

一、模型研制的目的、必要性和需求分析

川滇地区人口众多、地震活跃，是我国地震灾害最为严重的地区之一，合理的地震灾害评估对川滇地区的防震减灾具有重要意义。Cornell(1968)提出的概率地震危险性分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)可以给出某地区在一定时间范围内地表震动超过给定阈值的概率，是量化地震危险性的有效手段，在建筑规划、抗震设防、安全教育等方面有着广泛的应用。

概率地震危险性分析所需要的数据是对研究区平均地震活动水平的估计(Cornell, 1968)，即研究区地震长期发生概率。早期获得的地震长期发生率主要依靠单一学科资料，以对地震目录的分析为主(Gutenberg and Richter, 1944; Johnston and Nava, 1985; Working Group on California Earthquake Probabilities, 1988, 1990; 傅征祥和王晓青, 1993)，也包括地震地质资料分析(Wesnousky, 1986; 闻学泽, 1990)和大地测量资料分析(Rikitake, 1974)等。

1994年洛杉矶 Northridge 发生的 $M_w6.7$ 地震对保险业造成了冲击，从而推动了制定地震相关保险政策的加州地震管理局的成立，加州地震管理局提出了州际范围统一方法综合预测的需求，但当时尚无能满足需求的结果，因此学者们开始进行综合地震概率预测研究。Ward(1994)通过综合当时加州地区地震地质、大地测量和测震学等资料，对加州地区进行了震源区划分，综合各学科资料计算了南加州各震源区 M_w5 以上地震的长期发生率，并计算了其在未来 30 年中可能产生的峰值地表加速度，通过绘制各类峰值地表加速度概率分布图为南加州地区地震危险性提供了量化结果。

Ward(1994)使用的资料范围全面，可较好的满足综合地震概率预测的需求，但受到当时观测资料水平的限制（如只考虑断层的滑动速率而不考虑产状等），随着各类观测资料的丰富，综合地震概率预测也不断发展，在加州地区使用的统一加州地震破裂预测模型(Uniform California Earthquake Rupture Forecast, UCERF)是其中的代表，统一加州地震破裂预测模型综合了加州地区大量地震地质、大地测量、古地震资料，基于弹性回跳理论建立，目前已更新到第三版(UCERF3)。

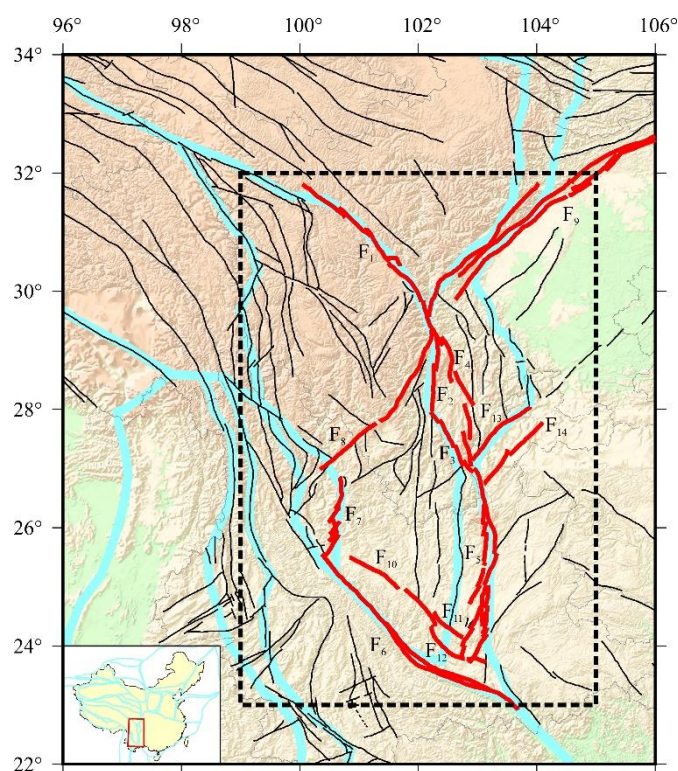


图 1 研究区范围与主要活动构造

虚线框为研究区域；浅蓝色线为活动块体边界；黑色线为川滇地区活动断层；红色线为研究涉及的主要活动断层：F₁, 鲜水河断裂带；F₂, 安宁河断裂带；F₃, 则木河断裂带；F₄, 大凉山断裂带；F₅, 小江断裂带；F₆, 红河断裂带；F₇, 程海断裂；F₈, 小金河断裂带；F₉, 龙门山断裂带；F₁₀, 楚雄断裂带；F₁₁, 曲江断裂；F₁₂, 石屏断裂；F₁₃, 莲峰断裂带；F₁₄, 昭通断裂带

Ward(1994)与 UCERF3 的工作都综合利用当时各学科的资料，以获得概率预测结果。由于两个模型所处的年代不同，其使用资料的水平如台站平均间距(南加州地区目前平均台站间距约为 4km, 在 1994 年时约为 25km, 与川滇地区目前平均台站间距相近)、断层研究程度等也存在差距，可作为不同资料积累程度下进行综合地震概率预测的参考。通过对川滇地区地震地质、大地测量和测震学等资料的分析，发现尽管其数量和质量与开展 UCERF3 方法研究的要求还有一定距离，但已达到或超过 Ward(1994)研究中使用资料的水平。因此，本研究在收集川滇地区现有各学科资料的基础上，参考 Ward(1994)的方法，计算了川滇菱形块体及周边地区未来 30 年的地震概率，并给出未来川滇菱形块体及周边地区地震引起峰值地表加速度的概率分布(图 1)。

二、模型预期指标和技术路线

Ward(1994)的工作可以分为两部分，涉及地震地质、大地测量和测震学三方面资料，首先根据上述资料计算研究区各震源区地震长期发生率，然后根据地震长期发生率给出预测时段的发生概率，最后计算峰值地表加速度分布以获得量化的地震灾害结果(图 2)。其中计算研究区长期

地震发生率包含四个步骤：(1)根据地震活动特征和主要断层分布将研究区分为主要震源区和次要震源区；(2)根据断层滑动速率和大地测量结果计算各震源区年均地震矩累积量；(3)根据地震目录计算各震源区地震活动参数，获得各震源区的震级频度分布；(4)根据年均地震矩累积量和震级频度分布计算各震源区地震长期发生率。计算峰值地表加速度分布分为两个步骤：(1)在研究区设置潜在震源，由震源区地震长期发生率给出潜在震源在预测时段内的发震概率；(2)计算潜在震源引起峰值地表加速度的分布。

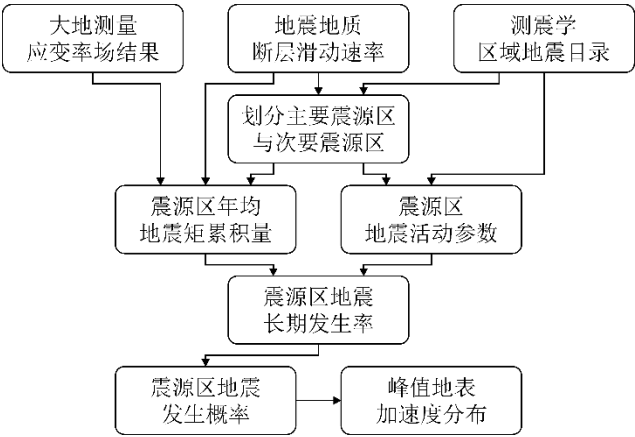


图 2 基于多学科物理观测的地震概率预测流程

三、模型数据来源和质量分析

通过公开发表的文章收集了川滇地区地震地质、大地测量和测震学等资料。

四、模型研制关键技术方法

1.1 主要震源区与次要震源区划分

现代概率地震危险性分析一般可通过编写程序进行计算，需要将研究区划分为不同的震源区，震源区由多边形表示，代表在构造和地震活动水平上较为相近的区域(Meletti et al., 2008)。前人研究表明，活动地块边界是我国强震发生的主要区域，研究区包含了川滇菱形块体等四个二级地块，其中一些地块又可以进一步划分出次级地块(张培震等, 2003; 徐锡伟等, 2003)，这些块体由研究区的主要断层分隔，包括鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带、红河断裂带、楚雄断裂带、龙门山断裂带和小金河断裂带等，这些断裂带具有地震地质研究获得的滑动速率结果，且 1900 年以来 5 级以上地震震中在上述区域较为集中(图 3A, B)。根据 Ward(1994)划分震源区的原则，即将研究区中主要断层所在的地震活跃部分作为主要震源区，剩余地震活动较弱的部分作为次要震源区；最终将研究区划分为 26 个主要震源区和 31 个次要震源区，结果如图 3C 所示。

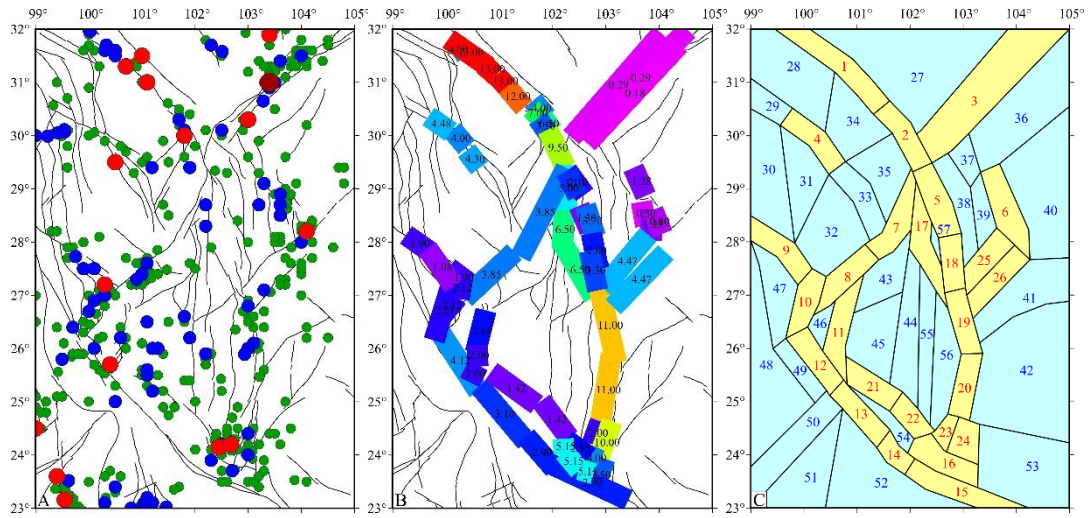


图3 研究区主要震源区和次要震源区划分

A, 研究区断层及 1900 年以来 5.0 级以上地震震中分布; B, 前人研究获得的断层运动速率(mm/yr)(据徐锡伟等, 2003; Papadimitriou et al. 2004; 何宏林等, 2008; 韩竹军等, 2009; 闻学泽等, 2011; 魏占玉等, 2012); C, 划分结果 (黄色为主要震源区, 蓝色为次要震源区, 数字为震源区序号)

主要震源区和次要震源区划分可对研究区不同部分的地震活动性作出定性估计, 然而为了计算各震源区地震长期发生率, 还需要对各震源区的地震活动性进行定量研究, 这主要涉及到两部分内容, 一部分是某一震源区年均应变累积量, 代表了该震源区平均每年地震释放的能量, 另一部分是这些能量的分配方式, 即某一区域的最大震级和震级-频度分布。由于主要震源区和次要震源区的地震活动性不同, 因此针对这两部分内容的计算也有所区别。

1.2 利用断层运动速率和区域应变率计算震源区年均地震矩累积量

弹性回跳理论认为, 地震是构造运动积累能量的突然释放, Aki(1966)提出了地震矩的概念来表示地震的大小。在较长时间尺度中, 可以认为某一地区地震矩的年均释放量与年均累积量相等, 因此计算某一地区年均地震矩累积量可对其每年发生地震的总规模进行限制。

根据 Kostrov 公式(Kostrov, 1974), 某区域的年均地震矩累积量 $\dot{M}_s$ 与区域应变率 $\dot{\epsilon}$ 的关系如下:

$$\dot{M}_s = 2\mu A H_s \dot{\epsilon} \#(1)$$

其中 μ 为刚度($3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), A 为区域面积, H_s 为发震层厚度, 计算时认为研究区各震源区的发震层厚度相同。由于观测资料的限制, 对研究区整体地震长期活动水平影响较大的地质应变率难以获得, 可假设地质应变率和大地测量资料可给出某一时段的区域应变率的均值相同(Ward, 1994); 通过研究区地震目录计算研究区年均地震矩释放量, 再结合研究区面积求出研究区的发震层厚度 H_s 。

再获得研究区发震层厚度 H_s 后, 即可据此计算各震源区的年均地震矩累积量。由图3可见, 主要震源区均在断层附近, 沿断层呈条带状分布, 其内部断层的滑动速率通过地质学方法确定, 一般结合地貌学测定的位移量和年代学确定的时间给出, 代表了断层几千年到上万年以来的平均滑动速率(徐锡伟等, 2003), 由于其时间跨度远大于地震复发周期, 可以认为这一速率代表了断层

的平均应变积累水平，在预测时长远小于地震复发周期的情况下，可根据主要震源区内断层滑动速率计算的年均地震矩累积量估计未来数十年该主要震源区的地震活动水平。因此，对于主要震源区，其应变率 $\dot{\epsilon} = s/2W$ (Ward, 1994)，其中 s 为主要震源区内断层的滑动速率， W 为主要震源区的宽度。

次要震源区由于断层不发育或缺乏地质学方法确定的断层滑动速率信息，无法像主要震源区一样用地震地质资料计算地质应变率，因此需要通过大地测量资料求解其应变率，进而获得年均地震矩累积量。在瞬时应变率与地质应变率均值相同的前提下，可以对次要震源区的应变率做如下两方面限制：一方面，所有主要震源区与次要震源区应变率之和代表了研究区地质应变率的均值，应与大地测量资料获得的瞬时应变率均值相等，并尽可能选择较长观测周期的均值；另一方面，次要震源区的地质应变率应与大地测量资料给出的研究区应变率场一致(图 4)。根据上述限制条件建立方程，求出最优解作为次要震源区的应变率，进而获得次要震源区的年均地震矩累积量。

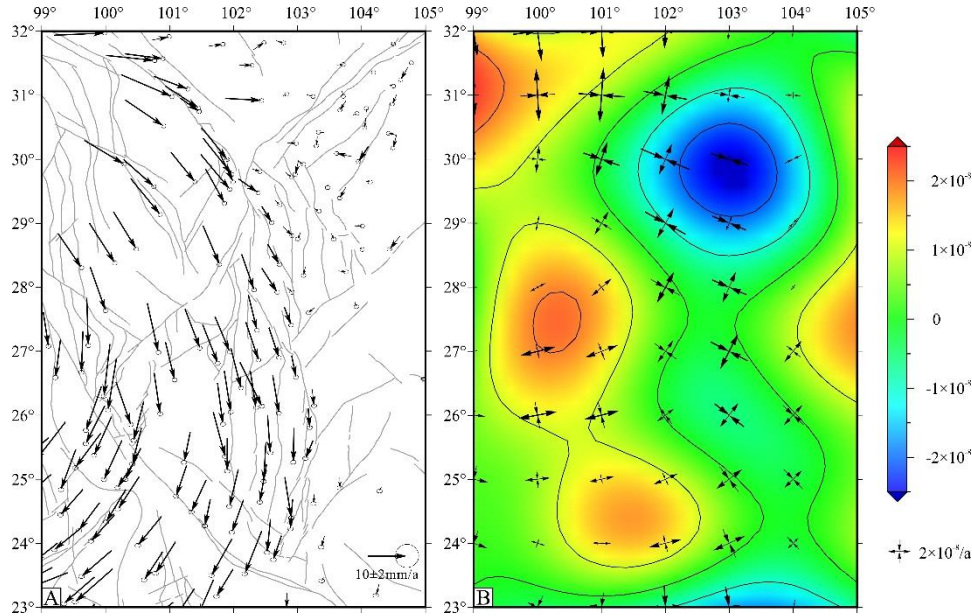


图 4 1999~2007 年川滇菱形块体及周边地区 GPS 形变场

A, GPS 速度场; B, GPS 主应变率和面应变率分布

Fig. 4 GPS deformation field in Sichuan-Yunnan diamond zone from 1997 to 2007

A, GPS velocity field; B, Distribution of main strain rate and area strain rate

1.3 震源区地震活动参数和震级频度分布

震源区年均应变积累量确定了震源区每年发生地震的规模，但为了获得不同震级地震所占的比例，还需要计算各震源区的震级-频度分布。参考 Ward(1994)的方法，使用截断的古登堡-里克特关系来表示震级-频度分布，即假设某震源区每年 M 级($M \leq M_{max}$ ， M_{max} 为震源区最大震级)地震的频次为 N ，则 N 与 M 遵循如下规律：

$$\log N = a + bM, M \leq M_{max} \#(2)$$

由于震源区年均地震矩累积量限制了震源区地震总规模，因此某震源区中 a 、 b 、 M_{max} 和震源区年均地震矩累积量 $\dot{M}_s$ 有如下关系：

$$10^a = \frac{\ln 10(1.5 + b)M_s}{10^{(1.5+b)M_{max}+9.05}} \#(3)$$

因此，通过确定震源区 b 和 M_{max} 的值，即可获得震源区的震级-频度分布，由于主要震源区和次要震源区的地震活动水平不同，因此其确定方法也不同：确定 b 值的区别主要在于所使用的地震目录，主要震源区地震频发，可以直接根据震源区内地震目录计算 b 值；次要震源区内地震稀少，认为其更接近研究区的背景地震活动，因此使用区域目录计算。前人研究表明，研究区内 1900 年以来的 5 级以上地震是完整的(黄玮琼等，1994)，从中国地震台网目录中选择研究区 1900 年以来的 5 级以上地震，分别统计不同震级的频次，通过线性拟合(2)式，获得 b 值。确定 M_{max} 的区别在于使用了不同方法，主要震源区包含了研究区的主要断层，学者对其发震能力也有较多的研究，因此主要震源区的最大震级可通过查阅相关文献确定；次要震源区内部无断层或断层研究程度较低，通过经验公式确定其最大震级 (Peterson and Wesnousky, 1993)，计算公式为：

$$M_{max} = \frac{2}{3}(16.997 - 9.05 + 1.5648 \log L_{max}) \#(4)$$

其中 L_{max} 为次要震源区最大线性维度，即其内部可容纳最长线段的长度。

1.4 震源区地震平均发震间隔

在研究区积累的地震矩均通过地震形式释放和由地震目录获得的震级频度分布在未来一段时间内不发生明显变化的前提下，根据上述方法获得的震源区年均地震矩累积量、 b 值和最大震级即可计算其不同震级地震的复发周期，对于第 j 震源区，其 M 级($M \leq M_{max}^j$)以上地震的复发周期为：

$$T_{>}^j(M) = \left[\frac{b_j}{1.5 + b_j} \right] \frac{10^{(1.5+b_j)M_{max}^j+9.05}}{M_s^j [10^{b_j M_{max}^j} - 10^{b_j M}]} \#(5)$$

其中 M_s^j 、 b_j 和 M_{max}^j 分别为第 j 震源区的年均应变累积量、 b 值和最大震级， $T_{>}^j(M)$ 的倒数即为 j 震源区 M 级($M \leq M_{max}^j$)以上地震的年均频次。

1.5 潜在震源的发震概率

观测点的峰值地表加速度与震级和震中距离均有关系，为更好的表示距离的影响，在研究区等间距分布潜在震源，对于某一潜在震源，其震级频度分布与所在震源区相同，该震源区的年均地震矩累积量在震源区内所有震源中平均分配，因此，潜在震源地震平均发生率为其所在震源区相应震级地震平均发生率与震源区内潜在震源数量之比。

对于某一潜在震源来说，其在预测时段内发生 M 级地震的概率为 P_c 为：

$$P_c(M, t_1, t_2) = \frac{W(T_n, v, t_2) - W(T_n, v, t_1)}{1 - W(T_n, v, t_1)} \#(6)$$

其中 W 为韦布尔累积概率， t_1 和 t_2 分别为预测时段开始时刻与结束时刻据上次 M 级地震的时间， T_n 为 M 级地震的平静复发周期， v 代表了非周期性，即复发周期的离散程度：当 $v=0$ 时，地震的

发生具有严格的周期性，所有地震间隔相同；当 v 在 0 和 1 之间时，地震发生率随上次地震离逝时间的增加而增大，地震发生具有准周期性，表现为地震平静时段；当 $v=1$ 时，地震发生率与上次地震离逝时间无关，各时间段地震发生率相同，地震呈现泊松分布的特征；当 $v>1$ 时，地震发生率随上次地震离逝时间的增加而减小，地震具有丛集分布的特征。

1.6 峰值地表加速度计算

前人研究表明(Joyner and Boore, 1981)，震级为 M 的地震在最近断层距离 D_c 处引起的峰值地表加速度 A_p 呈期望为 $A_p(M, D_c)$ ，标准差为 0.22 的正态分布。 A_p 由 M 与 D_c 共同决定：

$$\log[A_p(M, D_c)] = 0.249M - \log\left(\sqrt{D_c^2 + 53.3}\right) - 0.00225\sqrt{D_c^2 + 53.3} - 1.02 \quad (7)$$

其中 A_p 以重力加速度 $g(9.8\text{m/s}^2)$ 的倍数表示。

由于峰值地表加速度呈正态分布，因此较小地震也有引起较大峰值地表加速度的可能，在 t_1 到 t_2 时间内，观测点 r 处峰值地表加速度超过 A_p 的概率与研究区内全部 N 个潜在震源的发震概率有关：

$$P(r, A_p, t_1, t_2) = 1 - \prod_{n=1}^N [1 - P_c(D_n, A_p, t_1, t_2)] \quad (8)$$

其中 P_c 为第 n 个潜在震源在 t_1 到 t_2 时间内发生可在观测点 r 处产生超过 A_p 的峰值地表加速度的地震的概率，根据 A_p 和 D_c 计算出相应震级 M 后使用式(6)计算。

五、模型完成情况与成果

通过收集川滇地区地震目录、地震地质研究结果(虢顺民等, 2001; 徐锡伟等, 2003; Papadimitriou et al., 2004; 何宏林等, 2008; 闻学泽等, 2011, 2013; M7 专项工作组, 2012; Wang et al., 2015)和区域应变率场结果(江在森, 2012), 对研究区进行了主要震源区和次要震源区的划分(图 3C), 并给出了各震源区的年均地震矩累积量、最大震级和 b 值等参数，根据公式(5)计算了各震源区不同震级地震的复发周期，结果见表 1。

表 1 川滇菱形块体及周边各震源区的相关参数

震源区 序号	面积 (km^2)	最大长度 (km)	滑动速率 (mm/yr)	应变率 ($10^{-8}/\text{yr}$)	年均地震矩 (10^{15}Nm)	b 值	最大震级	M 级以上地震复发周期(年)			
								6.0	6.5	7.0	7.5
1	9759	261	13.00	16.25	2569	0.42	7.75	48.94	56.92	77.41	185.93
2	5970	152	9.00	11.25	1088.00	0.45	7.57	67.06	80.42	120.83	770.44
3	25989	380	0.25	0.31	132.00	0.89	7.99	3113.10	3213.10	3527.38	4840.62
4	5990	153	4.30	5.38	522.00	0.55	7.58	156.30	181.42	260.02	1404.94
5	7019	153	3.00	3.75	426.00	0.69	7.58	211.74	237.18	323.11	1629.85
6	8172	193	1.00	1.25	165.00	0.65	7.68	736.55	817.25	1062.19	2876.94
7	6739	183	3.85	4.81	525.00	0.70	7.66	225.52	248.26	320.66	923.76
8	6067	172	3.85	4.81	473.00	0.71	7.63	228.50	252.29	330.32	1108.34
9	6207	162	1.50	1.88	189.00	0.51	7.60	447.93	523.20	750.11	3422.35

震源区 序号	面积 (km ²)	最大长度 (km)	滑动速率 (mm/yr)	应变率 (10 ⁻⁸ /yr)	年均地震矩 (10 ¹⁵ Nm)	b 值	最大震级	M 级以上地震复发周期(年)			
								6.0	6.5	7.0	7.5
10	5413	143	2.10	2.63	230.00	0.72	8.00	1636.07	1720.55	1950.32	2805.08
11	6846	207	2.60	3.25	360.00	1.03	7.71	473.86	493.61	571.67	1186.37
12	5742	144	4.10	5.13	477.00	0.64	7.55	165.46	188.85	267.83	2095.56
13	5576	144	3.10	3.88	350.00	0.70	7.55	234.87	264.19	366.66	2783.97
14	3012	88	2.90	3.63	177.00	0.70	7.33	226.02	270.51	483.68	-
15	7830	267	2.90	3.63	460.00	1.20	7.83	606.13	618.01	670.17	1007.92
16	6602	161	4.80	6.00	642.00	0.66	7.60	146.63	164.88	224.20	953.50
17	6938	246	6.50	8.13	913.00	0.37	7.79	151.02	176.97	240.53	537.24
18	4728	116	3.20	4.00	306.00	0.70	7.50	227.49	258.87	374.50	-
19	5497	138	11.00	13.75	1207.00	0.70	7.60	80.39	89.49	119.87	499.09
20	5503	134	11.00	13.75	1217.00	0.33	7.60	59.36	73.72	114.06	570.74
21	5318	137	1.40	1.75	151.00	0.57	7.53	465.73	544.49	806.27	10485.21
22	3814	102	1.40	1.75	108.00	0.70	7.39	449.37	527.13	860.47	-
23	2006	70	2.00	2.50	81.00	0.81	7.60	1285.07	1398.79	1807.55	7137.85
24	4089	97	10.00	12.50	828.00	0.56	7.60	105.83	121.97	171.73	765.42
25	5390	140	4.47	5.59	488.00	1.34	7.54	223.32	230.75	273.11	1909.23
26	6118	162	4.47	5.59	554.00	0.82	7.60	188.82	205.44	265.27	1046.29
27	37694	416	-	3.95	2415.00	0.69	8.03	169.72	178.57	202.02	285.40
28	19655	246	-	4.73	1505.00	0.69	7.79	121.14	130.85	159.24	307.81
29	3841	107	-	3.44	214.00	0.69	7.42	249.66	290.63	457.72	-
30	15423	266	-	1.20	299.00	0.69	7.83	697.58	749.56	898.47	1610.05
31	10574	221	-	1.39	238.00	0.69	7.74	648.16	705.12	876.46	1907.73
32	16283	190	-	2.34	618.00	0.69	7.68	204.14	224.21	286.97	760.58
33	6947	156	-	2.61	294.00	0.69	7.59	318.23	355.39	480.08	2187.32
34	11656	168	-	3.44	649.00	0.69	7.62	159.15	176.68	234.06	843.12
35	10328	167	-	3.31	553.00	0.69	7.62	186.83	207.42	274.78	989.79
36	24353	325	-	0.93	368.00	0.69	7.92	766.71	815.30	949.09	1494.76
37	3314	100	-	3.37	181.00	0.69	7.38	258.73	304.91	505.64	-
38	7657	215	-	3.56	441.00	0.69	7.73	338.07	368.33	459.93	1029.44
39	4176	145	-	2.60	176.00	0.69	7.55	465.63	524.41	729.17	5551.27
40	26519	296	-	1.01	434.00	0.69	7.88	568.32	607.00	715.33	1186.26
41	15053	246	-	2.57	626.00	0.69	7.79	291.39	314.74	383.03	740.39
42	42118	305	-	3.04	2075.00	0.69	7.89	123.05	131.28	154.22	252.27
43	7976	195	-	2.89	373.00	0.69	7.69	349.74	383.48	488.28	1245.32
44	11342	297	-	2.28	419.00	0.69	7.88	588.51	628.57	740.75	1228.41
45	12478	172	-	3.37	681.00	0.69	7.63	156.96	173.92	228.99	774.49
46	2316	97	-	3.40	128.00	0.69	7.37	355.44	420.23	706.88	-
47	9127	206	-	1.65	244.00	0.69	7.71	572.21	625.38	788.35	1875.75
48	22483	420	-	2.37	864.00	0.69	8.03	474.36	499.11	564.65	797.66
49	4339	137	-	2.74	193.00	0.69	7.53	397.68	449.90	635.57	7754.84
50	12257	269	-	1.86	370.00	0.69	7.83	563.23	605.20	725.43	1299.97
51	14370	266	-	2.47	575.00	0.69	7.83	362.53	389.54	466.93	836.73

震源区 序号	面积 (km ²)	最大长度 (km)	滑动速率 (mm/yr)	应变率 (10 ⁻⁸ /yr)	年均地震矩 (10 ¹⁵ Nm)	b 值	最大震级	M 级以上地震复发周期(年)			
								6.0	6.5	7.0	7.5
52	22609	336	-	2.87	1050.00	0.69	7.93	278.32	295.64	343.16	534.17
53	24353	244	-	1.42	562.00	0.69	7.79	324.52	350.53	426.58	824.56
54	3295	180	-	2.70	144.00	0.69	7.65	793.41	875.97	1139.81	3454.36
55	8094	300	-	2.36	310.00	0.69	7.88	796.22	850.42	1002.18	1661.96
56	9507	259	-	2.82	455.00	0.69	7.82	441.76	475.66	572.93	1046.92
57	724	84	-	3.48	41.00	0.69	7.31	914.77	1104.65	2052.25	-

以 10km 为间距，在研究区分布了 5963 个点状潜在震源，根据表 1 的参数，使用公式(5)计算了各潜在震源不同震级范围地震的年均频次，结果见图 5。以同样的间距设置了 5963 个观测点，在假设地震分别为泊松和非泊松分布情况下计算了 2018~2048 年间上述潜在震源在这些观测点引起峰值地表加速度的概率分布。

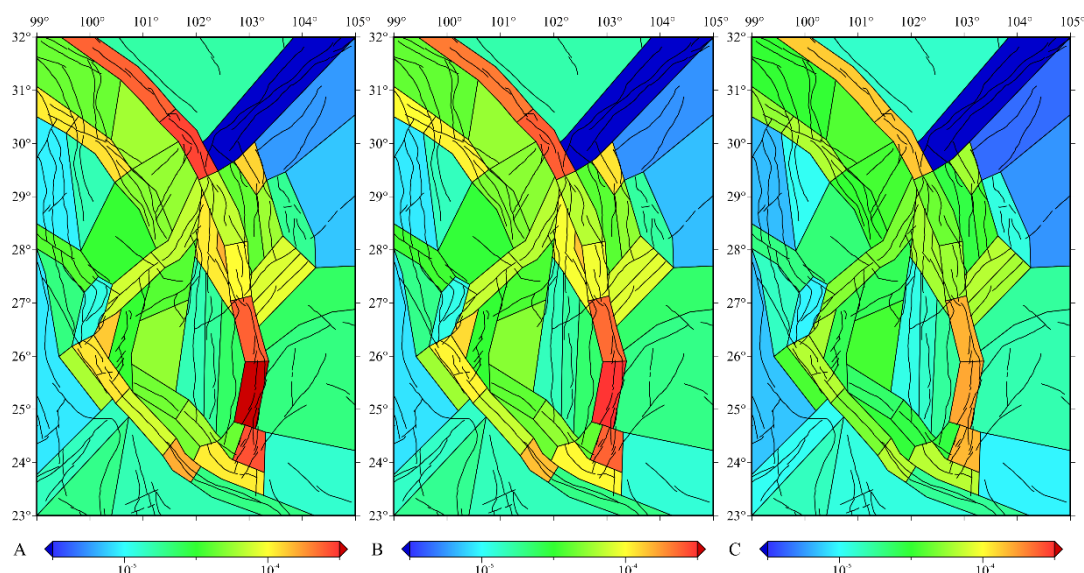


图 5 各震源区潜在震源地震年均频次
A, 5.0 级以上地震; B, 6.0 级以上地震; C, 7.0 级以上地震

2.1 泊松分布情况

当式(6)中当 $v=1$ 时，地震发生率与上次地震离逝时间无关，为泊松分布，式(6)可写为：

$$P(r, A_p, t_1, t_2) = 1 - e^{-\frac{t_2 - t_1}{T_M}} \quad \#(9)$$

其中 T_M 为全部震源相应地震年均频次之和的倒数，从式(9)可以看出，观测点 r 处峰值地表加速度超过 A_p 的概率 P 仅与 t_1 和 t_2 的差即预测时长有关。

图 6 给出了未来 30 年川滇地区泊松分布地震引起峰值地表加速度的概率分布。在未来 30 年中，川滇菱形块体内部大部分地区峰值地表加速度超过 $0.10g$ 的概率在 50% 以上，主要边界断层的超越概率在 60% 以上，其中部分地区超过 80%；当目标为 $0.15g$ 时，块体内部和主要边界带的超越概率以约 40% 为界，主要边界带上部分地区的超越概率可达 60% 以上；当目标为 $0.20g$ 时，研究区大部分区域的超越概率在 40% 以下，只有主要边界带上部分地区可超过 40%，最大超越概

率可达 70%以上。由于只考虑研究区内地震的影响，研究区边缘的峰值地表加速度可能被低估，但与其他边缘地区相比，四川盆地内部未来 30 年的峰值地表加速度更低，超过 $0.10g$ 的概率不足 20%，而超越 $0.15g$ 和 $0.20g$ 的概率均在 10%以下。随着目标峰值地表加速度的提高，高概率区域范围也逐渐清晰，主要包括：鲜水河断裂带、莲峰-昭通断裂带、小江断裂带北段、小江断裂带南段、红河断裂带东段和程海断裂带中-南段等。结合峰值地表加速度结果和川滇地区震中分布、断层滑动速率以及区域划分结果(图 3)可以发现，高峰值地表加速度区域都位于主要震源区，具有较强的历史地震活动水平或者较高的断层滑动速率。

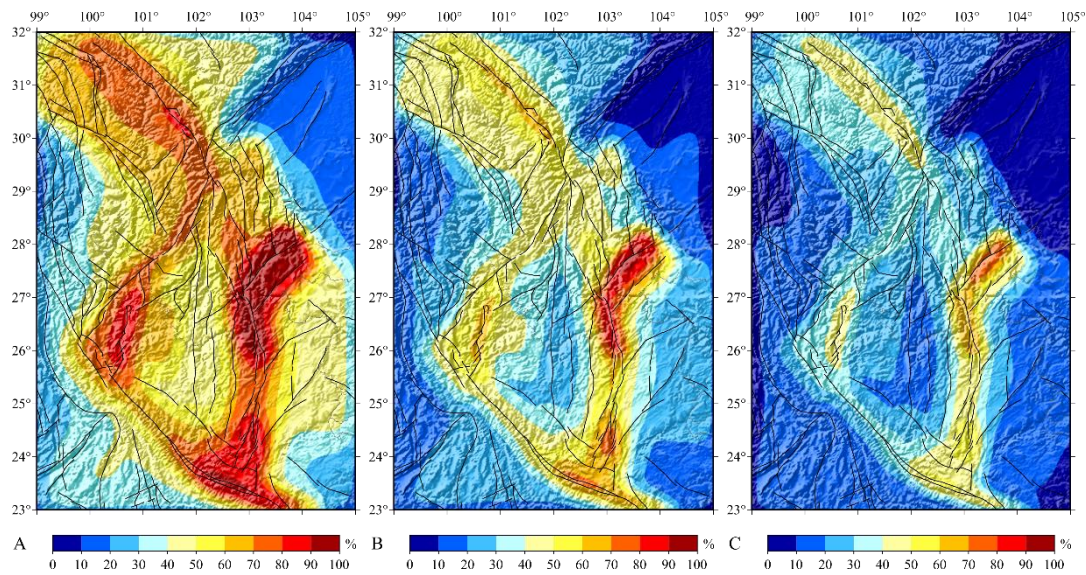


图 6 研究区未来 30 年峰值地表加速度超过不同阈值的概率(地震为泊松分布)
A, 超过 $0.10g$; B, 超过 $0.15g$; C, 超过 $0.20g$

低超越概率下的最大峰值地表加速度代表了研究区各处峰值地表加速度可能达到的最大值，可为重要建筑的选址或抗震设防提供参考。在超越概率为 3%的条件下(图 7A)，鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、红河断裂带和小金河断裂带等川滇菱形块体的主要边界断裂带的最大峰值地表加速度均在 $0.70g$ 以上，川滇菱形块体东边界的最大峰值地表加速度最高，鲜水河断裂带和小江断裂带的最大峰值地表加速度甚至可超过 $0.90g$ ，而四川盆地内部最大峰值地表加速度不足 $0.40g$ 。在超越概率为 6%的条件下(图 7B)，鲜水河断裂带和小江断裂带的最大峰值地表加速度仍然较高，其中鲜水河断裂带中段、小江断裂带北段和小江断裂带南段的最大峰值地表加速度值在 $0.80g$ 以上，川滇菱形块体主要边界断裂带及其附近区域的最大峰值地表加速度均超过 $0.40g$ ，四川盆地内部大部分地区最大峰值地表加速度在 $0.30g$ 以下。

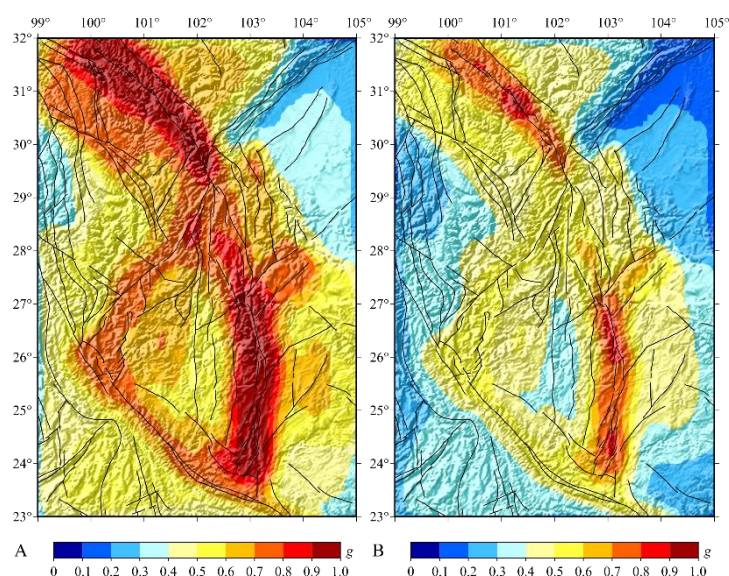


图 7 低超越概率下研究区未来 30 年最大峰值地表加速度(单位为 g , 地震为泊松分布)

A, 3%超越概率下最大峰值地表加速度; B, 6%概率超越下最大峰值地表加速度

本研究中认为地震在观测点引起的峰值地表加速度为正态分布, 期望由震级和距离共同决定, 标准差为 0.22, 使得较小地震也有引起较大峰值地表加速度的可能。震级-频度关系表明, 小地震的数量远多于大地震, 因此分别计算了研究区 5.0-7.0 级地震和 7.0 级以上地震引起的峰值地表加速度, 结果如图 8 所示。对比图 6B 和图 8 可见, 川滇菱形块体及周边地区 7.0 级以上引起的高超越概率范围与块体主要边界断层范围一致, 超越概率在 10%到 20%之间, 块体东边界的超越概率最高, 但基本未超过 30%; 而 5.0-7.0 级地震在研究区引起的区峰值地表加速度概率分布与全部地震引起的区峰值地表加速度概率分布较为一致, 说明这一震级范围内的地震对最终结果具有决定作用。

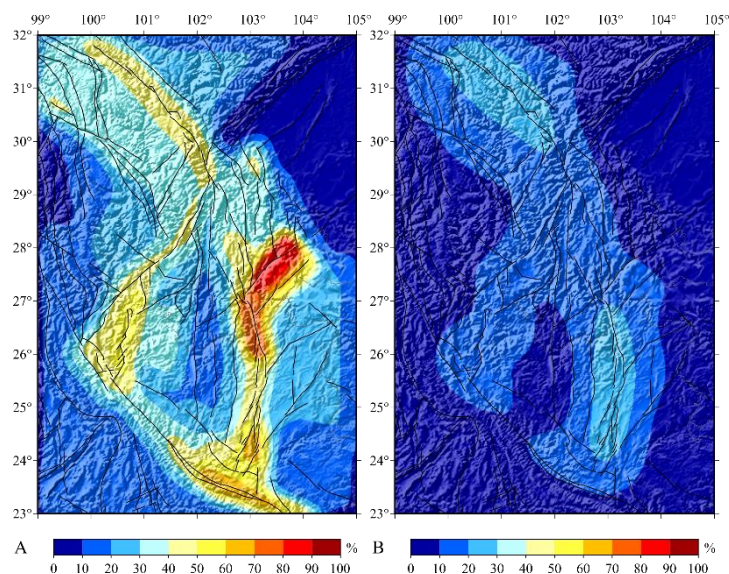


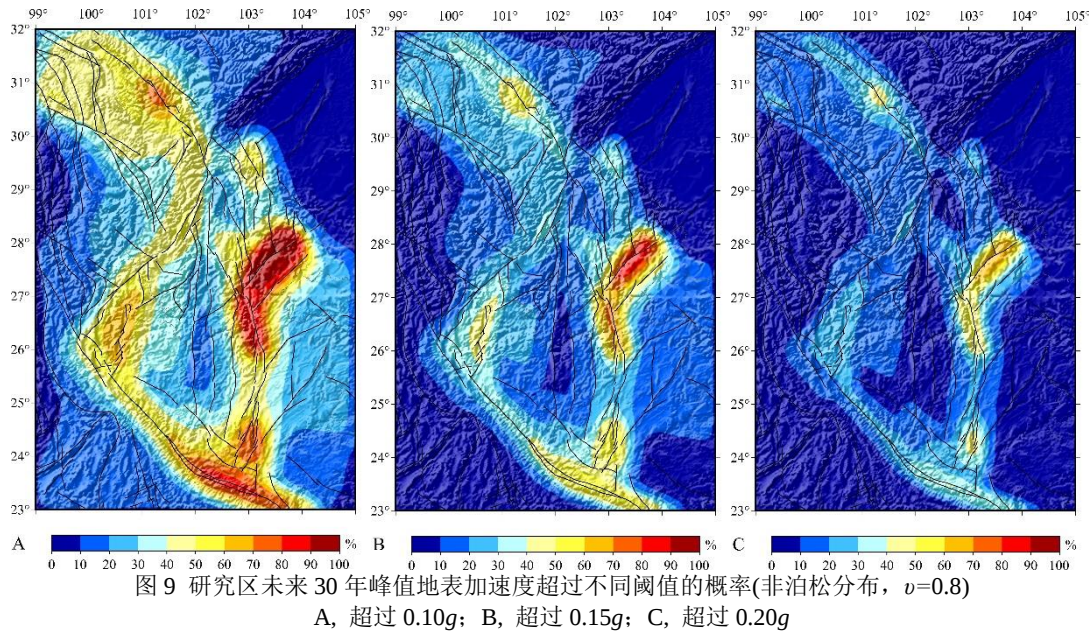
图 8 未来 30 年研究区不同震级范围地震产生峰值地表加速度超过 $0.15g$ 的概率(地震为泊松分布)

A, 5.0 级到 7.0 级地震; B, 7.0 级以上地震

2.2 非泊松分布情况

前人研究发现，地震活动在时间上的分布具有准周期性，即 v 在 0 和 1 之间，这种情况下，一段时间内地震发生的概率除与时段长度有关外，也受上次地震离逝时间影响，即地震刚发生后再次发生地震的概率较低，而随着离逝时间的增长，发生地震条件概率也逐渐升高。Ward 通过计算和对比指出，地震为泊松和准周期分布时，地震发生率的差别较小，但没有给地震准周期分布情况下的峰值地表加速度分布(Ward and Goes, 1993; Ward, 1994)。本研究通过收集相关资料，对川滇菱形块体及周边地区未来 30 年地震为准周期分布情况下峰值地表加速度的概率进行了计算。

前人研究表明，研究区内 1900 年以来的 5 级以上地震、1713 年以来的 6 级以上地震和 1500 年以来的 7 级以上地震是完整的(黄玮琼等, 1994)，因此，根据各震源区的地震复发周期和研究区的地震目录，对各震源区最大震级以下的地震，选择不同的起始时间确定其地震离逝时间，在此基础上，计算了川滇菱形块体及周边地区地震非泊松分布条件下未来 30 年的峰值地表加速度概率，结果如图 10 所示。对比地震为泊松与非泊松分布下川滇菱形块体及周边地区未来 30 年峰值地表加速度超过不同阈值的概率结果(图 6 和图 9)可以发现，在目标峰值地表加速度相同的情况下，二者超越概率的概率分布方式基本一致，但非泊松分布下概率较低(图 10)，这与大部分地区地震离逝时间较短而复发周期较长，导致地震发生的条件概率较低有关。



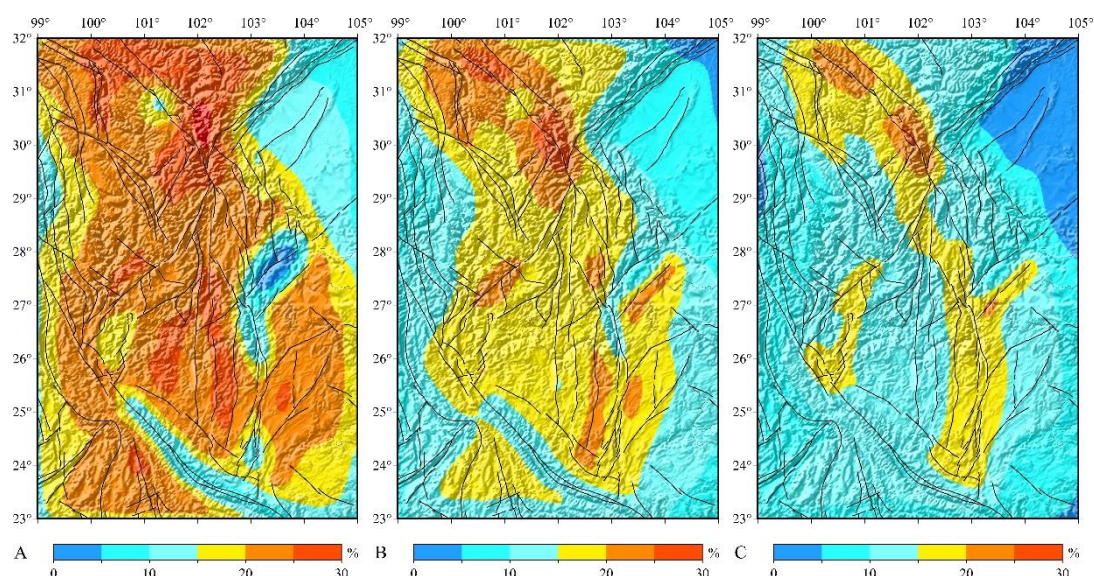


图 10 地震为泊松分布与准周期分布情况下研究区未来 30 年峰值地表加速度超过不同阈值概率的差(泊松分布减去准周期分布, $v=0.8$)

A, 超过 $0.10g$; B, 超过 $0.15g$; C, 超过 $0.20g$

结合图 6 与图 9 的结果可以发现, 未来 30 年, 鲜水河断裂带、小江断裂带、红河断裂带和小金河断裂带等川滇菱形块体的主要边界带出现高峰值地表加速度的概率较高, 尤其是块体东部边界的鲜水河断裂带、小江断裂带北段、小江断裂带南段和莲峰-昭通断裂带, 但安宁河断裂带、则木河断裂带和小江断裂带中段概率相对较低。

六、模型验证（测试）与精度评价

属于概率预测模型, 需要通过实际发生的地震进行验证。

七、模型使用说明

高峰值地表加速度区域可为川滇地区抗震设防提供参考。

八、应用案例

相关成果发表在《地球物理学报》上: 王芃, 邵志刚, 刘琦等. 2019. 基于多学科物理观测的地震概率预测方法在川滇地区的应用. 地球物理学报, 62(9): 3448-3463, doi: 10.6038/cjg2019M0359, 结果与数据已提交给实验场并应用于南北地震带中南段地震趋势会商中。