

云南地区定点形变观测异常特征与地震预测研究^{*}

李智蓉¹, 付虹¹, 高华宴²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 云南省禄丰县地震局, 云南 禄丰 651299)

摘要: 对1966—2007年正式出版的《中国震例》中云南定点形变异常震例进行统计分析, 发现云南地区6级以上地震前均有形变异常, 且随着发震时间的逼近, 定点形变异常数量有增加趋势。对2000—2015年云南定点形变观测异常进行分析, 发现云南及其邻区6级以上地震发生前, 定点形变均有显著异常出现。当显著形变异常数量 $N \geq 2$, 1年内云南及其邻区发生6级以上地震的概率可达75%。6~6.5级地震震前形变异常分布的震中距最远为470 km, 7级地震达到700 km, 且具有震级越大分布范围越广的特征。因此, 形变异常台站数量可以作为云南及其邻区有6级以上地震的中短期预测指标。

关键词: 云南地区; 定点形变; 地震预测; 预测指标

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)01-0090-08

0 引言

定点形变观测作为前兆观测重要手段之一, 具有明确的物理意义, 在日常数据跟踪及地震危险性判定中发挥着重要作用, 许多学者也对定点形变的异常机理做过分析(罗桂安等, 1996; 卢艳清, 王贤仁, 1992; 张燕, 吴云, 2010; 王小平等, 2010)。1970年通海7.8级地震发生后, 云南省内发生多次5.0级以上地震, 积累了许多定点形变前兆异常资料, 在已出版的《中国震例》(张肇成等, 1988, 1990a, b, 1999, 2000, 2006; 陈棋福等, 2002a, b, 2003, 2008)中均有详细记录。许多学者对这些震例进行了再归纳, 并提取了基于震例分析的前兆异常统计特征。郑兆苾等(2006)以1986—1999年中国大陆地震震例为基础, 对中国大陆及其不同分区的测震和前兆异常进行了统计和分析; 蒋海昆等(2009)以1966—1999年中国大陆地震震例为基础, 得到中国大陆5.0级以上地震前兆异常综合特征。付虹等(2008)对1970年以来云南38组 $M \geq 5.0$ 地震震前异常进行了综合分析, 得到云南 $M \geq 5.0$ 地震的异常共性特征。前人的统计多为综合性分析, 而不同观测手段在不同

地区震前存在差异性, 因此本文从定点形变观测资料入手, 一方面对已有震例进行统计, 寻找能用于指导今后地震预测的共性特征, 另一方面结合2000年以来云南的定点形变观测异常与 $M \geq 6.0$ 地震, 更深入地分析震前定点形变异常特征。

1 基于1966—2007年震例形变异常的统计结果

1.1 震例资料选取及典型异常

基于1966—2006年正式出版的《中国震例》(张肇成等, 1988, 1990a, b, 1999, 2000a, b, 2006; 蒋海昆等, 2013)和2007年云南省震例总结报告^①, 对云南的定点形变异常进行统计研究, 该时间段内云南省内共发生5级以上地震41组, 有记录的定点形变异常83条。其中, 5.0~5.9级地震27组, 占全部地震的66%; 6.0~6.9级地震8次, 占20%; 7.0~7.9级地震6次, 占14%, 小震级地震多、大震级地震少, 符合地震活动总体规律。

根据异常形态特征将定点形变异常分为破年变、速率加大、矢量打结、其他(固体潮畸变, 相关系数降低)异常4类。各类典型异常形态特征如图1所示。

^{*} 收稿日期: 2016-07-21.

基金项目: 云南省地震局传帮带项目“云南前兆观测资料及在地震预报中的应用”(C2-2014002)和云南省地震局青年地震科学基金项目“云南地区断层活动协调比和定点形变异常在地震预测中的综合应用”(2017K06)联合资助。

^① 赵小艳, 朱荣欢, 苏有锦, 2007. 2007年6月3日云南省宁洱6.4级地震.

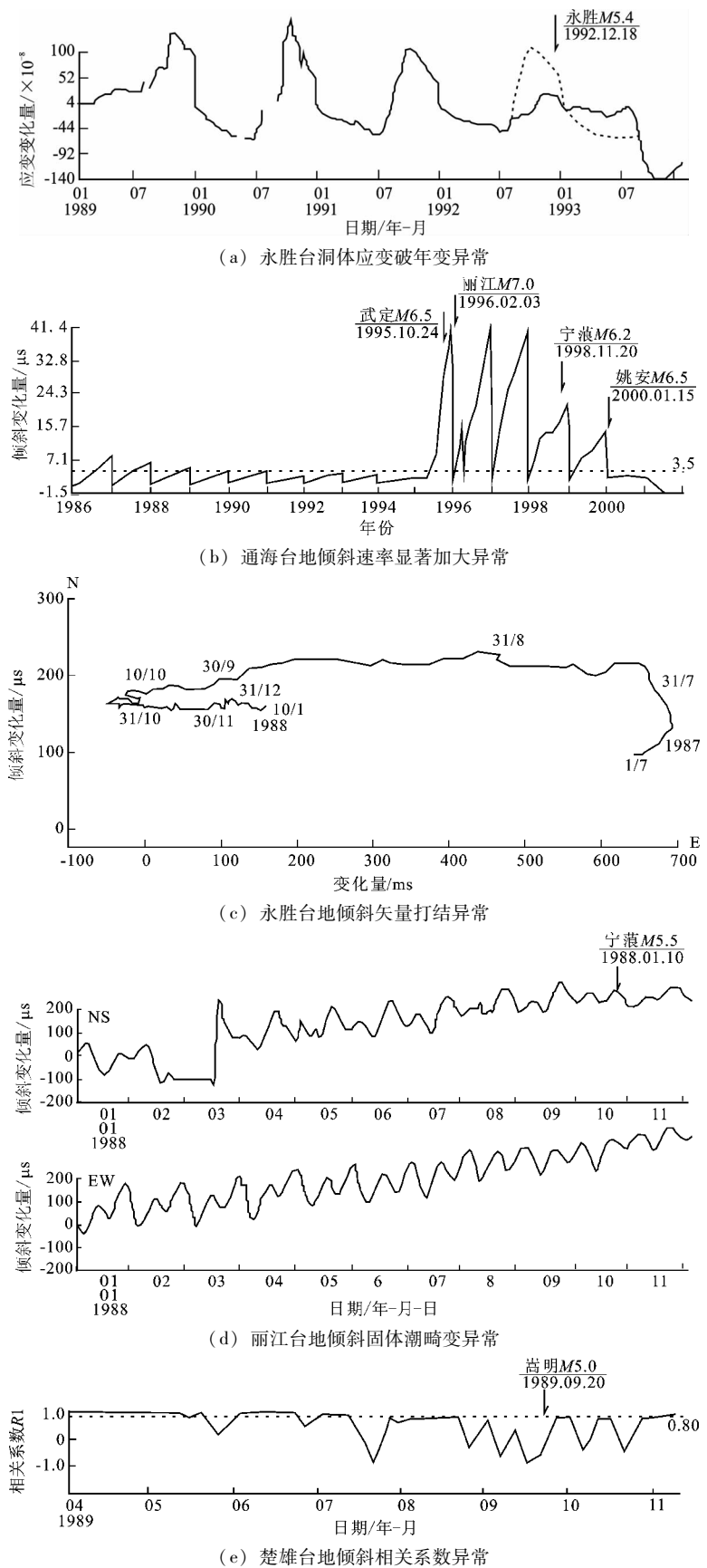


图 1 震前定点形变典型异常曲线

Fig. 1 Typical abnormal curves of fixed point deformation before earthquakes

1.2 不同震级范围形变前兆异常分布

不同震级前兆异常表现形式有可能存在差异,因此将所选取的 41 组地震按照不同的震级范围分别统计,具体见表 1。从表 1 可知,83 项定点形变

异常中,98% 为倾斜类异常,线应变异常仅为 2%。这与云南倾斜仪数量较多,且多年观测资料质量连续性较好有关。

表 1 不同震级档形变前兆异常分布

Tab. 1 Distribution of precursory deformation anomalies in different magnitudes

震级范围 (M)	地震次数	占总数比例	异常名称	异常对应地震次数	对应地震占地震数量比例	形变异常测项数目
5.0 ~ 5.4	20	49%	地倾斜	10	50%	15
5.5 ~ 5.9	7	17%	地倾斜	3	43%	5
6.0 ~ 6.4	5	12%	地倾斜、线应变	5	100%	16、1
6.5 ~ 6.9	3	7%	地倾斜、线应变	3	100%	22、1
7.0 ~ 7.4	4	10%	地倾斜	4	100%	18
≥7.5	2	5%	地倾斜	1	50%	5

1.3 异常数量、持续时间与震级的关系

从表 1 可知,并非所有地震前都可以观测到形变前兆异常,随着震级增大,出现异常的震例数未成线性增加趋势。5.0 ~ 5.9 级地震,对应形变异常的地震占地震总数的 50% 左右,6.0 ~ 7.4 级地震震前基本都可观测到形变异常。7.5 级以上地震只发生 2 次,其中,1970 年通海 7.8 级地震前周边没有形变观测台站;1988 年澜沧—耿马 7.6、

7.2 级地震震中靠近边境一带,没有在台站观测集中区,加之统计范围限定,所以 2 次 7.5 级地震震前统计到的异常数量较少。但将异常数量平均到每次地震,从平均异常数量与震级的关系可以看出(图 2a),除 7 级以上地震,平均异常数量总体上随震级增大有加速增长的趋势,这与 7 级以上地震多发生在远离台站集中区域,且研究范围限制有一定关系。

从图 2b 可见异常持续时间与震级未发现有明显关系,其中,6.5 ~ 6.9 级地震异常持续时间最长。

1.4 震级和前兆异常数量与震中距的关系

从图 3a 可见,6 级以上地震震前出现形变异常台站的震中距与震级有一定的相关性。5 级左右地震震中距变化与震级关系不明显,而 6 级以上地震随着震级增加,异常震中距成线性增加,即震级越高,异常分布范围越广。

将所研究震例的形变异常数量和出现异常的台站震中距进行统计(图 3b),发现 7 级以上大震前异常多出现在距震中较远的地区(> 300 km),5.5 ~ 6.9 级地震前异常集中在震中距 300 km 范围内,但基本没有震前预测能用的规律可循。

1.5 新出现异常频次与时间关系

对所研究的 41 组地震,将异常最新出现的时间(异常开始时间与发震时间间隔的天数)进行统计,统计新出现的异常数量与距离发震时间的关系,见图 4。从图中可以明显看出,异常出现时期多为中短期,且随着发震时间临近,异常频次逐渐增多,在震前 75 ~ 150 d 范围内达到顶峰,后逐渐减少。

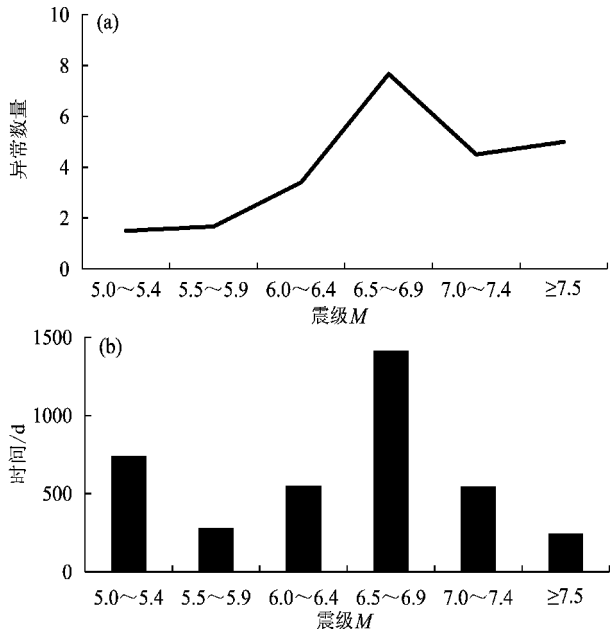


图 2 平均异常数量 (a)、异常持续时间 (b) 与震级的关系

Fig. 2 Relationship of the average abnormal frequency (a), abnormal maximum duration (b) and magnitude

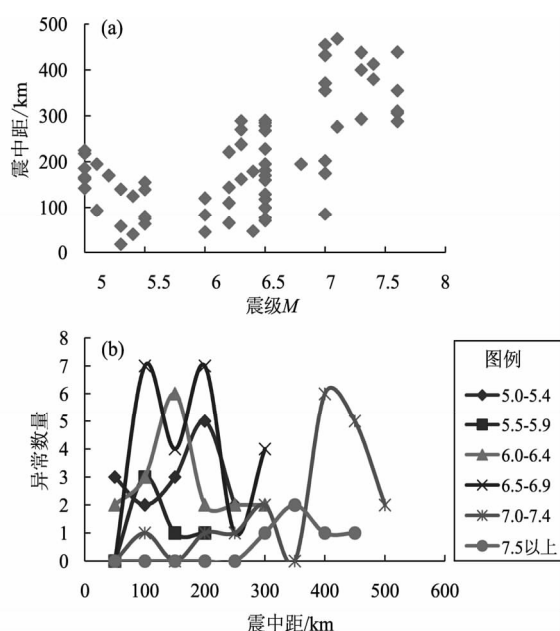


图3 震级 (a)、前兆异常数量 (b)
与震中距的关系

Fig. 3 Relationship of magnitude (a), the
number of precursory anomalies (b)
and epicentral distance

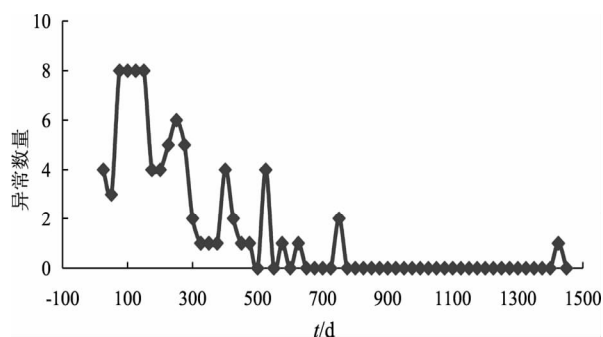


图4 新出现的异常数量与时间关系

Fig. 4 Relationship of emerging abnormal
frequency and time

1.6 异常形态分布

从图5中可看出,统计结果中各震级档地震异常形态并无明显区别。5.0~5.4级地震,形变速率加大类异常占总数的60%,而5.5~7.4级地震异常多以破年变为主。7.5级以上地震震例较少,且受异常统计范围限制,可能记录不完整,并未发现明显规律。

从以上震例总结结果可见,除随着发震时间的逼近,异常数量有显著增加外,其它的统计特征基本上不能用于指导震前预测。

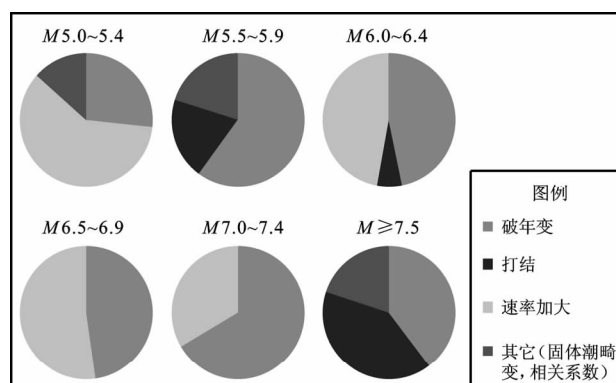


图5 各震级档形变前兆异常形态分布

Fig. 5 Distribution of deformation anomalies
morphology in different magnitude

2 云南定点形变异常特征与 $M \geq 6$ 地震关系

2000—2015年云南省地震局基于形变异常对多次6级以上地震进行过预测,因此对这些地震前形变异常图像进行时空扫描分析,有可能提取出异常的特征作为预测的依据。

2.1 显著异常特征分析

2000年初以来,云南定点形变观测资料出现多次异常,尤其是一些变化幅度较大的在日常跟踪中容易被识别的异常变化,如破年变加速等,与6级以上地震都有较好的相关性。

将趋势异常变化持续时间在1个月以上,变化幅度大于正常年变幅度2倍以上的异常称为显著异常。对云南所有定点形变观测资料进行全时空的异常提取,得到表2。图6给出了部分定点形变显著异常曲线。

图6a为2013年1月至2016年1月云龙台水管倾斜EW向变化情况。水管倾斜自2014年初加速西倾,7月速率减小恢复正常,最大变幅为 $380.81 \times 10^{-3}''$ 。图6b为2005年1月至2010年1月云龙台水管倾斜EW向变化情况。水管倾斜自2007年3月加速西倾,6月起速率减小,后转折东倾,最大变幅为 $1232.1 \times 10^{-3}''$ 。图6c为1993年1月至2006年1月弥渡台水管倾斜EW向变化情况。水管倾斜自2002年初加速东倾,在2003年大姚6.2级地震后速率减缓,最大变幅为 $1458.8 \times 10^{-3}''$ 。图6d为2009年1月至2016年1月勐腊

表 2 2000—2015 年云南定点形变显著异常表

Tab. 2 Significant fixed point deformation anomaly in Yunnan since 2000

测项	异常起始 日期	异常终止 日期	异常形态	后期地震	异常出现后 省内及周边 地区首发 6 级地震时间 间隔/d	异常出现 日期	首发地震 日期	发震所处 时段	震中距 /km
昆明洞体应变 EW	2014-06	2014-10	加速拉张	鲁甸 6.5 级地震	63	2014-06-01	2014-08-03	异常中	227
云龙水管倾斜 EW	2014-01	2014-07	大幅西倾	盈江 6.1 级地震	149	2014-01-01	2014-05-30	异常中	187
勐腊洞体应变 NE	2013-10	2015-03	持续拉张	景谷 6.6 级地震	371	2013-10-01	2014-10-07	异常中	234
勐腊洞体应变 NE	2010-03	2010-12	持续拉张	缅甸 7.2 级地震	388	2010-03-01	2011-03-24	异常结束后	200
楚雄洞体应变 NS	2012-09	2013-04	破年变加速拉张	芦山 7.0 级地震	231	2012-09-01	2013-04-20	异常结束后	610
楚雄洞体应变 EW	2015-03	2015-08	破年变, 年变 幅度减小	—	—	2015-03-01	—	—	—
丽江水管倾斜 NS	2010-04	2011-01	加速南倾	缅甸 7.2 级地震	357	2010-04-01	2011-03-24	异常结束后	680
丽江水管倾斜 EW	2013-01	2013-07	加速西倾	芦山 7.0 级地震	109	2013-01-01	2013-04-20	异常中	470
丽江洞体应变 NS	2013-01	2013-07	加速压缩	芦山 7.0 级地震	109	2013-01-01	2013-04-20	异常中	470
云县石英摆倾斜	1999-01	1999-12	大幅变化	姚安 6.5 级地震	379	1999-01-01	2000-01-15	异常结束后	160
楚雄水管倾斜 NS	1999-09	2000-04	加速北倾	姚安 6.5 级地震	136	1999-09-01	2000-01-15	异常中	76
楚雄洞体应变 EW	1999-07	1999-11	变幅大	姚安 6.5 级地震	186	1999-07-13	2000-01-15	异常结束后	76
永胜水管倾斜 EW	2001-09	2001-10	西倾速率大	永胜 6.0 级地震	27	2001-09-30	2001-10-27	异常结束后	45
丽江水管倾斜 EW	2001-07	2001-10	破年变西倾	永胜 6.0 级地震	116	2001-07-03	2001-10-27	异常结束后	83
弥渡石英管倾斜 EW	2002-10	2004-07	破年变大幅变化	大姚 6.2、6.1 级地震	293	2002-10-01	2003-07-21	异常中	100
弥渡石英管倾斜 NS	2002-10	2004-07	破年变大幅变化	大姚 6.2、6.1 级地震	293	2002-10-01	2003-07-21	异常中	100
云龙石英摆 EW	2002-03	2003-10	大幅东倾	大姚 6.2、6.1 级地震	507	2002-03-01	2003-07-21	异常中	186
云县石英摆倾斜 EW	2005-06	2006-12	破年变	宁洱 6.4 级地震	732	2005-06-01	2007-06-03	异常结束后	179
云龙水管倾斜 NS	2002-08	2004-08	大幅南倾	宁洱 6.4 级地震	1 767	2002-08-01	2007-06-03	异常结束后	355
勐腊洞体应变 NS	2008-10	2009-07	变化速率大	姚安 6.0 级地震	279	2008-10-03	2009-07-09	异常结束后	450
云县石英摆倾斜 EW	2008-04	2009-07	变化速率大	姚安 6.0 级地震	462	2008-04-03	2009-07-09	异常结束后	150
永胜水管倾斜 NS	2007-10	2008-04	南倾速率大	汶川 8.0 级地震	204	2007-10-21	2008-05-12	异常结束后	560
云龙水管倾斜 NS	2007-06	2007-12	南倾速率大	汶川 8.0 级地震	338	2007-06-09	2008-05-12	异常结束后	700
云龙水管倾斜 EW	2007-03	2007-09	西倾速率大	汶川 8.0 级地震	416	2007-03-23	2008-05-12	异常结束后	700
渔洞水平摆 NS	2014-01	2014-06	变化速率大	鲁甸 6.5 级地震	214	2014-01-01	2014-08-03	异常结束后	43
渔洞水平摆 EW	2014-01	2014-06	加速西倾	鲁甸 6.5 级地震	214	2014-01-01	2014-08-03	异常结束后	43

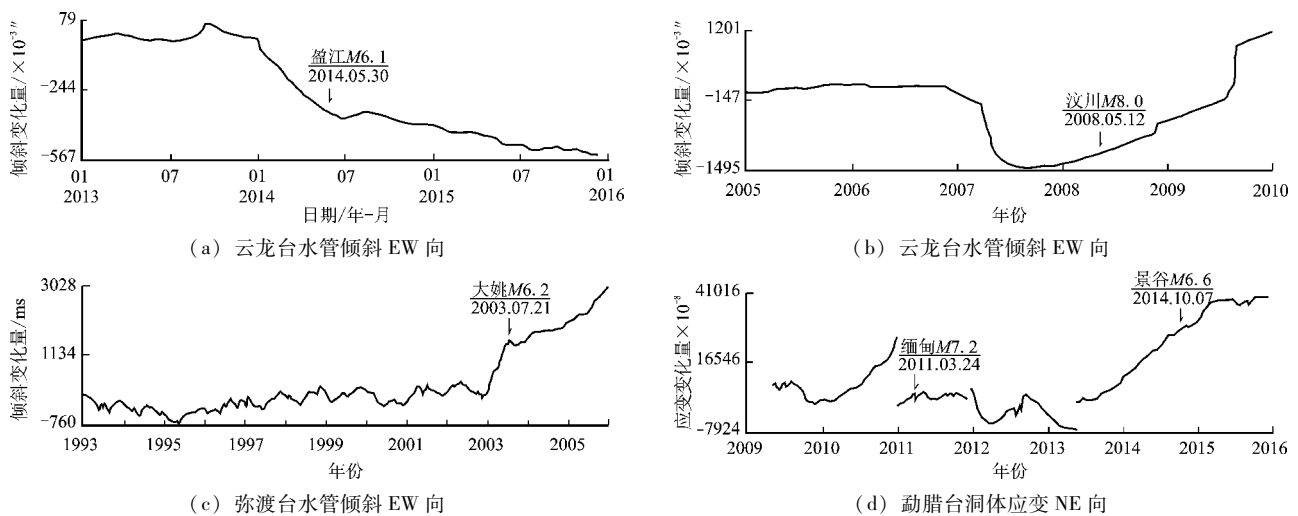


图 6 云南部分定点形变显著异常曲线

Fig. 6 Part of significant fixed point deformation anomaly curves in Yunnan

台洞体应变 EW 向变化情况。洞体应变自 2010 年 2 月加速拉张,直至 2011 年调仪器后恢复正常,而后发生缅甸 7.2 级地震,最大变幅为 $21\,400.5 \times 10^{-8}$ 。2013 年 10 月又发生一次加速拉张,拉张过程中发生景谷 6.6 级地震,震后持续拉张至 2015 年 2 月变缓,最大变幅为 $34\,507.85 \times 10^{-8}$ (2010 年及 2013 年断数部分为调仪器干扰)。

2.2 异常的群体特征与 $M \geq 6$ 地震

2000—2015 年,云南定点形变共观测到 26 个测项显著异常,异常持续时间均为 1 个月以上,异常形态均为破年变和加速变化。对表 2 给出的异常

进行汇总分析,单个测项出现显著异常记为 1,按月累计异常数量,结果如图 7 所示。2000 年初以来云南及其邻区 6 级以上地震发生前,定点形变均观测到显著异常。异常出现后,云南及其邻区首发 6 级以上地震时间间隔最短为 27 d,最长为 1 767 d,有 88% 的地震发生在 2 年以内 (楚雄 EW 向洞体应变异常暂时未对应地震,统计未算入其中)。如果以 1 年为尺度,出现异常后 1 年内发生地震为对应,1 年内无震为虚报。则 2000 年以来异常可以分为 12 组,其中有 9 组地震在 1 年内发生,地震对应率达到 75%。

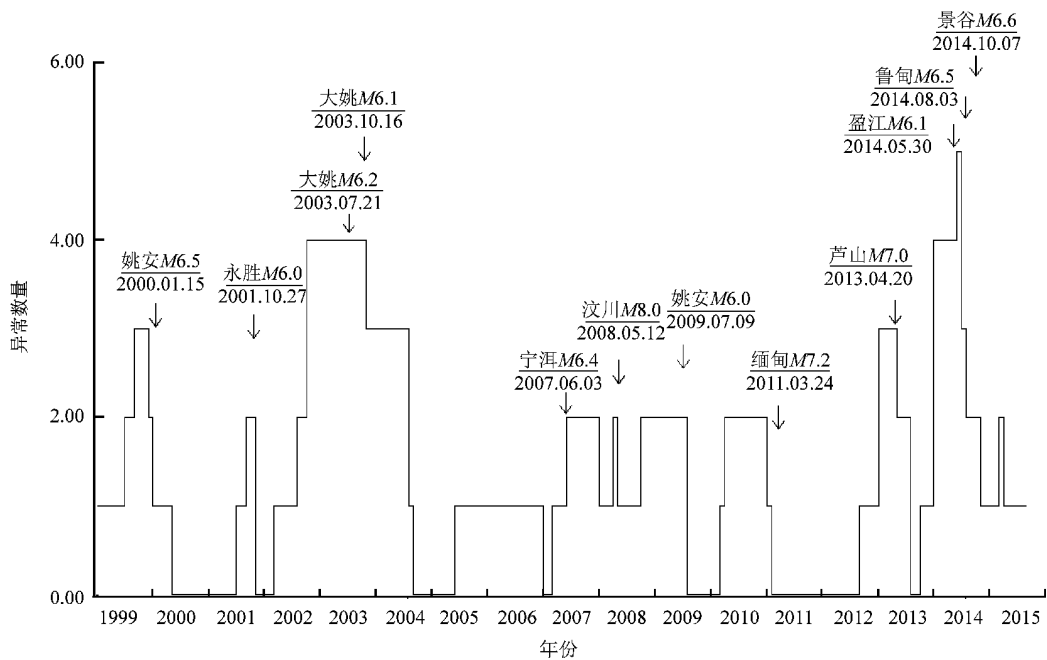


图 7 形变显著异常数量与 6 级以上地震的对应关系图

Fig. 7 Correspondence map of deformation significant abnormality frequency and $M \geq 6$ earthquakes

根据表 2 作震级和震中距关系图,从图 8 可见,6 ~ 6.5 级地震异常集中分布在 300 km 内,最远的是 470 km;而 7 ~ 8 级地震异常主要分布在 500 ~ 700 km,500 km 内没有异常。其主要原因为 2000 年初以来云南境内没有 7 级以上地震,震中附近没有观测点。

总体来看,震级越大,异常分布范围越广。6 ~ 6.5 级地震异常分布的震中距可达 470 km,7 级地震可达到 700 km,异常分布比原来震例总结得到的 6 级地震异常分布震中距为 300 km,7 级地震 500 km 要范围大,这主要反映了震例统计的范围增大。

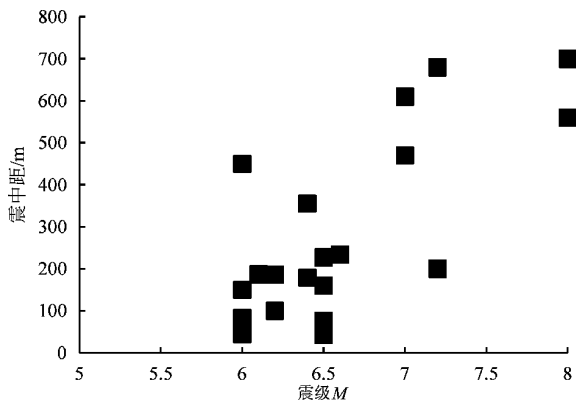


图 8 显著异常震中距—震级关系示意图

Fig. 8 Relationship map of epicentral distance of significant abnormality and magnitude

3 结论与讨论

通过对 1966—2007 年正式出版的《中国震例》中云南定点形变异常震例以及 2000 年初以来云南定点形变观测异常进行分析,得到以下认识:

(1) 云南定点形变观测出现大幅度的显著异常与云南及其邻区 6 级以上地震有一定的相关性。当定点形变有 2 项以上的观测出现大幅度异常,云南及其邻区一年内发生 6 级以上地震的概率可以达到 9/12。且 2000—2015 年,云南地区所有 6 级以上地震发生前,定点形变均有显著异常出现,如果把异常数量 $N=2$ 作为阈值,所有 6 级以上地震前,群体异常均达到预测判别指标。

(2) 基于 1966 年初以来震例总结得到的结果显示,随着发震时间的逼近,异常数量逐渐增加,但临震前有可能减少;2000—2015 年异常数量曲线也显示,6 级以上地震发生前半年内异常数量开始增加,因此异常数量的增多也可以作为预测 6 级地震的中短期预测判据。

(3) 从震级和震中距离的统计情况看,无论是从 1970—2007 年震例总结得到的结果,还是近年来显著异常的结果,均显示震级越大,异常分布范围越广。按照 6 级地震异常分布震中距 300 km,7 级地震异常分布震中距 500 km 进行震例总结的,如果震例总结的结果因为范围的限制不能真实反映场上的异常,则全时空的研究是更接近真实的。其异常的范围比震例总结给出的大,6~6.5 级地震异常分布震中距达到了 470 km,7 级地震达到 700 km。

(4) 云南及其邻区 6 级以上地震前均出现显著定点形变观测异常,表明 6 级以上地震前有可能存在地壳变形异常现象,这种变形范围相对于震源区的范围大得多。形变异常与地震都是区域应力水平增加的结果(陈立德,付虹,2003),当块体受力

后,变形区域应以整个构造块体为主体,这种状态下异常范围较大也就可以得到很好的解释。

参考文献:

- 陈立德,付虹. 2003. 地震预报基础与实践[M]. 北京:地震出版社.
- 陈棋福,郑大林,车时,等. 2002a. 中国震例(1992~1994)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈棋福,郑大林,刘桂萍,等. 2002b. 中国震例(1995~1996)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈棋福,郑大林,高荣胜,等. 2003. 中国震例(1997~1999)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈棋福,郑大林,车时,等. 2008. 中国震例(2000~2002)[M]. 北京:地震出版社.
- 付虹,李永莉,赵小艳,等. 2008. 云南 $M \geq 5$ 级地震震前异常的统计特征[J]. 地震研究,31(4):335-339.
- 蒋海昆,付虹,杨马陵,等. 2013. 中国震例(2003~2006)[M]. 北京:地震出版社.
- 蒋海昆,苗青壮,吴琼,等. 2009. 基于震例的前兆统计特征分析[J]. 地震学报,31(3):245-259.
- 卢艳清,王贤仁. 1992. 澜沧——耿马大震的短临形变特征[J]. 内陆地震,6(4):377-382.
- 罗桂安,宋治平,梅世蓉,等. 1996. 1974 年永善 7.1 级地震活动异常特征及其机理探讨[J]. 地震研究,19(1):1-8.
- 王小平,尹京苑,倪友忠,等. 2010. 上海定点形变异常特征及机理分析[J]. 大地测量与地球动力学,30(增刊1):50-61.
- 张燕,吴云. 2010. 2008 年汶川地震前的形变异常及机理解释[J]. 武汉大学学报·信息科学版,35(1):25-29.
- 张肇成,罗兰格,李海华,等. 1988. 中国震例(1966~1975)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇成,罗兰格,李海华,等. 1990a. 中国震例(1976~1980)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇成,罗兰格,李海华,等. 1990b. 中国震例(1981~1985)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇成,郑大林,徐京华,等. 1999. 中国震例(1986~1988)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇成,郑大林,徐京华,等. 2000. 中国震例(1989~1991)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇成,郑大林,徐京华,等. 2006. 中国震例(1989~1991)[M]. 北京:地震出版社.
- 郑兆苾,张国民,何康,等. 2006. 中国大陆地震震例异常统计与分析[J]. 地震,26(2):29-37.

Research on Anomalous Characteristics of Fixed Point Deformation and Earthquake Prediction in Yunnan Region

LI Zhirong¹, FU Hong¹, GAO Huayan²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Lufeng County, Yunnan Province, Lufeng 651229, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, statistical analysis of the fixed point deformation anomalies collected in official publication of the Earthquake Cases in China from 1966 to 2007 in Yunnan was carried out. The results showed that there were deformation anomalies before $M_s \geq 6$ earthquakes in Yunnan region. With the time approaching an earthquake, the number of fixed point deformation anomalies show increasing trend. Then we analyzed the fixed point deformation observation anomalies since 2000 in Yunnan. The results showed that the fixed point deformation shows significant anomalies before $M_s \geq 6$ earthquakes in Yunnan and its surrounding area since 2000. When the number of significant deformation anomalies is $N \geq 2$, the occurrence probability of $M_s \geq 6$ earthquakes may reach 75% in Yunnan and its surrounding areas in one year. The distribution of deformation anomalies before the $M6 \sim 6.5$ earthquakes as far as 470 km, $M7$ earthquake reached 700 km, which shows the characteristics of the larger magnitude, the wider distribution. Therefore, the number of deformation abnormal stations can be used as short and medium term predictor of $M_s \geq 6$ earthquakes in Yunnan and its surrounding area.

Keywords: Yunnan region; fixed point deformation; earthquake predictor; predictor indicator