正演推算 1730年北京西郊地震的发震断层和滑动角*

周青云[1,2]，周仕勇[2]，陈棋福[1]，赵 里[1,3]，郑 钊[2]

（1. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036；2. 北京大学 地球与空间科学学院，北京 100871；
3. 台湾中央科学院地球科学研究所，中国台北 11529）

摘要：通过设定一定的标准，对 1730年发生在北京西郊 6½级地震的破坏记录进行数字化，得到地震在地表造成的实际破坏的定量分布图像；使用有限差分方法，计算出两条可能的发震断层——NE向的清河隐伏断层和 NW向的东北旺—小汤山断裂在滑动角为 0°和 90°时，在地表产生的加速度的分布。通过将峰值加速度分布图像与实际破坏程度定量分布图像进行拟合，推算出了两条可能发震断层在这次地震中的作用（权重）及滑动角，从而判断出此次地震的主要发震断层是东北旺—小汤山断裂。为增加结果的可信度，文中还讨论了不同的地表破坏程度数据化模型对拟合结果的影响。

关键词：历史地震；有限差分；震源参数；地面加速度；北京

中图分类号：P315.2 文献标志码：A 文章编号：1000－0666（2008）04－0369－08

0 前言

1730年 9月 30日（清雍正八年八月十九日），北京西郊发生了一次 6½级地震，震中位于 40.0°N 116.2°E附近，震中烈度为Ⅷ度。当时清朝政府对京城及周边乡镇的破坏情况进行了统计调查，列出了各村庄民居房墙颓塌数目清册共 6册，记录了 203个村镇的破坏情况。刘昌森（2003）和时振梁等（1992）曾引用过这些统计数据，本文中也会部分使用。

在所记录的 203个村庄的破坏记录中，由于历史变迁等原因，不少村庄已经消失、更名或合并，笔者通过对比《1730年 9月 30日北京西部地震》（时振梁等，1992）中的地图、地图网站 mapbar和 go2map、google earth、《中华人民共和国地名大辞典》（崔乃夫，1998）以及实地考察等方式，也只能得到较少地名的确切地理位置。因此，本文中只使用了那些能正确确定位置的统计数据点，共计 101个，约占总破坏记录数据的 50%。笔者通过一定的方法将这 101个点的破坏数据（包括房屋颓塌间数和墙壁颓塌堵数）转化为统一的相对破坏程度，再根据这些相对数据画出了 1730年地震的地表破坏程度分布图。

前人对这个地震有过相关的研究（环文林，1996；华金玉，2005），主要内容包括两个方面，一是震中烈度，二是震中位置和发震断层。在这几个问题上，前人有一定的共识：这次地震的震中烈度为Ⅷ度；震中位置为 40.0°N 116.2°E；可能的发震断层有两条，一是 NE向的清河隐伏断层（环文林，1996；时振梁等，1992），一是 NW向的东北旺—小汤山断裂（徐锡伟等，2002）。从地表破坏的等震线图可以看到，等震线基本为一个“T”字型，因此这次地震也有可能是两条断层共同作用的结果。前人的研究为我们较为清晰地展示了这次地震的一些基本信息，比如说可能的发震断层的位置和断层参数等，但是更为详细一些的震源信息却仍然没有结论，比如说哪一条是主要发震断层、断层的滑动角以及断层的破裂方式和破裂速度等。本文主要研究的是前两个问题，即此次地震的主要发震断层以及可能发震断层的滑动角。相对于破裂方式和破裂速度的反演，在具有相同地表破坏程度信息量的情况下，所获得的主要发震断层和断层滑动角的结果具有更高的可信度。笔者利用有限差分方法，分别计算了当前地质条件下，两条可能发震断层在滑动角为 0°

* 收稿日期：2008－06－17.
基金项目：国家自然科学基金（40774017，40521002）资助.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 90°情况下发生地震时将在地表产生的破坏，得到 4组数据；然后，计算出这四组数据通过组合与实际地表破坏最相近的解，来确定 1730年地震的主要发震断层和每条断层的滑动角。

1 数据采集和处理

1.1 地表实际破坏程度数据点的采集及其地理位置的确定

本文中的原始数据点是从时振梁等 （1992）文中的数据筛选得到的。

确定数据点位置的原则如下：

（1）所有经、纬度最终的数值都对应到 google earth上，精确到 0.001°。

（2）数据点定位：一是根据时振梁等 （1992）文中图 1所标示的相对位置确定；二是综合网络地图在线查询网站 mapbar和 go2map来综合确定；三是参考《北京地名典》（王彬，2001）；四是去当地向老人请教这些古地名，主要是西北一些比较偏僻的数据点。

（3）所查询出的地名应与记录的地名完全吻合，如“小煤厂”和“煤厂”就不能简单地认为是历史地名的变迁。

（4）前面所说的地名定位方法中，若有任意两种所查询出的地点一致，则认为该地名是所记录数据点的位置，否则不予采用。

在所列出的有记录的地名中，能够准确定位的有 101个 （表 1）。

表 1 地表数据记录点的实际破坏大小及其经纬度

地名	损坏度	东经 /(°)	北纬 /(°)	地名	损坏度	东经 /(°)	北纬 /(°)
芦草园	87	116.375 5	39.886	小屯村	1 400	116.249 9	39.965 7
南河沿	60	116.374 3	39.906 7	全王府	368	116.209 3	39.940 2
西直门外关厢	368	116.343 5	39.933 8	黑塔村	100	116.243 7	39.952 9
高粱桥西	90	116.295 5	39.929	槐树村	320	116.257 3	39.997 6
高粱桥南	81	116.301 6	39.922 6	道公府	600	116.241 3	39.999 2
黄庄	775	116.306 6	39.975 3	煤厂	396	116.214 2	39.999 2
北海淀买卖街	94	116.213	39.973 7	过街塔	1 245	116.193 3	39.973 7
双榆树	306	116.310 2	39.972 1	卧佛寺	304	116.225 3	40.005 5
西夹道	142	116.346	39.890 8	麻裕村	725	116.161 2	39.930 6
小西门	167	116.339 8	39.949 7	坡上村	564	116.279 5	39.997 6
篱笆房	144	116.322 6	39.954 5	檀峪村	404	116.177 3	39.975 3
两间房	170	116.328 7	39.954 5	石府村	230	116.167 4	39.962 5
白塔庵	1 065	116.316 4	39.968 9	黄土村	8 856	116.326 3	40.062 9
红庙	172	116.322 6	39.984 8	前八家村	202	116.322 6	40.005 5
六郎庄	2 622	116.283 2	39.972 1	后八家村	223	116.325	40.011 9
八沟	1 748	116.280 7	39.962 5	上清河	3 546	116.325	40.021 5
马厂	180	116.321 3	39.892 4	永泰庄	401	116.334 9	40.027 9
杨方店	888	116.309	39.894	安宁庄	1 298	116.306 6	40.042 2
朱家庄	124	116.272 1	39.906 7	朱房村	682	116.309	40.027 9
青塔村	40	116.265 9	39.889 2	唐家岭	2 198	116.288 1	40.058 1
半壁店	180	116.263 5	39.941 8	十方院	516	116.355 8	39.954 5
双槐树村	60	116.262 2	39.932 2	西英房	160	116.373	39.945
冉家村	536	116.258 5	39.949 7	蟒牛桥	320	116.342 3	39.976 8
小煤场	20	116.274 5	39.949 7	回龙观	3 474	116.321 3	40.059 7
南坞	1 094	116.269 6	39.956 1	东北旺	1 375	116.286 8	40.042 2
中坞	1 572	116.267 1	39.968 9	西北旺	5 635	116.272 1	40.032 6
蔡公庄	134	116.304 1	39.903 5	东流村	383	116.317 6	39.986 4
八里庄	329	116.289 3	39.925 8	西流村	1 120	116.312 7	39.986 4
万全庄	178	116.295 5	39.964 1	七里渠	1 973	116.315 2	40.104 4
五塔寺	25.5	116.318 9	39.945	大王河	939	116.238 8	40.110 7

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表 1

地名	损坏度	东经 /(°)	北纬 /(°)	地名	损坏度	东经 /(°)	北纬 /(°)
豆腐闸	261	116.267 1	39.941 8	周家巷	1 196	116.163 7	40.047
大佛寺	30	116.299 2	39.946 6	北安河	612	116.155 1	40.056 5
小南庄	350	116.294 2	39.959 3	石窝村	2 148	116.187 1	40.045 4
松林东	328	116.290 5	39.933 8	白家潭	5 788	116.201 9	40.035 8
南靛厂	192	116.277	39.957 7	西铺头	852	116.16	40.083 6
北坞	1 113	116.258 5	39.98	羊房村	1 208	116.379 2	40.032 6
模式口	555	116.185 9	39.930 6	树村后营	360	116.291 8	40.018 3
狼山	880	116.199 4	39.927 4	大井村	4	116.277	39.866 9
黄村	1 989	116.217 9	39.925 8	北手帕口	44	116.321 3	39.878
下庄	840	116.220 4	39.941 8	田各村	3	116.263 5	39.868 5
小屯	220	116.253 6	39.87	大屯村	0	116.258 5	39.876 4
小府	544	116.236 4	39.948 2	北辛安	8	116.197	39.913 1
福田寺	8	116.224	39.943 4	鲁姑村	40	116.241 3	39.894
杨家庄	636	116.206 8	40.032 6	古城村	40	116.206 8	39.900 3
西井儿	196	116.213	39.919 5	七里庄	4	116.283 2	39.854 1
田村	2 482	116.249 9	39.924 2	邓村	40	116.376 7	39.838 2
南新庄	200	116.225 3	39.949 7	曹家沟	1	116.386 6	39.835
北新庄	328	116.220 4	39.989 6	小红门	20	116.406 3	39.830 2
四府村东	584	116.232 7	39.989 6	郭家村	5	116.400 1	39.831 8
东小府村	832	116.251 1	40.002 4	广渠门	31.5	116.406 3	39.882 8

注：表 1中剔除了烈度异常点“安定门外关厢”。

1.2　居民点房、墙坍塌换算为地表损坏度

这些地震破坏记录点所记录的数据中有当时破坏所造成的房、墙倒塌的数目，但没有所记录村庄当时所有房屋的数目。由于农村人口的分布基本上是由当地自然条件决定的，这次地震的记录点基本都包含在一个 40 km×50 km的范围以内，所以，可以认为数据点所在村庄的房屋数量是有一定规律的。根据伯吉斯的同心圆理论和杜能的杜能圈模型，可以认为村镇居民点房屋数量是由紫禁城向外辐射递减的。由于本文中只考虑相对破坏程度，因此可以认为每个居民点房屋的数目都是一致的。

不同材料组成的房、墙，其抗震能力各不相同。一般来说，石板墙的抗震能力强于砖墙，砖墙强于土墙；石板房强于土房，土房强于瓦房。所谓瓦房，是指屋顶盖瓦的房子。

清朝政府对破坏情况的记录主要包括“房”的坍塌数目和“墙”的坍塌数目两大部分，因此需要选择一个标准来把二者统一起来。而老北京的房子以四合院居多，因此可以认为坍塌“一间房”等于坍塌“三至四堵墙”，本文中统一取为“四堵墙”。由此建立计算模型，得到地表的损坏度：

$$R=(\eta A+\kappa B+\lambda C)+4(\eta D+\kappa E+\lambda F).$$

式中，A、B、C分别表示坍塌的土墙、砖墙和石板墙数目；D、E、F分别表示坍塌的瓦房、土房和石板房数目。这里的 η、κ、λ为权重系数，与建筑物的抗震系数有关。本文取 η＝1，κ＝5，λ＝10。也可取其它的权重，但只要满足 η<κ<λ，所得到的等损坏度图不存在大的差异，关于这一点，在后面将作进一步讨论。地表实际损坏度的原始资料见时振梁等（1992）的文章，损坏度计算结果见表 1。

1.3　震源地理位置的确定

建国以来，我国的地质地震学者通过多种手段，已经获得了北京地下断层的分布情况。环文林（1996）和华金玉（2005）等对 1730年地震的两条可能发震断层的地理位置进行了推断：

F1：NE向清河隐伏断层，走向 55°，倾角 69°，断层几何中心为（116°17′50″N，40°2′8″E，10 km）。全长约 15 km。

F2：东北旺—小汤山断裂，走向 315°，倾角 70°，断层几何中心为（116°16′10″N，40°3′4″E

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

9 km)。全长约 10 km。

根据破裂长度和震级大小的经验关系 (龙锋, 2006): M=3.821+1.8601gL, 一个 6½级地震的破裂长度约为 31 km, 考虑到历史地震震级的精确度不高, 所以这两个断层的选择是可以接受的。

2 理论地表破坏度的计算

为了确定两条断层在 1730年地震中的主次关系, 以及两条断层破裂时各自的滑动角, 笔者把主要计算过程分为 4个单元:

(1) 计算 F_1断层滑动角为 0°时 (完全走滑断层) 在地表产生的速度场;

(2) 计算 F_1断层滑动角为 90°时 (完全逆断层) 在地表产生的速度场;

(3) 计算 F_2断层滑动角为 0°时在地表产生的速度场;

(4) 计算 F_2断层滑动角为 90°时在地表产生的速度场。

为了减少计算量, 同时又尽可能地保证计算结果的可信度, 我们将每个断层都看做是一个点源, 点源的中心在断层的几何中心上, 点源的震源参数与断层的震源参数一致。再有地下地质构造的函数, 通过卷积就可以得到地表的速度场了。

计算地表理论速度的方法采用了有限差分方法, 有限差分方法是数值模拟最早采用的方法, 至今仍被广泛运用。它将进行计算的 BOX划分为差分网格, 用有限个网格节点代替连续的求解域。有限差分法以 Taylor级数展开等方法, 把导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散, 从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组 (Graves, 1996)。该方法是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。

考虑到实际地震在地表造成破坏的记录点的地理位置, 本文中将用于有限差分计算的 BOX取为

[116.14° 39.78° 0 km]
[116.55° 40.15° 30 km],

划分的网格为 200 m×200 m×200 m, 以保证 101个数据点不会出现重叠的情况。总计算时间取为 20 s, 这样能保证所有能对地表造成较大灾害的波都能到达地面。进行计算的时间步长 dt取为 0.01 s, 以保证算法的稳定性。使用 Olsen (1994) 编写的有限差分计算程序进行计算。

4个单元的计算完成后, 将 101个数据点的理论计算结果提取出来。

3 计算结果的处理

计算的结果是地表 (depth=0) 上每一点在时间步长 0.01 s情况下, 20 s内地表速度 3个分量的变化情况。通过这些速度值可以计算出该点加速度的变化, 而加速度最大值的大小和地表烈度成正相关, 所以, 我们可以通过计算地表加速度最大值分布图来得到理论地表破坏程度的分布。

3.1 将计算结果处理为地表最大加速度

程序求加速度的时候采用的是加速度的一阶近似 dv/dt, 首先计算出时间步长 0.01 s下 20 s内某数据记录点加速度 3个分量的大小, 然后找出 20 s内地表该数据点绝对值最大的加速度作为该点产生最大破坏的加速度 (表 2)。图 1为 F_1、F_2断层不同滑动角时在地表产生的加速度场 (数值仅表示相对大小)。

表 2 地表数据点 4种情况下的理论加速度

地名	地表加速度				地名	地表加速度			
	F_1断层		F_2断层			F_1断层		F_2断层	
	rake=0°	rake=90°	rake=0°	rake=90°		rake=0°	rake=90°	rake=0°	rake=90°
	a_1	a_2	a_3	a_4		a_1	a_2	a_3	a_4
芦草园	2.8598	2.16	2.5997	1.29523	全王府	3.6642	1.74	2.60213	1.7622
南河沿	3.2195	1.44	2.6931	2.2384	黑塔村	3.1076	2.73	2.77295	2.77009
西直门外关厢	2.8103	1.18	3.50411	2.12951	槐树村	2.6646	3.94	2.69164	6.18722
高粱桥西	2.0214	2.08	3.01219	2.25729	道公府	2.9639	3.4	2.41081	6.0428
高粱桥南	1.9354	1.91	2.89227	2.11929	煤厂	3.2673	2.64	2.71623	5.06042
黄庄	1.9916	4.24	4.31263	4.3925	过街塔	3.9491	1.93	3.15616	2.42199
北海淀买卖街	3.7789	2.46	3.07609	3.07061	卧佛寺	2.9939	2.83	2.23039	6.08041

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表 2

地名	地表加速度				地名	地表加速度			
	F_1 断层		F_2 断层			F_1 断层		F_2 断层	
	rake= 0°	rake= 90°	rake= 0°	rake= 90°		rake= 0°	rake= 90°	rake= 0°	rake= 90°
	a_1	a_2	a_3	a_4		a_1	a_2	a_3	a_4
双榆树	2. 029 6	4. 06	4. 365 83	4. 109 27	麻裕村	3. 830 2	1. 2	2. 171 1	1. 387 34
西夹道	2. 450 3	1. 73	2. 504 52	1. 953 22	坡上村	1. 982 3	4. 58	3. 376 72	6. 141 01
小西门	2. 596 6	1. 66	3. 999 21	2. 666 44	檀峪村	3. 912 7	1. 53	3. 208 55	2. 132 76
篱笆房	2. 140 8	2. 57	4. 032 42	3. 112 01	石府村	4. 049 3	1. 3	3. 003 71	1. 727 07
两间房	2. 281 5	2. 36	4. 093 96	3. 023 47	黄土村	2. 507 7	2. 98	4. 710 06	2. 543 36
白塔庵	2. 074 2	3. 8	4. 413 2	3. 832 68	前八家村	0. 596 3	5. 01	4. 261 59	5. 024 65
红庙	1. 502 6	4. 44	4. 633 93	4. 448 76	后八家村	0. 477 1	5. 04	4. 037 6	4. 848 53
六郎庄	2. 596 2	4. 09	3. 711 9	4. 399 75	上清河	0. 702 3	4. 91	3. 740 16	4. 600 77
八沟	2. 681 8	3. 65	3. 568 15	3. 786 26	永泰庄	1. 318 4	4. 77	3. 616 92	3. 949 03
马厂	1. 937 8	1. 71	2. 602 72	2. 122 62	安宁庄	1. 988 2	3. 48	3. 513 62	4. 086 54
杨方店	1 794	1. 77	2. 682 88	2. 047 1	朱房村	1. 186 4	4. 38	3. 333 95	5. 022 25
朱家庄	1 931	2. 02	2. 887 82	1. 729 44	唐家岭	3. 056 4	1. 92	3. 748 23	3. 605 79
青塔村	1. 873 6	1. 96	2. 454 59	1. 995 89	十方院	2. 945	1. 41	4. 167 89	2. 601 3
半壁店	2. 421 5	2. 55	2. 662 94	2. 669 47	西英房	3. 347 7	1. 16	3. 768 65	2. 111 4
双槐树村	2. 426 5	2. 31	2. 734 95	2. 268 35	蟒牛桥	2. 067 3	3. 82	4. 706 36	3. 616 72
冉家村	2 679	2. 81	2. 875 9	2. 898 81	回龙观	2. 486 2	2. 92	4. 625 56	2. 632 74
小煤场	2. 442 4	2. 89	3. 024 21	3. 035 5	东北旺	2. 407 8	2. 79	2. 813 88	5. 289 36
南坞	2. 701 5	3. 13	3. 159 57	3. 238 67	西北旺	2. 359 9	2. 89	1. 808 97	6. 632 22
中坞	2. 972 9	3. 75	3. 320 13	4. 074 17	东流村	1. 413 8	4. 55	4. 574 77	4. 681 7
蔡公庄	1. 726 2	1. 83	2. 920 88	1. 834 29	西流村	1. 455 3	4. 59	4. 503 84	4. 848 87
八里庄	2. 026 3	2. 07	2. 873 38	2. 167	七里渠	2. 764 1	2. 41	5. 641 4	3. 945 96
万全庄	2. 417 8	3. 77	3. 914 66	3. 874 49	大王河	4. 663 9	3. 52	3. 610 24	3. 611 76
五塔寺	2 049	2. 09	3. 675 81	2. 795 68	周家巷	1. 431 5	2. 6	3. 407 37	4. 416 38
豆腐闸	2. 360 6	2. 55	2. 679 55	2. 688 49	北安河	1. 376 2	2. 87	3. 673 85	3. 948 29
大佛寺	1. 969 1	2. 55	3. 357 74	2. 986 07	石窝村	1. 922 2	2. 44	3. 367 34	5. 780 84
小南庄	2. 380 5	3. 44	3. 782 9	3. 532 11	白家潭	2. 506 2	2. 3	2. 721 33	6. 315 9
松林东	2. 053 9	2. 26	3. 011 38	2. 438 58	西铺头	2. 762 3	3. 5	4. 460 1	3. 854 47
南靛厂	2. 655 6	3. 3	3. 353 13	3. 397 15	羊房村	2. 714 4	4. 1	2. 625 73	3. 238 74
北坞	2. 983 9	3. 97	3. 254 71	5. 022 12	树村后营	1. 316 6	4. 36	2. 986 88	6. 164 44
模式口	3. 728 1	1. 37	2. 246 85	1. 306 96	安定门外关厢	1. 357 5	2. 33	2. 037 73	1. 757 81
狼山	3. 541 6	1. 56	2. 215 83	1. 329 25	大井村	1. 625	1. 8	1. 543 68	1. 473 62
黄村	3. 212 3	1. 81	2. 315	1. 592 31	北手帕口	1. 839 1	1. 94	1. 935 45	1. 447 96
下庄	3. 484 4	1. 98	2. 606 33	2. 002 75	田各村	1. 719 1	1. 79	1. 531 76	1. 469 33
小屯	1. 820 5	1. 78	1. 527 37	1. 489 88	大屯村	1. 909 2	1. 84	1. 660 92	1. 683 99
小府	3. 241 5	2. 45	2. 628 27	2. 548 32	北辛安	3. 179	1. 65	2. 271 13	1. 205 96
福田寺	3. 449 9	2. 1	2. 622 43	2. 162 99	鲁姑村	2. 178	1. 97	2. 501 06	1. 808 65
杨家庄	2. 628 6	2. 25	2. 477 17	6. 405 25	古城村	2. 654 7	1. 79	2. 350 69	1. 633 76
西井儿	3. 102 3	1. 81	2. 295 6	1. 456 75	七里庄	1. 327 1	2. 24	1. 727 54	1. 803 99
田村	2 448	2. 14	2. 638 58	1. 966 84	邓村	1. 542 1	2. 53	2. 245 37	1. 740 76
南新庄	3 548	2. 27	2. 697 52	2. 398 34	曹家沟	1. 495 4	2. 41	2. 339 34	1. 633 47
北新庄	3. 449 4	2. 83	2. 837 98	4. 478 25	小红门	1. 287 6	2. 29	2. 340 92	1. 243 11
四府村东	3. 281 6	3. 3	2. 764 78	5. 154 47	郭家村	1. 356 9	2. 32	2. 369 95	1. 359 9
东小府村	2. 647 6	3. 7	2. 290 8	6. 387 95	广渠门	3. 008 3	2. 76	3. 277 55	1. 442 66
小屯村	3. 211 7	3. 35	3. 085 09	3. 698 36					

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

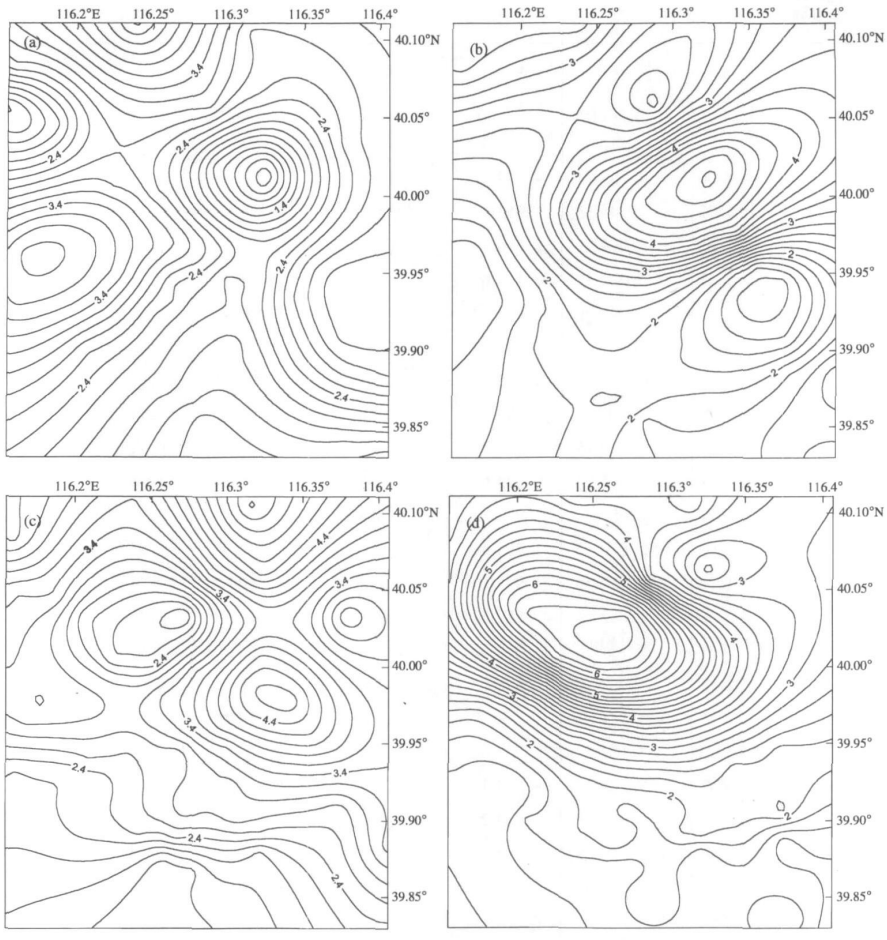


图 1 不同断层不同滑动角时在地表产生的加速度场

(a) F_1 断层滑动角为 0°时; (b) F_1 断层滑动角为 90°时; (c) F_2 断层滑动角为 0°时; (d) F_2 断层滑动角为 90°时

3.2 拟合得出最优解

地表 101个数据点的 4个加速度 $a_1 \sim a_4$ 的数值都计算出来后, 由表 1中的 100个点进行拟合。拟合的方法是:

$$a = \sum_{i=1}^{100} [A - (\eta a_{1i} + \upsilon a_{2i} + \kappa a_{3i} + \lambda a_{4i})]^2.$$

式中, i 为数据点的编号; a_1, a_2, a_3, a_4 分别对应表 2所列断层模型在 i 点产生的理论地面峰值加速度。找出适当的权重, 使所求 a 达到最小。在拟合时, 为了计算方便, 我们将 $a_1 \sim a_4$ 都乘以 10^{15}, 以避免出现

$$[A - (\eta a_{1i} + \upsilon a_{2i} + \kappa a_{3i} + \lambda a_{4i})]^2 \approx A^2$$

的情况。这种情况的出现会严重影响拟合结果的可信度与稳定性。为了减小计算量, 限定 η, υ, κ, $\lambda \in C[-40, 40]$。

经过计算, 得到最优解为 $\eta = -5$, $\upsilon = -32$, $\kappa = 24$, $\lambda = 33$; F_1 断层和 F_2 断层的滑动角:

$$\text{rake}_1 = \arctan[-32/(-5)] - 180 = -98.9°,$$
$$\text{rake}_2 = \arctan(33/24) = 54.0°.$$

1730年地震中, 两条断层的贡献为

$$P_1/P_2 = \sqrt{(-32)^2 + (-5)^2}/\sqrt{33^2 + 24^2} = 0.79/1,$$

所以, 1730年地震中的主要发震断层是 F_2 断层, 即东北旺—小汤山断层。

拟合后的理论地表等破坏图和真实地表等破坏图见图 2。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

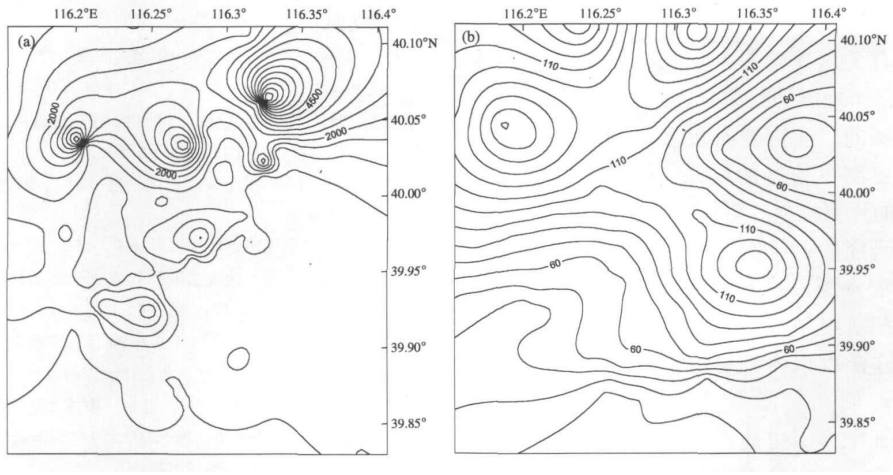


图 2　拟合后的理论地表等破坏图 （a） 和实际记录的地表等破坏图 （b）

4　讨论

前面在建立地表实际破坏程度的模型时，我们曾使用过

$$R=(\eta A+\kappa B+\lambda C)+4(\eta D+\kappa E+\lambda F).$$

计算中，取 $\eta=1$、$\kappa=5$、$\lambda=10$。若取其它的权重，并且满足 $\eta<\kappa<\lambda$，是否会得到不同的结论呢？

瓦房和土房到底谁的抗震能力更强，这个不能简单地一概而论。当 η、κ、λ的值分别取为 1、5、10时，实际是肯定了土房的抗震能力远强于瓦房，但这是不严格的。而且，由图 2可以看出，因为 λ的数值过大，造成实际地表等破坏图上有不少尖锐点。所以，我们取 η、κ、λ值为 1、2、4来拟合理论和实际的地表破坏情况，结果发现，所得到的实际等破坏图比取为 1、5、10时更加平滑和规律。为了得到更高可信度的数据解释，我们取关系式

$$R=(A+5B+10C)+20D+20E+40F.$$

将 3种不同模型下计算拟合的数据列入表 3。

表 3　不同地表实际破坏状况模型下所得到的拟合常数

瓦房	土房	石板房	土墙	砖墙	石板墙	a_1	a_2	a_3	a_4	rake$_1$	rake$_2$	$F_1:F_2$
4	20	40	1	5	10	−5	−32	24	33	−98.881	53.973	0.793 7
4	8	16	1	2	4	−2	−13	10	14	−98.746	54.462	0.764 5
20	20	40	1	5	10	1	−11	9	13	−84.806	55.305	0.698 6

从表中可以看出，F_1断层是一个近似的正断层，而 F_2断层是一个滑动角为 54°左右的走滑断层。在这次地震中，F_2断层是发震断层，并占据了主导地位。比较不同模型的结果，可以看出我们获得的结果是基本稳定的。

5　结论

自第四纪以来，北京地区地下应力场为右旋，因此不少人将 1730年这次地震的发震断层定为右旋走滑断层，但是本文的研究结果却否定了这一猜测。研究结果显示，F_1断层主要为一个正断层，F_2断层（即 NW向的东北旺—小汤山断层）是一个包含了走滑分量和倾滑分量的断层，F_2断层破裂造成的地表破坏的贡献约占总破坏的 60%，因而是此次地震的主要发震断层，这一点从表 3可以清晰地看出。

对历史地震详细震源参数的确定，是在当今地区地质构造清晰明了的情况下，利用有限的历史地震记录，通过正演或者反演得出的结果，因此历史记录的详细程度在极大程度上影响了震源参数推断结果的可信度。1730年的北京西郊 6½级地震，由于当时清朝经济比较繁荣，因此记录得很详细，虽然由于历史变迁等原因导致可以使用

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的信息点的数量减少，但是也足够我们通过计算来得到一些有关这次地震的信息。如果要想通过计算来得到这个地震的破裂方式，估计仅仅101个数据点是不够的，还需要有更多可用的数据，才能得到具有更高可信度的结果，同时，也需要计算能力更强的计算机或者更多的计算机。

在本文研究中，我们把两个可能的发震断层都看作是一个点源，如果要追求更高的精度和可信度，可以把断层划分为若干段，每段的滑动角依然一样，这样可以得到更好的精度，但是也会增加计算量。

本文的研究为历史地震研究找到了一条新的途径，有利于对历史地震震源参数的研究，有利于掌握当今地下应力状况下地震的部分规律。

由于历史记录数据的稀少和历史的变迁，对历史地震震源参数的研究，其结果有较大的不确定性，也容易引起争议，不过作为一家之言它仍然是有一定意义的。

参考文献：

崔乃夫. 1998. 中华人民共和国地名大辞典（第一卷）[M]. 北京：商务印书馆.

华金玉. 2005. 1730年北京西郊6½级地震发震构造讨论 [J]. 北京大学学报，41（4）：530－535.

环文林. 1996. 1730年北京圆明园地震 [J]. 地震研究，19（3）：260－266.

刘昌森. 2003. 中国历史地震资料拾遗 [M]. 北京：地震出版社.

龙锋. 2006. 华北地区地震活断层的震级－破裂长度、破裂面积的经验关系 [J]. 地震地质，28（4）：511－535.

时振梁，环文林. 1992. 1730年9月30日北京西北部地震 [M] // 时振梁. 中国地震考察. 北京：地震出版社：43－58.

王彬. 2001. 北京地名典 [M]. 北京：中国文联出版公司.

徐锡伟，吴卫民，张先康，等. 2002. 首都圈地壳最新构造变动与地震 [M]. 北京：科学出版社.

Graves R W. 1996. Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences [J]. BSSA, 86（4）：1091－1106.

Olsen K B. 1994. Simulation of three-dimensional wave propagation in the Salt Lake Basin [D]. Salt Lake City: University of Utah.

Forward Inference of the Causative Fault and the Slip Angles of the Faults of the 1730 Western Beijing Earthquake

ZHOU Qing-yun[1,2], ZHOU Shi-yong[2], CHEN Qi-fu[1], ZHAO Li[1,3], ZHENG Zhao[3]

(1. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

(2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

(3. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei 11529, China)

Abstract

In 1730 AD, an earthquake with magnitude 6½ occurred in the western suburb of Beijing. The then government of Qing Dynasty dispatched persons to investigate and record the damages in Beijing and surroundings caused by the earthquake. In this paper, through setting up some standards, we quantify the damage records of the earthquake and obtain the distribution of the damage intensity. We use finite-difference method to calculate the ground accelerations caused by two possible seismogenic faults (NE-trend Qinghe concealed fault and NW-trend Dongbeiwang-Xiaotangshan fault) for the given rake angle of 0° and 90°. By comparing and fitting the spatial distribution of the calculated peak ground acceleration with that of the damage intensity obtained from the historical records, we estimate the relative contribution of the two faults and their rake angles, and refer that the main seismogenic fault is the Dongbeiwang-Xiaotangshan fault. Since the results may be dependent on the models applied to quantifying the damage records, we experiment with different models to assess their effect on the results.

Key words: historical earthquake; finite-difference method; fault parameter; ground acceleration; Beijing

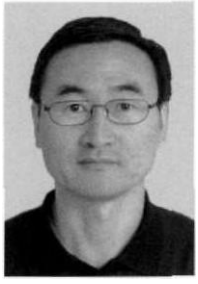
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



刘　杰　中国地震局台网中心研究员。1986年毕业于北京大学地球物理系，获学士学位；1989年毕业于北京大学地球物理系，获硕士学位；1998年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。目前从事地震预报和地震活动研究。



王海涛　新疆地震局研究员，中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地客座研究员。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1999年毕业于中国地震局地球物理研究所，获地震学专业博士学位。中国地震学会理事，新疆地震学会理事长。主要从事地震综合预报研究。



许建东　中国地震局地质研究所研究员。1983年毕业于北京大学地质系，获学士学位；1998年获美国纽约州立大学布法罗分校地质系博士学位。现为中国地震学会终身会员，美国地质学会（GSA）会员，联合国灾害评估与协调委员（UNDAC)。目前的主要研究领域为火山地质、火山灾害、地震应急与救援。



刘耀炜　中国地震局地壳应力研究所研究员。1982年毕业于中国地质大学（武汉）地震地质专业。主要从事地下流体与强震前兆机理、地下流体观测技术与地震预测方法等研究。中国地震局科技委委员，中国地震局地下流体学科技术协调组组长，中国地震学会地震流体专业委员会主任。



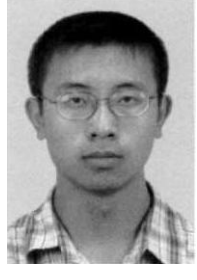
苏有锦　云南省地震局研究员。1986年毕业于云南大学地球物系，获学士学位；1991年毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震学和地震预测预报研究。



吴小平　云南大学资源环境与地球科学学院教授。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1988年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获硕士学位；2000年毕业于中国科学院云南天文台，获博士学位。主要从事地震学、岩石力学、重力学与固体潮、地球动力学的教学与科研工作。



崔庆谷　云南省地震局高级工程师，2002年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。主要从事地震及前兆观测技术研究工作。



周青云　中国地震局地震预测研究所在读硕士研究生。2008年毕业于北京大学地球物理专业，获学士学位。主要从事震源过程、地震定位及地震活动性分析研究。

注：皇甫岗、秦嘉政、付虹、钱晓东、张建国、崔建文、毛先进、杨润海、毛玉平等人的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30, No.3; Vol.28, No.4; Vol.30, No.1; Vol.29, No.1; Vol.29, supp; Vol.29, No.4; Vol.31, No.2; Vol.29, No.4; Vol.30, No.3。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net