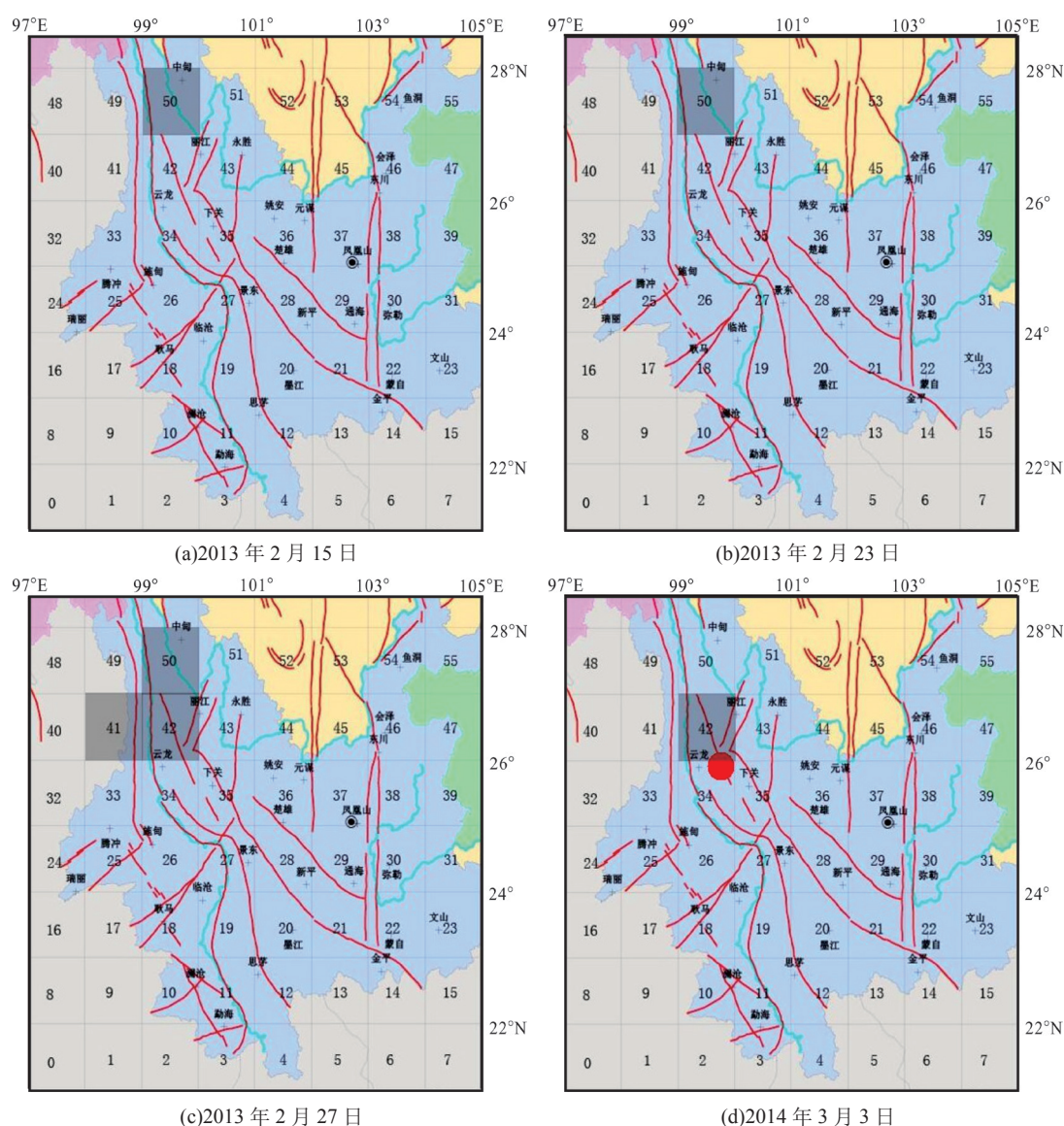
Fig.5 Abnormal dynamic changes of the surface expansion grid before the M_s 5.6 and M_s 6.1 earthquakes in Yingjiang on May 24th and 30th, 2014

从面膨胀格网异常的变化趋势可以看出, 2014 年 4 月 23 日时, 云南地区存在较多的异常格网, 共 10 个, 主要分布在云龙—施甸及境外的缅甸等地 (图 5 (a)), 此后, 异常格网一直存在。从 5 月 1-24 日盈江 $M_s 5.6$ 级地震时, 云龙—施甸地区的异常格网有所减少, 小滇西的瑞丽、滇西南的勐海—思茅—耿马、滇中的昆明—通海、境外的缅甸等地异常格网有所增加 (图 5 (c) ~ 5 (h))。至 5 月 24 日盈江 $M_s 5.6$ 级地震发生时, 云南地区的异常格网数量达到最多, 有 15 个, 5 月 24 日盈江 $M_s 5.6$ 级地震发生在异常格网集中区的北部边缘地带 (图 5 (h))。从 5 月 24 日盈江 $M_s 5.6$ 级至 5 月 30 日盈江 6.1 级地震期间, 云南地区的异常格网数

量有所减少, 滇中的昆明—通海等地的异常格网消失, 盈江 $M_s 6.1$ 级地震发生时云南地区的异常格网为 14 个, 主要集中分布于滇西南的腾冲—耿马—思茅—勐海及境外的缅甸等地 (图 5 (h) ~ 5 (j))。5 月 30 日盈江 $M_s 6.1$ 级地震发生在异常格网集中区的北部边缘地带 (图 5 (j))。值得注意的是, 两个地震发生在同一个位置, 但都未发生在异常格网集中区内部, 而是位于异常区边缘地带 (图 5 (h) 和 5 (j))。

2.4 2013 年 3 月 3 日洱源 $M_s 5.5$ 级地震

2013 年 3 月 3 日 13 时 41 分, 云南省大理州洱源县 (25.9°N, 99.7°E) 发生 5.5 地震。震前面膨胀异常格网变化情况如图 6 所示。



(图中阴影格网为异常格网, 图 (d) 中红色大圆点为洱源 5.5 级地震震中位置)

图 6 2013 年 3 月 3 日洱源 5.5 级地震前面膨胀格网异常动态变化

Fig.6 Abnormal dynamic changes of the surface expansion grid before the Eryuan $M_s 5.5$ earthquake on March 3rd, 2013

从面膨胀格网异常的变化趋势可以看出,从2013年2月15日至2月23日,云南地区面应变异常特征不明显,仅滇西北的中甸—丽江地区存在1个格网(图6(a)~6(b))。此后该地区的异常格网数量有少量增加,到2月27日时,增加到3个(图6(c))。接着异常格网数量又开始减少,到3月3日洱源 $M_s 5.5$ 级地震发生时只剩1个,洱源5.5级地震发生在异常格网边缘(图6(d))。

3 讨论

地震发生虽需能量积累,但能量积累到一定程度后,其触发应是由某些异常变化所引起^[2]。如果地震发生前存在区域应力场调整的情况,那么可能出现背离长趋势的地壳形变过程,此类形变过程则是地震发生前重要的异常信号^[2,6]。局部形变异常的提取通过应变方式比较有效,面膨胀参数直接反映了各个格网受到的挤压和拉张强弱程度,反映该区域的应变积累状态,可作为分析地震危险性的主要指标。

通过上面的震例分析我们发现,在5次地震发生之前的一段时间内,云南地区都或多或少的出现了一定数量的异常格网,但异常格网的数量存在一定的差异,腾冲 $M_s 5.2$ 、鲁甸 $M_s 6.5$ 、盈江 $M_s 5.6$ 、 $M_s 6.1$ 地震前多,洱源5.5相对较少。在地震发生前异常格网数量都经历了“出现—增多—减少”的动态变化的过程。从地震的震中位置和异常格网的分布状况来看,异常格网大部分均集中分布在震中附近区域,这对地震发震地点具有较好的指示意义,但5次地震震中都没有位于异常格网内,而是位于异常格网边缘,是否意味着地震更容易发生在异常变形区域的边缘地区,值得思考。

4 结论

本文通过对2011~2014年云南地区28个GPS连续站的点位资料进行深加工,获取面膨胀格网时间序列,对每个网格的面膨胀时间序列进行线性去趋势处理,设定二倍标准差作为异常阈值。以2011年6月20日腾冲 $M_s 5.2$ 级、2014年8月3日鲁甸 $M_s 6.5$ 级、2014年5月24、30日盈江 $M_s 5.6$ 、 $M_s 6.1$ 级和2013年3月

3日洱源 $M_s 5.5$ 级地震为样本,对地震孕育过程中面膨胀格网异常的空间分布和时间尺度的变化走势进行分析,主要形成以下认识:

(1) 5次地震前云南地区的面膨胀异常格网存在较大区域的动态变化,且震前面膨胀异常格网相对集中,因此,面膨胀异常格网分布相对集中的区域可作为未来地震发生地点的参考性指标;

(2) 从5次地震的震中位置和异常格网的分布状况来看,5次地震震中都没有位于异常格网内,而是位于异常格网边缘,这表明面膨胀异常区边缘可能更加危险。具体原因有待进一步的研究。

致谢: 本文所采用的GPS数据及数据分析软件来源于云南省地震局形变测量中心,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 皇甫岗,陈颀,秦嘉政,等.云南地震活动性[M].昆明:云南科技出版社,2010.
- [2] 邵德盛,洪敏,张勇,等.云南地区形变观测资料短临异常指标提取[J].武汉大学学报:信息科学版,2017,42(9):1223-1228.
- [3] 王伶俐,邵德盛,洪敏,等.云南省GPS基准站数据处理参考框架研究[J].地震研究,2012,35(4):449-454.
- [4] 洪敏,邵德盛,李春光,等.云南GPS基准站连续观测资料应用研究[J].地震研究,2012,35(4):535-539.
- [5] 杨建文,何应文,邵德盛,等.云南地区近期地壳活动特性及强震影响分析[J].大地测量与地球动力学,2018,38(7):748-753.
- [6] Min Hong, Desheng Shao, Tengfei Wu, et al. Short-Impending Earthquake Anomaly Index Extraction of GPS Continuous Observation Data in Yunnan, Southwestern China[J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(01):230-236.
- [7] 江在森,张希,张晶,等.地壳形变动态图像提取与强震预测技术研究[M].北京:地震出版社,2013.
- [8] 皇甫岗,陈勤,王彬,等.2014年云南鲁甸6.5级地震[M].昆明:云南科技出版社,2015.
- [9] 朱守彪,蔡永恩,石耀霖.青藏高原及邻区现今地应变率场的计算及其结果的地球动力学意义[J].地球物理学报,2005,48(5):1053-1061.
- [10] 陈小斌.中国陆地现今水平形变状况及其驱动机制[J].中国科学,2007,37(8):1056-1064.
- [11] 陆远忠,等.地震中短期预报的动态图像方法[M].北京:地震出版社,2001.
- [12] 洪敏,张勇,邵德盛,等.云南地区近期地壳活动特征[J].地震研究,2014,37(3):483-488.