

* 博士后研究 *

1997年伽师强震群生成机理研究*

周仕勇¹ 许忠淮² 陈晓非¹

1. 北京大学地球物理系, 北京 100871; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 应用改进了的主地震定位法对1997年伽师强震群进行了重新定位,发现伽师强震群5级以上中强地震成明显的北北西右阶雁形分布,由此推断在伽师震源区可能存在一北北西向的发震构造. 研究震群的平均震源机制解表明:伽师震源区平均P轴方向为北北东向,平均T轴方向为近东西向,平均B轴方向是近直立的,由地震产生的震源区构造变形是近南北向发生压缩、近东西向发生相对扩张. 分析伽师震群主要地震的震源谱发现,伽师震群地震的应力降显著偏低,这可能是伽师震群长时间活动的主要原因之一. 最后对发生在一组右阶雁形构造上的震群各事件间的相互作用进行了讨论,指出发生右阶雁形构造中的地震的应力降偏低是可能的.

关键词 伽师强震群 地震精定位 发震构造 震群生成机理

1997年发生在新疆伽师的强震群迄今仍在持续活动中,从1997年1月21日震群发生至1998年8月,其间共发生6级以上地震9次. 伽师震群发生在相对稳定的塔里木块体的边缘,在这种相对稳定的内陆地区的一个狭小的范围内,短时间丛集发生这么多强震的现象,20世纪有仪器记录以来在我国是未有过的. 伽师强震群的发生引起了国内、外地球物理学家和地质学家的广泛关注. 已有学者从伽师震群区的深部构造特征方面探讨了伽师地震的成因. 例如,文献[1]认为伽师震群的发生可能与震源区地壳内存在低速带有关;文献[2]利用在伽师震群区及其周围获得的大量宽频带数字地震资料研究了该地区地壳、上地幔三维S波速度结构,指出伽师震群处于莫霍面深度陡变梯度带的上方,其发生可能与震源区附近的隐伏断裂带有关. 虽然深部构造特征提供了地震发生的背景构造条件,但伽师地震的具体发震构造特征怎样,为什么会发生多次强震,这仍是一个有待研究的问题.

伽师强震群发生在印度与欧亚板块喜马拉雅山碰撞带的西端,帕米尔弧束区的东北侧,规模巨大的塔拉干-费尔干纳断裂带呈北西-南东方向横切而过,将天山分为东、西天山. Burtman等^[3]的研究表明,该断裂带在前苏联境内晚第四纪仍有强烈的活动,但进入我国境内后,其延伸及活动情况一直不很清楚. 据石油物探资料,在塔里木块体西端巴楚至喀什以西一带深部发育一组北西或北北西向断裂¹⁾,这组断裂是否属塔拉干-费尔干纳断裂带系,与伽师强震群

2000-08-10 收稿, 2001-02-15 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划《大陆强震机理与预测》项目资助(批准号: 95130504)

1) 陈杰, 等. 伽师强震群区与帕米尔东北侧地震地质构造环境研究. 中国地震局地质研究所课题研究报告, 2000, 论著号: 2000J0027

的发震构造有否关系? 值得研究.

用精确的定位方法对地震序列进行重新定位是寻找地震的发震构造最为实用的方法之一, 近年国际上多采用精确定位法推断地震的发震构造^[4,5]. 伽师震群区大量余震的空间分布及地震的震源机制特征为我们研究伽师地震发震构造提供了重要根据. 本文试图在对伽师震群进行精确定位的基础上, 通过综合分析其大震震源机制和震源谱, 推断其发震构造, 并提出力学模型, 探讨多次发生强震的原因, 以加深对伽师强震群生成机理的认识.

1 主地震法定位及发震构造推断

主地震定位法是一种相对定位法, 其基本原理是选定一震源位置较为精确的主地震, 计算发生在其周围的一群地震相对于它的位置, 进而确定这群地震的震源位置. 由于主地震定位法对所假设的地壳模型依赖较小, 可避免地壳横向不均匀对地震定位的影响, 因而地震相对位置能定得较精确.

用于计算地震位置的基本方法为

$$T_{ij} - T_{im} = T_{oj} - [L_j \cos(S_{ij})/V_{im}], \quad (1)$$

其中 T_{ij} 及 T_{im} 分别表示第 i 台第 j 个地震 P 震相(或 S 震相)的到时及第 i 台主地震 P(或 S)震相的到时; T_{oj} 为第 j 个地震与主地震发震时刻之差. L_j 为主地震与第 j 个地震间的标量距离; S_{ij} 为相对位置向量与第 i 台射线路径间的夹角; V_{im} 是主地震直达 P(或 S)波到 i 台的平均速度. 这个方法假设地震间的距离 L_j 比台源距小得多. 当震源区足够小时, 射线路径的曲率可以忽略, 即满足 Fraunhofer 近似, 则(1)式成立.

注意到(1)式 T_{oj} 中隐含待定地震的发震时刻未知量, 考虑到本研究的重点是通过地震的空间位置的精确定位, 推断伽师震群的可能发震构造, 为了消除(1)式中发震时刻未知量, 本文引入设立参考台的思想. 取定位台网中任一台站为参考台(不失一般性, 取参考台号为 R), 则由(1)式可求得

$$(T_{ij} - T_{Rj}) - (T_{im} - T_{Rm}) = L_j(\cos(S_{Rj})/V_{Rm} - \cos(S_{ij})/V_{im}), \quad (2)$$

(2)式已消除了发震时刻未知量的影响.

因为直达波走时对震源深度变化的敏感性不高, 为了加强对震源深度解的约束, 我们拟用折射波到时专门确定震源深度. 考虑主地震定位只与震源区附近的地壳结构有关, 可采用单层水平层地壳模型近似. 由折射波走时方程^[6]可推得

$$\delta h_j = (\delta \Delta_{ji}/V_{2S} - \delta \Delta_{ki}/V_{2P} - \delta T_{Sji} + \delta T_{Pki})/(\cos i_S/V_{1S} - \cos i_P/V_{1P}), \quad (3)$$

式中 δh_j 为待定地震 j 震源深度与主地震震源深度差; $\delta \Delta_{ji}$ 为待定地震 j 到观测台 i 的震中距与主地震到观测台 i 的震中距差; $\delta \Delta_{ki}$ 为待定地震 k 到观测台 i 的震中距与主地震到观测台 i 的震中距差; δT_{Sji} 为地震 j 与主地震的 S_n 波到观测台 i 的走时差; δT_{Pki} 为地震 k 与主地震的 P_n 波到观测台 i 的走时差; V_{1P} 和 V_{1S} 为地壳层 P 和 S 波的平均速度; V_{2P} 和 V_{2S} 为上地幔顶层 P 和 S 波速度; $i_P = \sin^{-1}(V_{1P}/V_{2P})$, $i_S = \sin^{-1}(V_{1S}/V_{2S})$, 为 P 和 S 波在壳、幔界面的全反射角.

注意在(3)式中不含未知的地壳厚度, 因而消除了需设定地壳厚度的传统绝对定位方法中, 因对地壳厚度设定的不准确而造成的定位误差. 但用(3)式计算震源深度, 需读取较为准确的 P_n , S_n 波到时.

利用上述方法,对伽师震群 1997 年发生的 391 个 $M_s3.0$ 以上地震的重新定位表明, 1997 年伽师震群主要集中活动在一个 30 km (南北) $\times 15\text{ km}$ (东西) 的狭小范围中,震源深度集中在 $(20 \pm 5)\text{ km}$ 的中地壳, $M_s \geq 5.0$ 地震成明显的北北西右阶雁形分布(图 1),由此推断在伽师震源区可能存在一北北西向的发震构造. 这与刘启元用高密度数字地震台阵对伽师震源区基底的研究和张先康的深地震宽角反/折射剖面深部结构的探测结果是吻合的^[2,7],伽师震群的发震构造与石油物探资料在塔里木块体西端巴楚至喀什以西一带发现的深部北西或北北西向断裂组排列方向一致,表现出它们间密切相关.

2 震源机制解及震源破裂特征分析

根据哈佛大学网上发布的伽师地震的中心矩张量反演结果^[8],采用本文的定位结果,绘制出 1997 年伽师震群 5 级以上强震的震源机制

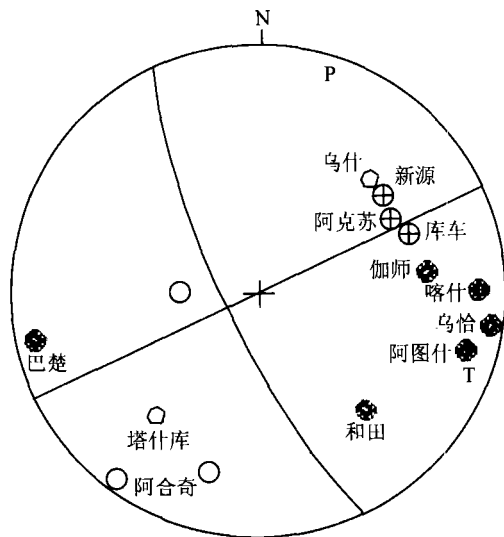


图 2 伽师震群的平均震源机制解

图中○为地震台在震源球上的投影;P轴方位角 19° ,倾角 8° ;T轴方位角 110° ,倾角 9° ;⊕,地震台所记录的伽师震群地震的初动基本为“+”;⊙,地震台所记录的伽师震群地震的初动“-”基本各半;○,地震台所记录的伽师震群地震的初动基本为“-”

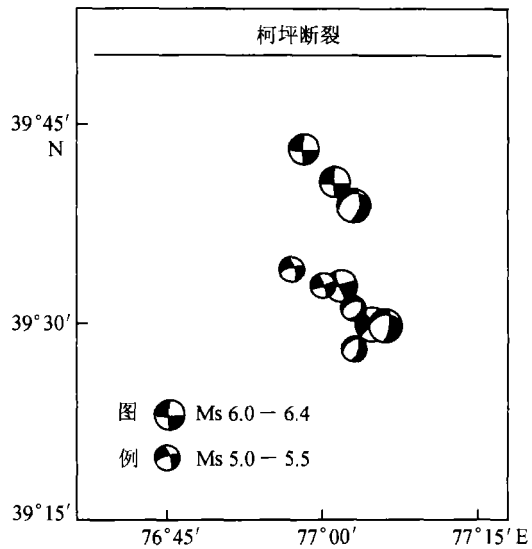


图 1 1997 年伽师震群 $M_s5.0$ 以上地震的震源机制
空白象限为膨胀波,填充象限为压缩波

制图(图 1). 伽师地震的震源机制是以走滑为主,部分地震是正断层机制,未发现逆冲机制地震. 所有已作出的伽师震群地震的震源机制大体上显示走滑为主兼含正倾滑分量的总特征.

包含可能滑动方向的一对节面解中,既含有构造应力场的信息,也可能含有局部介质不均匀结构的影响. 仔细分析图 1,可以看到该震群不同地震间的震源机制的节面走向和倾滑分量等存在一定差异. 这说明这些地震的局部结构是存在差异的. 为了推断震源区区域构造应力场的总体特征,我们根据新疆区域台网记录的大量伽师震群地震的 P 波初动方向资料,计算伽师震群多个地震的平均震源机制解.

图 2 示出我们应用文献^[9]的方法,用新疆区域台网 12 个地震台记录的伽师震群 355 次地震(发生在 1997 年 1 月 21 日~12 月 31 日)的总计 2177 个 P 波初动方向,计算的伽师震群的平均震源机制解. 由此平均震源机制

解推断的伽师震源区应力场平均 P 轴方向为北北东向,平均 T 轴方向为近东西向,平均 B 轴方向是近直立的. 由地震产生的震源区的构造变形是近南北向发生压缩、近东西向发生相对扩张. 这与许忠淮等^[10]所绘制的新疆西部构造应力图是一致的. 需指出的是,为了追踪震群活动过程中震源区构造应力场是否变化,我们计算不同时段伽师震群地震的平均震源机制解,结果表明其平均震源机制解 P 轴和 T 轴的最大方位角变化小于 15°,由此推测伽师震群发生过程中,震源区一直处于基本稳定的构造应力场中.

为了测定更多的震源参数,研究伽师震群的破裂特性,我们搜集了全球数字地震台网(GDSN)16 个台记录的 12 次伽师 $M_s \geq 5.0$ 地震,总计 172 条宽频带波形记录,进行震源谱分析.

单新建等研究表明伽师震群地震震源的破裂面接近为圆盘形¹⁾, Silver^[11]导出 P 波、S 波位移振幅谱全方位上的平均拐角频率 $\bar{\omega}_c(P)$, $\bar{\omega}_c(S)$ 与震源破裂尺度关系在圆盘破裂面为

$$\bar{\omega}_c(P) = 2.828(2r^2/3\alpha^2 + 2r^2/9V_r^2)^{-1/2}, \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_c(S) = 2.828(2r^2/3\beta^2 + 2r^2/9V_r^2)^{-1/2}. \quad (5)$$

式中 α , β 分别为震源附近介质的 P 波、S 波的传播速度, V_r 为断层面上破裂的传播速度; r 为震源的等效圆形破裂面的半径.

对圆盘形破裂面,其静态应力降 $\Delta\sigma$ 可由地震矩 M_0 和圆形破裂面的半径 r 求得^[12]

$$\Delta\sigma = 7 M_0/16r^3. \quad (6)$$

表 1 地震参数及由拐角估计的震源尺度和应力降 (Silver 模型)

发震时刻(UTC)		纬度	经度	震级	M_0	$f_c(P)$	$f_c(S)$	r	$\Delta\sigma$	记录
年月日	时分秒	(N)/(°)	(E)/(°)	M_s	$/10^{17} \text{N} \cdot \text{m}$	/Hz	/Hz	/km	/0.1 MPa	台数
1997-01-21	01:47:13	39.50	77.08	6.0	7.74	0.202	0.0	11.6	2.17	11
1997-01-29	08:20:13	39.57	77.07	5.2	1.00	0.316	0.205	7.84	0.91	2
1997-02-11	20:20:58	39.45	77.08	5.0	0.91	0.218		10.8	0.32	3
1997-03-01	06:04:14	39.72	76.97	6.0	3.35	0.236	0.100	13.4	0.60	3
1997-04-05	23:46:17	39.55	77.03	6.4	7.73	0.209	0.123	12.5	1.73	9
1997-04-06	04:36:32	39.50	77.10	6.2	10.5	0.170	0.090	16.3	1.06	10
1997-04-11	05:33:43	39.65	77.05	6.4	20.6	0.119	0.085	19.8	1.16	11
1997-04-12	21:09:08	39.52	77.05	5.5	1.06	0.283	0.071	16.1	0.11	2
1997-04-15	18:19:09	39.68	77.02	6.2	6.56	0.123	0.094	18.5	0.45	12
1997-05-17	03:58:22	39.65	77.02	5.4	0.80	0.375	0.235	6.73	1.15	3
1997-06-24	09:24:45	39.50	77.00	5.0	0.96	0.317	0.123	10.6	0.35	3
1997-10-17	17:35:11	39.58	76.98	5.0	0.81	0.341	0.133	9.8	0.38	2
1996-03-19	15:00:26	39.99	76.70	6.7	36.0	0.219	0.088	15.0	4.70	13

(1)表中 M_0 , $f_c(P)$ 和 $f_c(S)$ 分别为地震矩、P 波和 S 波震源谱的拐角频率; (2)拐角频率为三分量位移振幅谱上各分量测得的结果的平均值; (3)震源尺度 r 及应力降 $\Delta\sigma$ 为 P, S 波谱推算结果的平均值; (4)1996-03-19 地震是发生在伽师附近的阿图什地震,其发震构造与伽师震群有明显差异,由表看其应力降明显高于伽师地震

我们以 Silver^[11]模型为正演模型,用遗传算法^[13]对震源谱的拐角频率进行估计,进而由

1) 单新建,等. 新疆伽师强震群的震源破裂特征. 地震地质(待刊)

(4~6)式估计震源破裂尺度和静态应力降。结果表明(见表1)伽师震群地震的应力降多在0.1 MPa左右,显著低于数MPa的平均水平^[14],也明显低于发生在其邻近的阿图什地震的应力降。伽师震群地震显著偏低的应力降特性表明其震源区应变恢复缓慢,这可能是伽师震群长时间持续活动的原因。

3 伽师强震群生成机理讨论

图1显示出伽师强震群发震构造为一北北西走向的雁形右旋右阶断层系。大量地质野外观测和地震活动图象分析表明断层系大多由一系列成雁形排列的离散破裂段组成,这种破裂段间的间隔影响沿断层系的滑动分布和地震活动分布^[15]。Segall等^[15]数值分析了不同类型的雁形断层系在破裂过程中破裂段间的相互作用,结果显示雁形右旋右阶断层系有使破裂段上的压应力减小的效应,从而当这种断层系上开始发生破裂时,破裂段间由于平均压应力减小,有利于后续破裂的发生。伽师震源区存在这种利于后续破裂形成的构造背景,出现强震群活动是不奇怪的。由于右旋右阶断层系的破裂段上平均压应力减小,所发生的地震的应力降就可能偏低,这与我们用拐角频率法对伽师震群地震的应力降估计结果是一致的。低应力降说明震源区积累的形变能密度释放缓慢,震源区地震活动还要持续较长时间。

由于序列地震发生在相近的构造应力环境下,多数地震序列的地震震源机制是基本一致的^[16]。然而伽师震群地震的震源机制明显存在走滑和正断层型两类¹⁾(参见图1),图2所示的伽师震群地震的平均震源机制解及许忠淮等^[10]编制的中国大陆构造应力图均表现出伽师震源区中等主应力是直立的,应以发生走滑型地震为主。在伽师震群中出现的4个正断层型地震,是由于右阶右旋裂纹在阶变区是平均压力减小区,在雁行裂纹组的两个外端点的外侧也是平均压力减小区^[17],既由于伽师震源区雁形右旋右阶断层系存在使断层在破裂过程中,局部应力场发生改变,在局域出现水平压应力减小、最大主应力直立的现象,从而可能发生正断层型地震。由图1可清楚地看出伽师震群中所有的4次正断层机制的地震正好发生在雁行双裂纹的外端部,即拉张应力区。这一结果一方面解释了伽师震源区为什么会发生正断层机制的地震,另一方面哈佛大学给出的震源机制解与我们独立给出的定位结果能如此自恰地对伽师震群的这种特有现象进行解释,也说明我们的定位结果确有一定的精度。

参 考 文 献

- 1 胥颐,等. 天山地震带的地壳结构与强震构造环境. 地球物理学报,2000,43(2):184
- 2 刘启元,等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔S波速度结构及其地震成因的探讨. 地球物理学报,2000,43(3):356
- 3 Burtman V S, et al. Molnar, Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 1993
- 4 Deichmann N, et al. Mariano, Rupture geometry from high-precision relative hypocenter locations of microearthquake clusters. Geophys J Int, 1992, 110, 501
- 5 Bott, et al. The 1986 Crested Butte earthquake swarm and its implications for seismogenesis in Colorado. Bull Seismo Soc Amer, 1995, 85, 1495
- 6 傅承义,等. 地球物理学基础. 北京:科学出版社,1985. 310~330

1) 周仕勇. 1997年伽师强震群研究及其生成机理的探索. 中国地震局地球物理研究所博士学位论文, 1999

- 7 Liu Qiyuan, et al. The fine crustal and upper mantle velocity structure beneath the Jiashi-Artushi region from teleseismic P-waveforms recorded by broadband seismic array. 14th Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop, Kloster Ettal of Germany, 1999, 93 ~ 94
- 8 周仕勇,等. 由震源谱推断 1997 年新疆伽师强震群破裂特性. 地震学报,2000,22: 113
- 9 许忠淮,等. 由多个小地震推断华北构造应力场方向. 地震学报,1983,5: 268
- 10 许忠淮,等. 由大量地震资料推断的我国大陆构造应力场. 地球物理学报,1989,32(6),637
- 11 Silver Paul. Retrieval of source-extent parameters and the interpretation of corner frequency. Bull Seism Soc Am, 1983, 73(6): 1499
- 12 Keilis Borok, On estimation of the displacement in an earthquake source and of source dimension. Ann Geophys, 1959, 12: 205
- 13 石耀霖. 遗传算法在地球物理中的应用. 地球物理学报,1992,35(增刊):367
- 14 Shi J, et al. The corner frequencies and stress drops of intraplate earthquakes in the northeastern United States. Bull Seism Soc Am, 1998, 88(2): 531
- 15 Segall P, et al. Mechanics of discontinuous faults. J Geophys Res, 1980, 85(B8): 4337
- 16 Wallace R E, et al. Rates and Patterns of Progressive Deformation. In: Parkfield-Cholame, California Earthquakes of June-August 1966. USGS, Prof Paper 579, 1967, 23
- 17 林邦慧,等. 1988 年澜沧-耿马地震的震源特征及其有限元模拟. 地球物理学报, 1994,37: 621