

薛艳,洪敏,余怀忠,等. 2025. 川滇地区强震短临综合预测研究[J]. 地震研究, 48(2): 272–280, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0029.

Xue Y, Hong M, Yu H Z, et al. 2025. Research on comprehensive short-term and imminent prediction of strong earthquakes in Sichuan–Yunnan region[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 272–280, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0029.

## 川滇地区强震短临综合预测研究\*

薛艳<sup>1</sup>, 洪敏<sup>2</sup>, 余怀忠<sup>1\*</sup>, 姜祥华<sup>1</sup>

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 梳理了2013年以来川滇地区11次(10组)强震前短临阶段测震学和地球物理观测异常, 在对这些异常进行预测效能检验的基础上, 依据权重赋值规则, 对异常进行权重赋值。在此基础上, 使用权重集成法计算这些强震前的综合权重集成 $P_z$ 值, 得到了川滇地区3个重点区域(川滇交界东部、云南西北和云南西南地区)6级左右和7级左右地震的权重集成临界值, 可作为短临预测的参考依据。根据宏、微观异常报告, 计算2020—2023年3个重点区域每个月的 $P_z$ 值。结果显示, 6级以上地震主要发生在 $P_z$ 值的峰值点或快速增加的过程中, 少数地震发生在高值后的降低过程中。权重集成 $P_z$ 值可以对群体异常进行定量描述, 有助于短临预测决策由定性向定量发展。

**关键词:** 短临综合预测; 权重集成法; 强震; 川滇地区

**中图分类号:** P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2025)02–0272–09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2025.0029

## 0 引言

1966年河北邢台7.2级地震后, 中国开始了有组织的地震预报实践, 建立了长、中、短临相结合的渐进式地震预报会商体系。自20世纪70年代以来, 中国地震局每年召开全国地震趋势会商会, 进行年度中期预报, 确定年度地震重点危险区。在此基础上, 对年度地震重点危险区开展月、周短临跟踪。特别是月会商, 要根据地震活动和各种地球物理观测资料的动态变化, 依据测震学、地壳形变、电磁和地下流体四大学科总结的短临预测指标, 结合震例类比定性给出研判意见(邵志刚等, 2024)。为了将综合研判从定性走向定量, 学者们进行了多种尝试, 如邓世广等(2019)基于泊松分布计算预测区域的背景地震概率和单项预测方法的历

史预测效能, 采用贝叶斯定理计算单项预测方法的短期或年度地震危险概率, 进而采用综合概率方法, 给出基于多种单项预测方法的短期或年度地震危险概率预测结果; 何畅等(2022)基于贝叶斯概率推导出单个指标出现异常后强震发生的后验概率, 在此基础上使用联合概率计算多项指标出现异常后的综合概率, 并对四川地区2013年芦山7.0级、2014年康定6.3级和2019年长宁6.0级地震进行了回溯性研究; 钱晓东和贺素歌(2024)挑选了6项测震学异常指标, 首先计算每种指标的概率增益, 再考察某个时段6项异常指标出现情况(例如存在2项或4项), 利用贝叶斯公式计算综合概率 $P$ 值, 由此得到了 $P$ 值随时间的变化曲线, 用来预测云南地区未来中短期发生6级以上地震的可能性; 陈立德(1993)提出了权重集成法, 即首先根据各单项异常的历史预报效能计算其权重值, 并据此建立权重集

\* 收稿日期: 2024–07–02.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 国家重点研发计划(2018YFE0109700); 震情跟踪项目(2023020503).

第一作者简介: 薛艳(1969–), 正研级高工, 主要从事地震活动性和地震综合预测研究.

E-mail: xueyan5619@seis.ac.cn.

✉ 通信作者简介: 余怀忠(1975–), 研究员, 主要从事地震孕育机理和预测理论研究. E-mail: yuhz750216@sina.com.

成方程。依据该方程采用历史回代法求权重集成  $P$ , 最后根据历史上对应有震的权重集成的最小值和对应无震的最大值, 求出权重集成值的临界阈值  $P_0$ 。当  $P \geq P_0$  时作有震预报, 否则作无震预报。该方法简单、直观、综合性较强。

川滇地区位于青藏高原东南缘, 构造运动强烈, 是我国大陆地区强震最为频繁的地区之一。该区测震与地球物理观测台站众多, 测震学、地下流体、地壳形变和地电电磁异常数量较多, 特别是在强震前的短期阶段, 异常数量呈显著增多的特点 (蒋海昆等, 2009)。为了突出强震前异常的群体特征, 本文拟使用权重集成法 (陈立德, 1993) 研究川滇地区地震短临综合预报, 以为短期综合预报提供定量化的判定依据。

## 1 计算方法

首先对每项异常进行预测效能检验, 采用两种方法, 分别为  $R$  值检验 (许绍燮, 1989) 和异常对应率检验。首先进行  $R$  值检验, 计算公式为:

$R = \text{报对的地震次数} / \text{应预报的地震总次数} - \text{预报占用时间} / \text{预报研究的总时间}$  (1)

当  $R \geq R_0$  时, 异常通过检验。其中  $R_0$  为具有置信度 97.5% 的  $R$  值。当异常不能通过  $R$  值检验时, 再进行异常对应率检验, 异常对应率为:

$$\alpha = \frac{N'}{N} \quad (2)$$

式中:  $N$  为异常出现的总次数;  $N'$  为对应地震的异常次数。例如, 共出现 10 次异常, 其中 7 次异常对应了地震, 对应率  $\alpha = 7/10 = 0.7$ 。当异常对应率  $\alpha \geq P_b$  时, 异常通过检验。其中  $P_b$  为背景概率, 可采用稳态泊松过程进行计算, 公式如下:

$$P_b = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为地震发生率, 即单位时间内发生地震的次数;  $t$  为预报时窗长度。在效能检验的基础上, 进行加权综合。

首先, 定义测震学权重集  $S$  为某一个时刻出现在预测区域的测震学异常的权重之和:

$$S = \sum_{i=1}^m P_i \quad (4)$$

式中:  $m$  为测震学异常总数;  $P_i$  为第  $i$  个测震学异常的权重, 分 3 种情况取值, 具体为:

①  $P_i = 0.1 + 2(R_i - R_{0i})$  (预报效能采用  $R$  值评估, 通过预测效能检验);

②  $P_i = 0.1 + 2(\alpha_i - P_{bi})$  (当不能通过  $R$  值检验时, 采用异常对应率检验, 且能够通过检验);

③  $P_i = 0.1$  (异常未通过  $R$  值检验, 同时也未通过异常对应率检验, 权重取值 0.1)。

为了将所有异常都利用起来, 也对不能通过效能检验的异常进行了加权, 权重为 0.1。考虑到部分地球物理异常观测时间短, 震例少, 故本文约定不对地球物理异常进行异常对应率检验。

定义地球物理异常权重  $G$  为某一时刻出现在预测区域及附近的地球物理异常的权重之和:

$$G = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5)$$

式中:  $n$  为地球物理异常总数;  $P_j$  为第  $j$  个地球物理观测异常权重, 分两种情况取值, 具体为:

①  $P_j = 0.1 + 2(R_j - R_{0j})$  (通过  $R$  值预测效能检验);

②  $P_j = 0.1$  (未通过  $R$  值预报效能检验的异常, 权重取值 0.1)。

定义预测区域的地震综合权重集成如下:

$$P_z = S + G \quad (6)$$

## 2 震例研究

2013 年以来川滇地区及其边境附近共发生 11 次  $M_s \geq 5.9$  地震, 其基本参数见表 1, 空间分布如图 1 所示。其中震源机制解数据来源于全球 CMT 目录<sup>①</sup>。由图 1 可见, 在 11 次地震中, 2 次为逆冲型, 发生在龙门山断裂带, 其余 9 次为走滑型。

① <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

表 1 2013 年以来川滇地区  $M_s \geq 5.9$  地震基本参数

Tab. 1 Earthquake catalogue and source parameters of the  $M_s \geq 5.9$  earthquakes since 2013 in Sichuan-Yunnan region

序号	发震日期	震中位置		$M_s$	节面 I	节面 II	发震地点
		$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$		走向/倾向/倾角/ $(^\circ)$	走向/倾向/倾角/ $(^\circ)$	
1	2013-04-20	30.30	103.00	7.0	212/42/100	19/49/81	四川芦山
2	2014-05-30	25.00	97.80	6.1	82/79/5	351/85/169	云南盈江
3	2014-08-03	27.10	103.30	6.5	71/81/-175	340/86/-9	云南鲁甸
4	2014-10-07	23.40	100.50	6.6	329/81/174	60/84/9	云南景谷
5	2014-11-22	30.30	101.70	6.3	143/85/-1	233/89/-175	四川康定
6	2018-09-08	23.28	101.53	5.9	126/80/-178	36/88/-10	云南墨江
7	2021-05-21	25.67	99.87	6.4	45/80/7	314/83/170	云南漾濞
8	2021-12-24	22.33	101.69	6.0	124/85/-179	34/89/-5	老挝
9	2022-06-01	30.37	102.94	6.1	217/45/103	19/46/78	四川芦山
10	2022-06-10	32.25	101.82	6.0	323/82/-5	54/85/-172	四川马尔康
11	2022-09-05	29.59	102.08	6.8	164/78/7	73/83/167	四川泸定

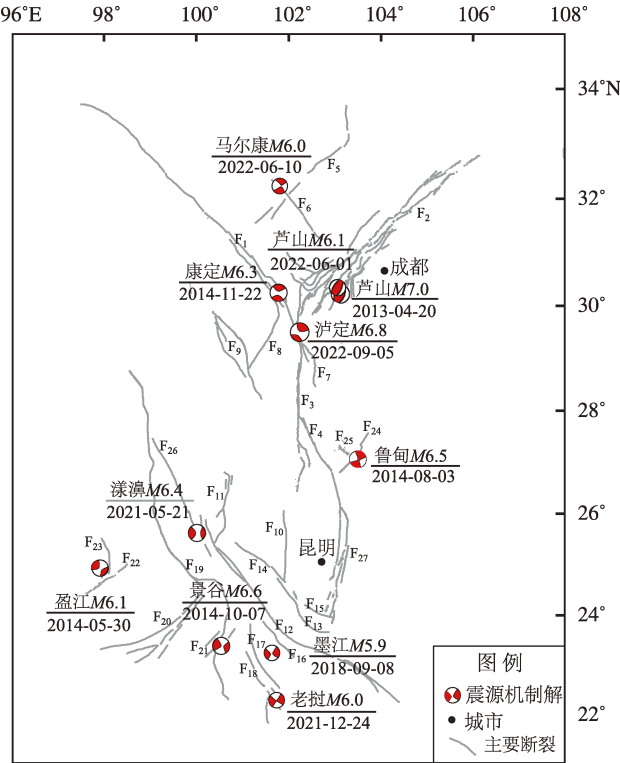


图 1 2013 年以来川滇地区  $M_s \geq 5.9$  地震震源机制解示意图

Fig. 1 The spatial distribution of focal mechanism solution types of the  $M_s \geq 5.9$  earthquakes since 2013 in Sichuan-Yunnan region

这些地震主要分布在三岔口（龙门山断裂带、鲜水河断裂带与安宁河断裂带的交会区域附近）至川滇交界东部（以下简称“川滇交界东部”）、云南西南地区 and 云南西北地区。

限于篇幅，本文以 2022 年四川泸定  $M_s 6.8$ 、2021 年云南漾濞  $M_s 6.4$ 、2013 年四川芦山  $M_s 7.0$  和 2014 年云南盈江  $M_s 6.1$  地震为例，介绍权重集成  $P_z$  值的计算过程。

2.1 2022 年 9 月 5 日四川泸定  $M_s 6.8$  地震

泸定  $M_s 6.8$  地震发生在川滇交界东部地区，发震断裂为鲜水河断裂带莫西段，为左旋走滑型破裂（易桂喜等，2023）。表 2 列出了该地震前存在的短期（3 个月内）、中短期（6 个月内）异常及部分趋势异常的预测三要素、预测效能以及其权重  $P$  值。需要说明的是，一些趋势异常随着时间的演化，具有中短期或短期指示意义。例如表 2 中滇黔桂少震区  $M_L \geq 4.0$  地震年频次异常，虽然该异常的预测时间为 1 年，但由于泸定  $M_s 6.8$  地震发生前，该异常已经持续了 350 余天，因此具有短期预测意义。本文约定热红外趋势和短期异常配套使用，即由于青藏高原热红外低值异常预测时间较长，单独出现后不进行加权计算，只有当川滇块体或巴颜喀拉地块出现热红外短期异常后，才一起参与计算。由表 2 可以看出，泸定地震前，川滇地区震群频次、余震区活跃和滇黔桂少震区出现异常，这 3 项异常预测的区域为整个川滇地区。此外，作为边界动力源的羌塘地块发生显著地震（邵志刚等，2024）。电磁、形变和流体异常

表2 2022年四川泸定6.8级地震前测震学和地球物理观测异常及其权重

Tab. 2 Anomalies of the earthquake activity and the geophysical observation and their weights before the 2022 Luding, Sichuan  $M_s$  6.8 earthquake

序号	异常名称	预测三要素			预测效能检验	权重值 $P$
		时间	地点	强度		
1	川滇地区 $M_L \geq 3.0$ 震群频次	3个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	$R = 0.41, R_0 = 0.38$	0.16
2	川滇地区余震区活跃	3个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
3	四川盆地中北部 $M_L \geq 4.0$ 显著地震	6个月	四川及邻区	$M_s \geq 6.0$	$R = 0.51, R_0 = 0.36$	0.4
4	川滇藏地区4级地震空区被打破, 发生马尔康6.0级震群	3个月	空区内部及边缘	$M_s \geq 6.7$	$R = 0.40, R_0 = 0.29$	0.32
5	$M_L \geq 3.5$ 地震空区打破后空区内部及边缘活跃	4个月	空区内部及边缘	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
6	川滇藏地区4级地震空区演化与1973年炉霍7.6级地震前类似(马尔康6.0级震群后四川及周边 $M_L \geq 4.0$ 地震平静)	4个月	空区内部	7级左右	—	0.1
7	马尔康震群(1970年以来川滇5.5级以上震群与后续6.5级以上地震统计)	140天	川滇地区	$M_s \geq 6.5$	对应率: $4/12 = 0.33$ 背景概率: 0.17	0.42
8	芦山6.1级地震(统计1900年以来龙门山断裂带6级以上地震后半年内四川地区发生6级以上地震, 不考虑余震)	6个月	四川地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
9	滇黔桂少震区 $M_L \geq 4.0$ 地震年频次异常	1年	川滇地区	7级左右	$R = 0.32, R_0 = 0.23$	0.28
10	2022年8月14日杂多5.9级地震(羌塘地块显著地震)	3个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
11	南北地震带大范围 $M_s \geq 4.0$ 地震平静	3个月	平静区内部	$M_s \geq 6.5$	$R = 0.19, R_0 = 0.14$	0.3
12	理塘爆发震群	2.5个月	四川及邻区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
13	江油地电阻率	3个月	台站周边300 km范围内	6级左右	$R = 0.49, R_0 = 0.42$	0.24
14	甘孜地电阻率	3个月	—	—	$R = 0.32, R_0 = 0.32$	0.1
15	冕宁地电阻率	6个月	—	—	—	0.1
16	祥云电场优势方位角	6个月	—	—	$R = 0.20, R_0 = 0.18$	0.14
17	中江 GNSS	1.5个月	台站周边100 km范围内	5~6级	—	0.1
18	水富水平摆、礼州测距、龙灯坝测距、耿达和西岭水准	6个月	川滇交界东部	6级左右	—	0.5
19	乡城大泉、中泉水温、丹波村二氧化碳、盐津水位、芦山川47井水温、巧家二氧化碳、玉树水温	3个月	川滇交界东部	5~6级	—	0.7
20	青藏高原热红外低值异常	1.3年	青藏高原东部	$M_s \geq 6.8$	$R = 0.52, R_0 = 0.40$	0.34
21	川滇块体热红外异常	3个月	川滇块体及附近	$M_s \geq 6.4$	$R = 0.40, R_0 = 0.34$	0.22
22	2022年7—8月四川及邻区新增异常数量增多	3个月	四川及邻区	—	—	0.1
综合权重集成 $P_z$ 值				5.0		

具有配套性,且在发生了2022年6月1日四川芦山  $M_s$  6.1和6月10日马尔康  $M_s$  6.0地震后,四川及邻区异常数量仍在增多(薛艳等,2022;解滔等,2023)。泸定地震的综合权重集成  $P_z = 5.0$ 。

## 2.2 2021年5月21日云南漾濞 $M_s$ 6.4地震

漾濞  $M_s$  6.4地震发生在云南西北部地区,发震断裂为维西—乔后—巍山断裂中段附近的次级断裂,震源机制解为走滑型(王月等,2021),该地震序列为前震—主震—余震型,但是前震在主震前没有被识别,而是作为前兆震群异常(宋俊高等,1989;付虹等,2021)。表3列出了该地震

前存在的短期和中短期异常的预测意义、效能检验和权重  $P$  值。该地震前测震学异常比较突出,包括云南地区5级地震平静、滇西北地区  $M_L \geq 4.0$  地震平静被2021年3月1日洱源  $M_L$  4.1地震打破、 $M_s \geq 3.0$  地震条带等;地球物理观测异常方面,与以往该区6级以上地震相比,云南地区的流体异常不突出,而四川毛垭温泉在漾濞  $M_s$  6.4地震前接连出现2次短期异常,比较突出。漾濞地震前还存在红格地电阻率中短期异常及巧家和永善电磁波短期异常。表3显示,漾濞地震的综合权重集成  $P_z$  为3.2。

表 3 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震前测震学和地球物理观测异常及其权重  
Tab. 3 Anomalies of the earthquake activity and the geophysical observation and their weights  
before the 2021 Yangbi, Yunnan  $M_s6.4$  earthquake

序号	异常名称	预测三要素			预测效能检验	权重值 $P$
		时间	地点	强度		
1	云南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震平静	3 个月	云南地区	$M_s \geq 5.5$	$R = 0.13, R_0 = 0.06$	0.24
2	小滇西至川滇交界东部地区 $M_s \geq 3.0$ 地震条带	3 个月	条带上及边缘	$M_s \geq 5.5$	$R = 0.46, R_0 = 0.30$	0.42
3	滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震平静打破	3 个月	滇西北	$M_s \geq 5.5$	条件概率: 0.35 自然概率: 0.28	0.24
4	震前 1 个月快速形成 NE 走向 $M_L \geq 3.0$ 地震条带	3 个月	条带上及边缘	6 级左右	—	0.1
5	2021 年 3 月 19 日比如 $M_s6.1$ 地震 (羌塘地块显著地震)	3 个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
6	漾濞 4.4 级前兆震群	3 个月	滇西北及附近	6 级左右	—	0.2
7	巧家和永善电磁波	3 个月	川滇交界	$M_s \geq 5.0$	—	0.2
8	红格地电阻率	6 个月	台站附近 300km 范围内	6 级左右	—	0.1
9	施甸水汞、洱源水温、乡城大泉和中泉水温、龙陵水温、流量、水氡	3 个月	滇西北及附近	$M_s \geq 5.0$	—	0.9
10	理塘毛垭水温	3 个月	川滇交界西部	$M_s \geq 5.7$	$R = 0.61, R_0 = 0.52$	0.28
11	川滇块体热红外异常	3 个月	川滇块体	$M_s \geq 6.4$	$R = 0.40, R_0 = 0.34$	0.22
12	云南宏观异常	3 个月	云南地区	$M_s \geq 5.5$	$R = 0.32, R_0 = 0.24$	0.26
综合权重集成 $P_Z$ 值				3.2		

2.3 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M_s7.0$  地震 变异常特别突出。2013 年 1 月 30 日共新增 16 项跨  
芦山  $M_s7.0$  地震发生在龙门山断裂带南段,震 断层异常,其中 3 项为短期异常 (表 4 中第 8 条),  
源机制解为逆冲型 (吕坚等, 2013)。震前跨断层形 13 项为中短期异常 (表 4 中第 9 条), 这些异常

表 4 2013 年四川芦山  $M_s7.0$  地震前测震学和地球物理观测异常及其权重  
Tab. 4 Anomalies of the earthquake activity and the geophysical observation and their weights  
before the 2013 Lushan, Sichuan  $M_s7.0$  earthquake

序号	异常名称	预测三要素			预测效能检验	权重值 $P$
		时间	地点	强度		
1	川滇地区 $M_L \geq 3.0$ 震群频次	3 个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	$R = 0.41, R_0 = 0.38$	0.16
2	川滇地区余震区活跃	3 个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
3	四川盆地中北部 $M_s \geq 4.0$ 显著地震	6 个月	四川及邻区	$M_s \geq 6.0$	$R = 0.51, R_0 = 0.36$	0.4
4	四川地区 $M_s \geq 5.0$ 地震平静	6 个月	四川地区	$M_s \geq 6.0$	$R = 0.66, R_0 = 0.26$	0.9
5	2012 年 8 月 12 日于田 6.2 级地震 (阿尔金断裂西南端 6 级以上地震统计)	300 天	南北带中段	$M_s \geq 6.5$	$R = 0.56, R_0 = 0.56$	0.1
6	滇黔桂少震区 $M_L \geq 4.0$ 地震年频次异常	310 天	川滇地区	$M_s \geq 6.8$	$R = 0.32, R_0 = 0.23$	0.28
7	川滇地区 $M_s \geq 4.0$ 地震活跃 (4 天发生 6 次 4 级地震)	3 个月	川滇地区	$M_s \geq 6.0$	—	0.1
8	跨断层短期异常: 龙灯坝、老乾宁和汤加坪跨断层基线	3 个月	三岔口附近	$M_s \geq 6.0$	—	0.3
9	跨断层中短期异常: 侏倭、格筈、虚墟基线, 恰叫、沟普、紫马垮水平蠕变, 虚墟水准、棉蟹水准、西昌水准、尔乌水准、汤家坪水准、双河水准、宝兴水准	6 个月	三岔口附近	$M_s \geq 6.0$	—	1.3
10	康定龙头沟温泉水温、鲁甸水氡、盐津 $CO_2$ 、鲁甸碳酸氢根	3 个月	四川地区	—	—	0.4
11	青藏高原热红外低值异常	1.3 年	青藏高原东部	$M_s \geq 6.8$	$R = 0.58, R_0 = 0.40$	0.46
12	川滇块体热红外增强异常	3 个月	川滇块体及附近	$M_s \geq 6.4$	$R = 0.40, R_0 = 0.34$	0.22
13	巴颜喀拉块体热红外增强异常	3 个月	巴颜喀拉块体东部及附近	$M_s \geq 7.0$	$R = 0.80, R_0 = 0.52$	0.66
综合权重集成 $P_Z$ 值				5.4		

主要沿鲜水河断裂带、安宁河—则木河与龙门山断裂带分布（杜芳等，2019）。此外，青藏高原、巴颜喀拉地块和川滇块体在该地震前均出现热红外异常（Yang *et al.*, 2023），地震发生于青藏高原热红外低值异常结束后 115 天、巴颜喀拉地块异常开始后 2 个月、川滇块体异常开始后 1.5 个月。表 4 显示，芦山  $M_s7.0$  地震的综合权重集成  $P_z$  值为 5.4。

2.4 2014 年 5 月 30 日云南盈江  $M_s6.1$  地震

盈江  $M_s6.1$  地震发生在云南西北部，发震断层为近 SN 走向的苏典断裂，震源机制解为右旋走滑

型（黄小龙等，2015）。本次地震前，地震活动短期异常主要有川滇地区震群频次和余震区活跃、云南西北部  $M_L\geq 3.0$  地震显著增强、 $M_L\geq 3.0$  震群活跃、小滇西地区  $M_L\geq 2.5$  地震高频次等；地球物理观测方面，流体短期异常突出，且主要集中在震中 200 km 范围内。云南地区宏观异常达到预测指标，特别是腾冲荷花热水塘水爆异常非常显著，该异常出现在震前 1 个月，喷出的泥浆、砂石高达 12 m，为比较罕见的现象（钱晓东等，2019）。表 5 显示，该地震前综合权重集成  $P_z$  值为 2.9。

表 5 2014 年云南盈江  $M_s6.1$  地震前测震学和地球物理观测异常及其权重  
Tab. 5 Anomalies of the earthquake activity and the geophysical observation and their weights  
before the 2014 Yingjiang, Yunnan  $M_s6.1$  earthquake

序号	异常名称	预测三要素			预测效能检验	权重值 $P$
		时间	地点	强度		
1	川滇地区 $M_L\geq 3.0$ 震群频次	3 个月	川滇地区	$M_s\geq 6.0$	$R=0.41, R_0=0.38$	0.16
2	川滇地区余震区活跃	3 个月	川滇地区	$M_s\geq 6.0$	—	0.1
3	云南地区 $M_L\geq 3.0$ 地震月频次异常	4 个月	云南地区	6 级左右	$R=0.35, R_0=0.19$	0.42
4	小滇西地区 $M_L\geq 2.5$ 地震高频次异常	3 个月	活跃区附近	5~6 级	—	0.1
5	云南西北部 $M_L\geq 3.0$ 地震显著增强	3 个月	云南西北地区	6 级左右	$R=0.20, R_0=0.16$	0.18
6	云南西北部 $M_L\geq 3.0$ 震群活跃	130 天	云南西北地区	6 级左右	$R=0.56, R_0=0.44$	0.34
7	昌宁窗开窗	3 个月	云南西北地区	$M_s\geq 5.0$	—	0.1
8	梁河气汞、龙陵水温、德宏水位、瑞丽气汞、保山流量、保山佛离子、昌宁水氢、耿马地温、洱源钙离子、洱源碳酸氢根、腾冲水温	短期	云南西北地区	6 级左右	—	1.1
9	腾冲地电阻率	短期	台站附近 300 km	5~6 级	—	0.1
10	云南地区宏观异常频次	90 天	云南地区	$M_s\geq 5.5$	$R=0.32, R_0=0.24$	0.26
综合权重集成 $P_z$ 值				2.9		

2.5 2013 年以来川滇地区强震震例综合权重集成  $P_z$  列表与不同区域不同强度预测临界值

2013 年以来川滇地区共发生 11 次（10 组） $M_s\geq 5.9$  地震，其中川滇交界东部及附近地区 5 组，云南西南地区 3 次，云南西北地区 2 次，表 6 列出了这些地震前的综合权重集成  $P_z$  值。从表 6 可以看出，川滇交界东部地区 6 级左右地震的综合权重集成临界值  $P_{z6}$  为 2.0~3.3，7 级左右综合权重集成临界值  $P_{z7}$  为 5.0~5.4；云南西南地区 6 级左右地震的综合权重集成临界值  $P_{z6}$  为 1.4~2.2，7 级左右权重集成临界值  $P_{z7}$  为 3 左右；云南西北地区，6 级左右地震的综合权重集成临界值  $P_{z6}=2.9\sim 3.2$ 。值得指出的是，由于每个重点区域震例少，得到的 6 级和 7 级左右地震的综合权重集成临界值，仅作为参考。

表 6 2013 年以来川滇地区 11 次（10 组）震例的综合权重集成  $P_z$  值

Tab. 6 The integrated synthetical weight  $P_z$  - value of 11 (or 10 groups of) strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region since 2013

地区称	发震日期	$M_s$	发震地点	综合权重集成 $P_z$
川滇交界 东部地区	2013-04-20	7.0	四川芦山	5.4
	2014-08-03	6.5	云南鲁甸	5.2
	2014-11-22	6.3	四川康定	2.0
	2022-06-01	6.1	四川芦山	3.3
	2022-06-10	6.0	马尔康	
	2022-09-05	6.8	四川泸定	5.0
云南西南地区	2014-10-07	6.6	云南景谷	2.8
	2021-12-24	6.0	老挝	1.4
	2018-09-08	5.9	云南墨江	2.2
云南西北地区	2021-05-21	6.4	云南漾濞	3.2
	2014-05-30	6.1	云南盈江	2.9

## 2.6 川滇地区 3 个重点区域每月综合权重集成 $P_z$ 值计算结果

依据宏、微观异常报告, 计算 2020—2023 年川滇地区 3 个重点区域每个月的综合权重集成  $P_z$  值, 并绘制曲线图 (图 2)。

由图 2a 可以看出, 在川滇交界东部地区, 从 2020 年 9 月开始  $P_z$  值逐渐增大, 于 2021 年 5 月达到峰值点,  $P_z$  值为 3.76, 在此期间虽然区域内部没有发生强震, 但在其附近发生了 2021 年 5 月 22 日青海玛多  $M_s 7.4$  地震。2022 年 5 月开始,  $P_z$  值

再次逐渐增大, 9 月达到峰值,  $P_z$  值为 5.0, 在此期间, 区域内部先后发生 2022 年 6 月 1 日芦山  $M_s 6.1$ 、6 月 10 日马尔康  $M_s 6.0$  和 9 月 5 日泸定  $M_s 6.8$  地震。泸定地震后, 由于一些地震活动和地球物理观测异常权重降低,  $P_z$  值显著下降, 2023 年 4—12 月  $P_z$  值维持在较高水平, 最高值为 3.66 (图 2a)。依据表 6, 该值明显高于 2014 年康定  $M_s 6.3$  地震前  $P_z$  值, 并略高于 2022 年芦山  $M_s 6.1$  和马尔康  $M_s 6.0$  地震  $P_z$  值, 但是实际上川滇交界东部地区并未发生 6 级以上地震。

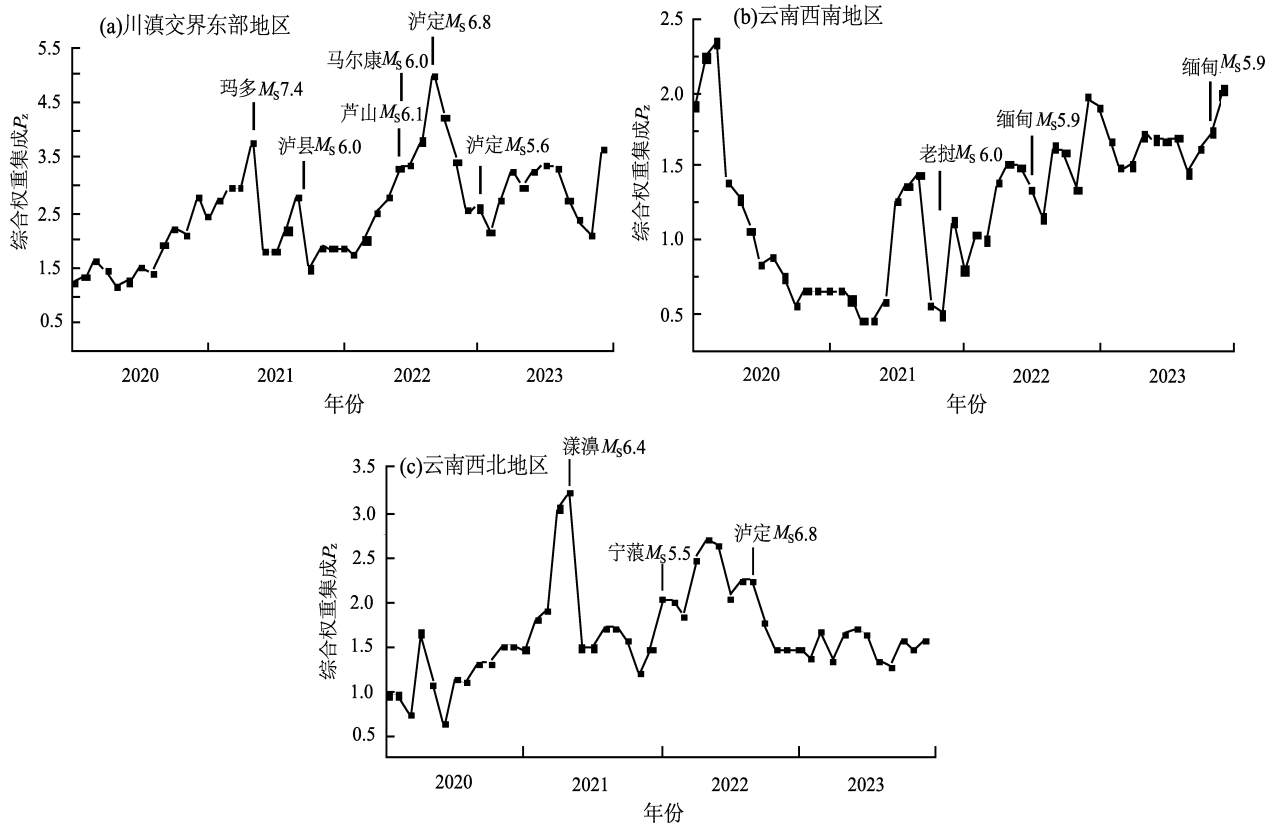


图 2 2020—2023 年川滇地区 3 个重点区域综合权重集成  $P_z$  值随时间的变化曲线与  $M_s \geq 5.5$  地震

Fig. 2 Time history of  $P_z$ -value and the  $M_s \geq 5.5$  earthquakes in three key areas in Sichuan-Yunnan region during 2020–2023

图 2b 是云南西南地区综合权重集成  $P_z$  值随时间的变化曲线, 可以看出, 该区  $P_z$  值一直未达到 2014 年景谷  $M_s 6.4$  地震前的水平, 2021 年 8 月至 2023 年  $P_z$  值呈持续、缓慢的上升状态。在此期间我国境内没有发生  $M_s \geq 6.0$  地震, 但边境地区先后发生了 2021 年 12 月 24 日老挝  $M_s 6.0$ 、2022 年 7 月 22 日缅甸  $M_s 5.9$  和 2023 年 11 月 17 日缅甸  $M_s 5.9$  地震。老挝  $M_s 6.0$  地震发生在 2021 年 7—9 月  $P_z$  高值结束后的 2 个月, 2 次缅甸  $M_s 5.9$  地震

在  $P_z$  值较高的背景上发生。

图 2c 是 2020—2023 年云南西北地区每个月综合权重集成  $P_z$  值随时间的变化曲线, 可以看出,  $P_z$  值曲线共出现 2 个峰值点, 第一个峰值点为 2021 年 5 月, 发生了 5 月 21 日漾濞  $M_s 6.4$  地震; 第二个峰值点出现在 2022 年 5 月, 6—9 月  $P_z$  值有所降低, 但仍处于高值状态, 这可能跟 9 月 5 日川滇交界东部泸定  $M_s 6.8$  地震有关。2023 年该区  $P_z$  值一直处于较低水平。

### 3 结论

为了定量地刻画强震前异常的群体特征, 本文使用权重集成法回溯性计算了川滇地区 11 次 (10 组) 强震前短临阶段测震学和地球物理观测异常的综合权重集成  $P_z$  值, 并由此得到了 3 个重点区域 6 级左右和 7 级左右综合权重临界值, 为川滇地区短临综合研判提供定量依据。

(1) 研究结果显示, 不同区域同等强度地震的综合权重集成临界值存在差异, 这可能与不同区域地震活动特点和地球物理观测台网密度不同有关。

(2) 本文对测震学异常权重赋值时考虑了 3 种情况: ①能够通过  $R$  值检验; ②不能通过  $R$  值检验, 但可以通过异常对应率检验; ③不能通过统计检验。这里的异常对应率检验指异常对应率要大于背景概率。对于地球物理观测异常, 仅使用  $R$  值检验, 这主要是考虑到部分地球物理观测时间短, 震例少, 如果使用对应率则没有统计意义。

(3) 对于区域异常 (即预测区域为川滇地区), 考虑到异常对应地震的样本量有限, 我们直接将其权重同时赋给 3 个重点区域。

(4) 根据 2020—2023 年宏、微观异常报告, 计算了川滇地区 3 个重点区域每个月的综合权重集成  $P_z$  值, 结果显示, 6 级以上地震主要发生在  $P_z$  值峰值点或  $P_z$  值快速增加的过程中, 少数地震发生在  $P_z$  高值后降低的过程中。

#### 参考文献:

- 陈立德. 1993. 地震综合预报的权重集成法[J]. 地震研究, 16(3): 267–271.
- Chen L D. 1993. Synthetical earthquake prediction using weight integration method[J]. Journal of Seismological Research, 16(3): 267–271. (in Chinese)
- 邓世广, 周龙泉, 马亚伟, 等. 2019. 基于贝叶斯定理的地震危险性概率预测研究[J]. 中国地震, 35(1): 1–13.
- Deng S G, Zhou L Q, Ma Y W, et al. 2019. Research on probability prediction of earthquake risk based on Bayesian theorem[J]. Earthquake Research in China, 35(1): 1–13. (in Chinese)
- 杜芳, 龙峰, 赵敏, 等. 2019. 2013 年 4 月 20 日四川省芦山 7.0 级地震. 中国震例(2013)[M]. 北京: 地震出版社, 168–288.
- Du F, Long F, Zhao M, et al. 2019. Lushan  $M_s$  7.0 earthquake on 20 April, 2013 in Sichuan Province, China. Earthquake cases in China mainland(2013)[M]. Beijing: Seismological Press, 168–288. (in Chinese)
- 付虹, 刘自凤, 胡小静, 等. 2021. 2021 年云南漾濞  $M_s$  6.4 地震异常跟

踪分析[J]. 地震研究, 44(3): 301–308.

- Fu H, Liu Z F, Hu X J, et al. 2021. Tracking analysis of seismic anomalies of the 2021 Yangbi, Yunnan  $M_s$  6.4 earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 44(3): 301–308. (in Chinese)
- 何畅, 路茜, 龙峰, 等. 2022. 基于贝叶斯概率的强震综合概率预测指标建立及其在四川地区的应用[J]. 四川地震, (3): 6–13.
- He C, Lu Q, Long F, et al. 2022. The establishment of a comprehensive probability prediction index for strong earthquakes based on the Bayesian probability and its application in Sichuan[J]. Earthquake Research in Sichuan, (3): 6–13. (in Chinese)
- 黄小龙, 吴中海, 赵小艳, 等. 2015. 2014 年 5 月云南盈江  $M_s$  5.6、 $M_s$  6.1 地震发震构造分析[J]. 地球学报, 36(6): 761–770.
- Huang X L, Wu Z H, Zhao X Y, et al. 2015. Seismogenic structure of 2014  $M_s$  5.6 and  $M_s$  6.1 earthquakes in Yingjiang, Yunnan province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(6): 761–770. (in Chinese)
- 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.
- Jiang H K, Miao Q Z, Wu Q, et al. 2009. Analysis on statistical features of precursor based on earthquake cases in China mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 31(3): 245–259. (in Chinese)
- 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等. 2013. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征[J]. 地球物理学报, 56(5): 1753–1763.
- Lyu J, Wang X S, Su J R, et al. 2013. Hypocentral location and source mechanism of the  $M_s$  7.0 Lushan earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(5): 1753–1763. (in Chinese)
- 钱晓东, 贺素歌. 2024. 基于概率增益模型的强震概率预测研究[J]. 地震研究, 47(2): 223–232.
- Qian X D, He S G. 2024. Research on strong earthquake probability prediction based on the probability gain model[J]. Journal of Seismological Research, 47(2): 223–232. (in Chinese)
- 钱晓东, 李智蓉, 胡小静. 2019. 2014 年 5 月 24 日、30 日云南省盈江 5.6、6.1 级地震[M]//蒋海昆, 付虹, 杨马陵. 中国震例(2014—2015). 北京: 地震出版社, 137–189.
- Qian X D, Li Z R, Hu X J. 2019. 2014 Yingjiang earthquakes with  $M_s$  5.6 on 24 May and with  $M_s$  6.1 on 30 May, Yunnan province[M]//Jiang H K, Fu H, Yang M L. China. Earthquake cases in China mainland(2014—2015). Beijing: Seismological Press, 137–189. (in Chinese)
- 邵志刚, 晏锐, 刘瑞春, 等. 2024. 全国震情跟踪与会商研判技术方案[M]. 北京: 地震出版社, 153–212.
- Shao Z G, Yan R, Liu R C, et al. 2024. Earthquake situation tracking and consultation judgement in China[M]. Beijing: Seismological Press, 153–212. (in Chinese)
- 宋俊高, 陆远忠, 施玉芳, 等. 1989. 震群用于地震预报的实用程式研究[M]//国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集—地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社, 204–228.
- Song J G, Lu Y Z, Shi Y F, et al. 1989. The research of a comprehensive program for earthquake prediction with earthquake swarm[M]//Department of Science, Technology and Monitoring, State Seismological Bureau. The practical research paper on earthquake prediction methods( seismicity section). Beijing: Academic Press, 204–228. (in



- Chinese)
- 王月, 胡少乾, 何晓慧, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震序列重定位及震源机制解[J]. 地球物理学报, 64(12): 4510–4525.
- Wang Y, Hu S Q, He X H, *et al.* 2021. Relocation and focal mechanism solutions of the 21 May 2021  $M_s$ 6.4 Yunnan Yangbi earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4510–4525. (in Chinese)
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[M]//国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集—地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社, 586–589.
- Xu S X. 1989. The evaluation of earthquake prediction ability[M]//Department of Science, Technology and Monitoring, State Seismological Bureau. The practical research paper on earthquake prediction methods—seismicity section). Beijing: Academic Press, 586–589. (in Chinese)
- 解滔, 任越霞, 廖晓峰, 等. 2023. 2022 年四川泸定  $M_s$ 6.8 地震前地下介质视电阻率变化特征及其机理分析[J]. 地球物理学报, 66(4): 1428–1437.
- Xie T, Ren Y X, Liao X F, *et al.* 2023. Changes in apparent resistivity and its possible mechanisms before the Luding  $M_s$ 6.8 earthquake on September 5, 2022, Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(4): 1428–1437. (in Chinese)
- 薛艳, 张小涛, 晏锐, 等. 2022. 2022 年四川泸定  $M_s$ 6.8 地震前地震活动与地球物理观测异常回顾与讨论[J]. 中国地震, 38(4): 601–612.
- Xue Y, Zhang X T, Yan R, *et al.* Review and discussion on seismic activity and geophysical observation anomalies before the 2022 Luding  $M_s$ 6.8 earthquake in Sichuan, China[J]. Earthquake Research in China, 38(4): 601–612. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙峰, 梁明剑, 等. 2023. 2022 年 9 月 5 日四川泸定  $M_s$ 6.8 地震序列发震构造[J]. 地球物理学报, 66(4): 1363–1384.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2023. Seismogenic structure of the 5 September 2022 Sichuan Luding  $M_s$ 6.8 earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(4): 1363–1384. (in Chinese)
- Yang X, Lu Q, Zhang T B, *et al.* 2023. Analytical study of the changes in brightness temperature based on the tectonic field associated with three earthquakes in the eastern Tibetan Plateau[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, doi: 10.1109/TGRS.2023.3250554.

## Research on Comprehensive Short-term and Imminent Prediction of Strong Earthquakes in Sichuan-Yunnan Region

XUE Yan<sup>1</sup>, HONG Min<sup>2</sup>, YU Huaizhong<sup>1</sup>, JIANG Xianghua<sup>1</sup>

(1. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

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

### Abstract

In this paper, we firstly make a retrospective summary of the seismic and geophysical anomalies observed before 11 (or 10 groups of) strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region since 2013. Based on the test of the anomalies' prediction effectiveness, and according to the weight assignment rules, we assign weights to the anomalies. Then, we calculate the weight integration  $P_Z$ -value of the strong earthquakes using the weight integration method, and the threshold value  $P_{Z6}$  of 6-magnitude earthquakes and  $P_{Z7}$  of 7-magnitude earthquakes in three key areas (the eastern boundary between Sichuan Province and Yunnan Province, northwest Yunnan, southwest Yunnan) in Sichuan-Yunnan region are obtained. These values can be used as a reference for short-term and imminent earthquake prediction in these three key areas. In addition, according to the macro- and micro-anomaly reports, the monthly  $P_Z$ -value from January 2020 to December 2023 in the three key areas are calculated. The results show that  $M_s \geq 6.0$  earthquakes mainly occurred at the time when  $P_Z$ -value reached the peak points, or  $P_Z$ -value was in the process of rapid increase. A few earthquakes occurred when  $P_Z$ -value was in the process of decrease from the high value.  $P_Z$ -value is capable of quantitatively describing the group-earthquake anomalies; it is helpful for the quantification of the short-term and imminent earthquake prediction.

**Keywords:** comprehensive short-term and imminent earthquake prediction; weight integration method; strong earthquakes; Sichuan-Yunnan region