

珊溪水库地震小震震源机制解特征研究^①

张 帆, 朱新运, 钟羽云

(浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要:利用 P 波初动和直达 P、S 波最大速度振幅比联合求解小震震源机制的方法求出珊溪水库 $M_L 2.0$ 以上地震的震源机制, 得到了珊溪水库震源机制各参数时空特征如下: 主压应力为 SN 向, 主张应力为 EW 向, 应力主要为水平应力, 发震断层倾角较大且多为走滑断层。在个别 4 级左右地震前 P 轴方位都有偏离再恢复的现象。在北纬 $27.65^\circ \sim 27.69^\circ$ 间, P 轴方位集中在 $0^\circ \pm 30^\circ$ 或者 $180^\circ \pm 30^\circ$, 节面走向集中在 $45^\circ \pm 15^\circ$ 或者 $135^\circ \pm 15^\circ$ 。震源深度大于 4 km 的地震倾角多集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 度之间。

关键词: P 波初动; 振幅比; 震源机制解; 珊溪水库

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0684-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0684

Study on the Characteristic of Focal Mechanism Solutions of the Shanxi Reservoir Earthquake

ZHANG Fan, ZHU Xin-yun, ZHONG Yu-yun

(Earthquake Administrator of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

Abstract: Using P wave first motions and the maximum velocity amplitude ratio of Pg and Sg waves, the focal mechanism solutions of the Shanxi reservoir earthquakes above $M_L 2.0$ were calculated. The time and space characteristics of the focal mechanism solutions parameters were obtained as follow: most of the main press stresses are North-south oriented, most of the main tensile stresses are East-west oriented, the stresses are almost horizontal, most of the slips of the planes are above 60° , and most of the faults are strike-slip type. Both of the azimuths of the P-axis have the trend of first deviation and then recovery before some $M_S 4.0$ earthquakes. In the range from 27.66° to 27.69° N, focal mechanism solutions parameters have a good consistency. Most of the azimuths of the P-axis are $0^\circ \pm 30^\circ$ and $180^\circ \pm 30^\circ$, and most of strikes of the plane are $45^\circ \pm 15^\circ$ and $135^\circ \pm 15^\circ$. Most of the slips with focal depths deeper than 4 km are between 70° and 90° .

Key words: P-wave first motion; amplitude ratio; focal mechanism solutions; Shanxi reservoir

0 引言

利用 P 波初动方向记录反演震源机制解虽简单易行,但也有缺陷,即要求的记录台站数量相对较多,台站方位分布均匀,对大地震且台站分布密度大的情况可行,而对大量中小地震无能为力。对于较

大的远震目前多利用在不同方位且具有不同震中距台站上获得的地震波形记录来反演震源机制解。对地方性的中小地震,可以利用从直达 P 波(Pg)和 S 波(Sg)引起的地动位移振幅比求解震源机制的方法,也可以采用振幅比与初动相结合的办法求解^[1]。

^① 收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 浙江省公益技术研究社会发展项目(2011C23061)

作者简介: 张帆(1978-),男,云南人,工程师,主要从事地震数字地震资料应用及地震监测预报研究。E-mail: cruiser911@163.com

国内研究者^[2-4]使用 P 波、SV 波、SH 波的初动和振幅比联合计算地震震源机制方法, 分别研究了山西太原 $M_L 5.0$ 地震, 1998 年 8 月 2 日新疆伽师 6.1 级地震和 2000 年姚安 6.5 级地震序列震源机制解。也有人使用利用格林函数库^[5], CAP 方法反演^[6-7], 求震源机制。张永久^[8]利用数字地震记录直达 P、S 波最大速度振幅比和仿真后的最大位移振幅比资料分别测定了小震震源机制参数, 并对两种结果进行了对比分析, 认为直接利用区域台网数字地震记录直达 P、S 波最大速度振幅比代替最大位移振幅比测定小震震源机制解是可行的。本文利用 P 波初动和直达 P、S 波最大速度振幅比联合求解小震震源机制的方法求出珊溪水库 $M_L 2.0$ 以上地震的震源机制, 并分析珊溪水库震源机制各参数随时间、经度、纬度、深度变化的特征。

1 直达 P、S 波的振幅比方法测定震源机制

梁尚鸿^[9]等提出利用区域地震台网直达 P、S 垂直分量振幅比资料测定小震震源机制。直达 P 波和 S 波的地表垂直分量最大值振幅比的对数可以表示为

$$Q_l = \ln \left| \sum_{m=0}^2 A_m(\theta_s, \lambda, \delta) \cdot SV_m \right| - \ln \left| \sum_{m=0}^2 A_m(\theta_s, \lambda, \delta) \cdot P_m \right| + C_l$$

($l = 1, 2, \dots, N$)

其中

$$\begin{cases} A_0(\theta_s, \lambda, \delta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \cdot \sin \lambda \\ A_1(\theta_s, \lambda, \delta) = \cos \delta \cdot \cos \lambda \cdot \cos \theta + \cos 2\delta \cdot \sin \lambda \cdot \sin \theta \\ A_2(\theta_s, \lambda, \delta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \cdot \sin \lambda \cdot \cos 2\theta - \sin \theta \cdot \cos \lambda \cdot \sin 2\theta \end{cases}$$

表 1 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解

Table 1 Focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ earthquake

日期	时间	震级	节面 a/(°)			节面 b/(°)			P 轴/(°)		T 轴/(°)	
			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角
2006-02-04 11:13		4	27	53	176	294	87	38	347	23	244	28
2006-02-04 16:52		4.1	24	88	175	294	85	2	159	2	249	5
2006-02-08 01:29		4.4	40	87	136	307	46	4	165	27	273	31
2006-02-09 03:24		4.6	53	84	171	322	81	6	187	2	278	11
2006-02-09 18:51		4.2	206	90	-168	296	78	0	160	9	251	8
2006-02-10 07:59		4.2	206	77	-142	305	53	-16	159	36	260	16
2006-02-10 14:37		4.1	217	85	-158	309	68	-6	171	19	265	11
2006-02-11 04:36		4.2	50	89	143	319	53	2	178	24	281	26
2006-08-01 13:28		4	56	81	178	326	88	911	5	281	8	
2006-08-01 14:07		4.6	235	81	-177	325	87	-9	190	8	100	5

$$\begin{cases} P_0 = \frac{2 - 3\sin^2 i_h}{\alpha_s^2} \\ P_1 = \frac{\sin 2i_h}{\alpha_s^2} \\ P_2 = \frac{\sin^2 i_h}{\alpha_s^2} \end{cases}, \begin{cases} SV_0 = \frac{\frac{2}{3} i \sin 2i_h}{\beta_s^2} \\ SV_1 = \frac{i(2\sin^2 i_h - 1)}{\beta_s^2} \\ SV_2 = \frac{i \sin 2i_h}{\beta_s^2} \end{cases}$$

式中 i_h 是离源角; $\theta_s, \lambda, \delta$ 分别为震源位错面的方位角、倾角和滑动角; α_s, β_s 分别为第 S 层介质中直达 P、S 波垂直波数; C_l 为依赖于台站位置的常数, 与震源参量无关。

设震源参数真值为 $\bar{\theta}_s, \bar{\lambda}, \bar{\delta}$, 记录台站数为 N , 那么各记录中相应的最大振幅比观测资料可表示为 $\bar{Q}_l = \bar{Q}_l(\bar{\theta}_s, \bar{\lambda}, \bar{\delta})$ 。如果层状介质中一点错震源的模型参数为已知时, 则可通过上式计算得到理论振幅比值。这样, 可以通过用理论最大振幅比值与相应观测资料拟合的方式求解震源机制参数。

2 地震概况及资料选取

珊溪水库地震是我省比较显著的地震事件。珊溪水库于 2000 年 5 月开始蓄水, 2002 年库区发生了 $M_L 3.5$ 地震, 此后小震活动一直不断。2006 年库区又发生了一组地震, 从 2 月 4 日至 10 月 31 日之间共发生 $M_L \geq 2.0$ 地震 269 次。震区架设了新浦、联云、包垵、云湖、泰顺等台站, 并与珊溪和黄坛台组成水库地震台网, 加强了库区的地震监测能力, 能监测到 $M_L \geq 1.0$ 地震。本文收集了台网记录到的 34 个 $M_L \geq 3.0$ 地震, 同时结合震源位置与速度结构联合反演方法的定位结果^[10]选出的 81 个 $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震, 共 115 个地震进行震源机制求解。震中分布如图 1 所示。震源深度从 2.1~8 km, 震源深度分布规律为西北深, 东南浅。

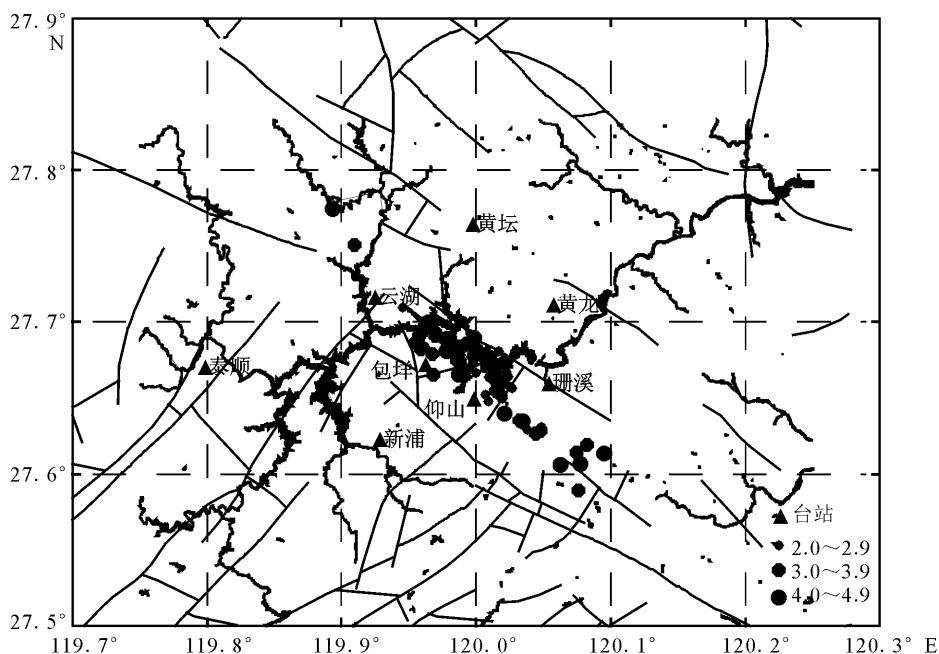
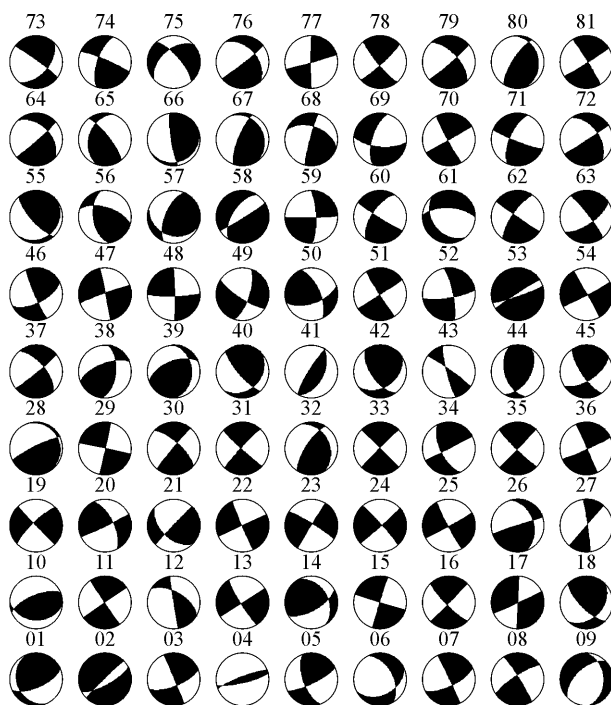


图 1 所选地震的震中分布图

Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters for selected events

图 2 $M_L < 3.0$ 地震震源机制解图Fig. 2 Focal mechanism solutions of earthquakes smaller than M_L 3.0

3 震源机制解结果

3.1 $M_L \geq 3.0$ 地震

利用 P 波初动方法求出珊溪水库的 34 个 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解, 其中 $M_L \geq 4.0$ 以上地震 10 个震源机制解在表 2 中给出。它们的震源机制解一致性比较好, 震源机制的一个节面走向集中在

$30^\circ \sim 60^\circ$ 之间, 为 NE 向, 33 个倾角大于等于 60° 的占 97% 左右; 另一个节面走向集中在 $120^\circ \sim 150^\circ$ 之间, 为 NW 向, 30 个倾角大于等于 60° , 占 91% 左右; 主压应力轴 (P 轴) 的走向集中在 180° 左右, 为近 SN 向; 主张应力轴 (T 轴) 的走向集中在 90° 左右, 为近 EW 向。

3.2 $M_L < 3.0$ 地震

利用水库台网数字地震记录直达 P、S 波最大振幅比求得 81 个 $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震的震源机制解见图 2。

为了更好分析震源机制的数据,按照每 10 度统计出震源机制的各个参数的分布,并以玫瑰图的方式表示(图 3)。从图 3(a)和(b)看出,P 轴方位小于 30° 和大于 330° 的共 64 个,占 79%,T 轴的方位在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 300^\circ$ 之间共 60 个,占 74%。从图 3(d)和(e)看出,P 轴仰角有 48 个小于 20° ,占 59% 左右,T 轴仰角有 52 个小于 20° ,占 64% 左右;P 轴仰角有 58 个小于 30° ,占 71% 左右,T 轴仰角有 70 个小于 30° ,占 86% 左右。

从图 3(c)看出,节面 a 走向小于 30° 和大于 330° 的有 26 个,占 32% 左右,在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $300^\circ \sim 330^\circ$ 之间的有 37 个,占 46% 左右, $60^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 300^\circ$ 之间的有 18 个,占 22% 左右;在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和

$300^\circ \sim 330^\circ$ 之间的所占比例最多,即节面走向多为 NE 向和 NW 向。从图 3(f)看出,节面 a 倾角大于 70° 的有 43 个,占 53% 左右,节面 a 倾角大于 60° 的有 58 个,占 72% 左右。

滑动角是表征断层的两个盘之间相对的运动方向的物理量,同时该参数也可以判断断层是走滑型,还是倾滑型。从图 3(g)中看出,节面 a 滑动角绝对值在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $150^\circ \sim 180^\circ$ 之间为 55 个,占 68% 左右, $0^\circ \sim 20^\circ$ 和 $160^\circ \sim 180^\circ$ 之间占 62%, $0^\circ \sim 10^\circ$ 和 $170^\circ \sim 180^\circ$ 之间的占 50% 左右。大部分地震节面 a 滑动角都比较小,断层以走滑断层为主。

根据以上的统计数据并结合精定位的震中分布图可以判断出,该震群的主要发震断层是 NW 走向,且倾角较大,接近于直立断层。P 轴方位主要为 SN 向,T 轴方位主要为 EW 向;P、T 轴的仰角较小,接近于水平方向。

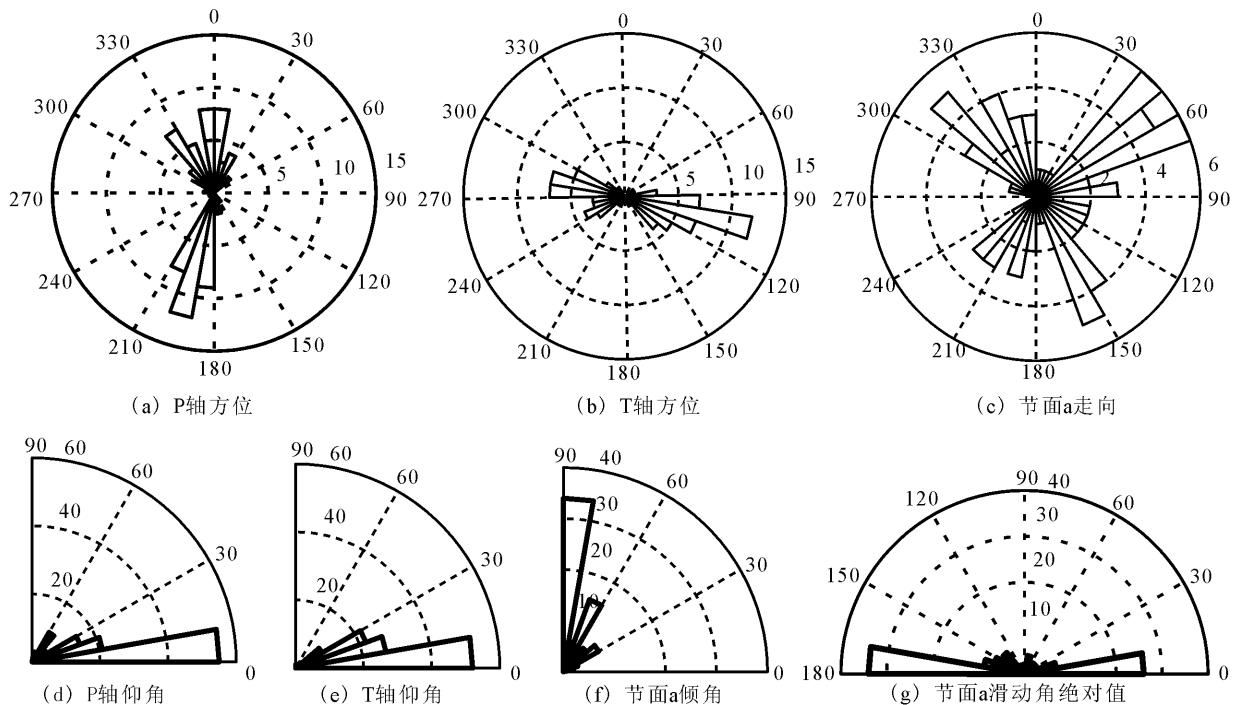


图 3 震源机制参数玫瑰图

Fig. 3 The rose diagram of focal mechanism solution parameters

4 震源机制特征

4.1 时间特征

通过震源机制随时间变化的研究,可以看出震源机制在显著地震前后的变化情况。由于地震是时间上随机性发生的事件,如果按照时间的坐标来绘制 P 轴随时间的变化,对数据的分析带来不便,按照时间地震次序更便于分析。为了便于分析,将 P

轴走向归算至 90° 以内,对节面 a 的走向、滑动角也采用同样的归算方法。P 轴方位、经度和纬度随次序变化如图 4,图中箭头位置代表 4 级地震。

图 4 中看出,地震发生初期一致性较好,虽然地震震中有所变化,但是除个别地震 P 轴方位较高外,其余都集中在 30° 以内。随着地震次序的增加,P 轴方位有从集中向紊乱发展的趋势;从第 55 个地

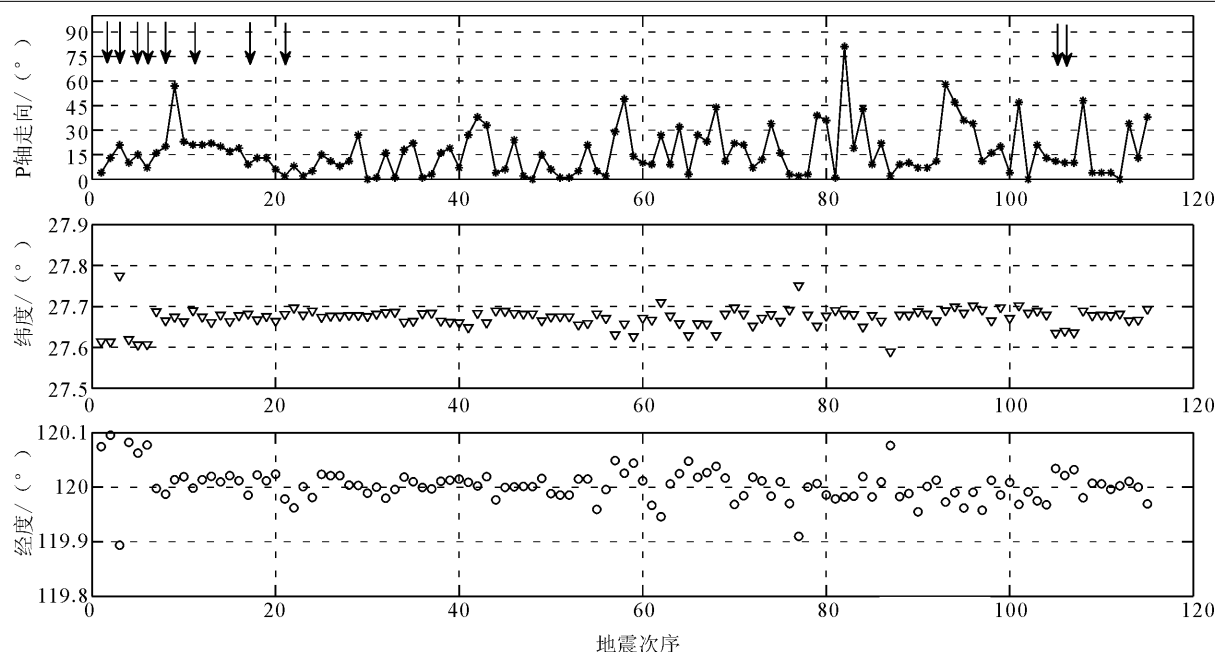


图4 P轴方位、经度和纬度随次序变化图

Fig. 4 The azimuths of P axis, longitude and latitude change with earthquake order

震(2006年2月27日)后,震中有所迁移,迁移范围相比之前较大,尤其是向东西方向迁徙的范围大,此时P轴方位波动也比较大,甚至出现 60° 以上的情况。在第十个4级以上地震(2006年8月1日 $M_L 4.6$)前,P轴方位角从 10° 左右转至 60° 左右,又慢慢转至 10° 左右。

4.2 空间特征

4.2.1 P轴随空间变化特征

从P轴方位角散点图(图5)可以看出,在纬度 $27.65^\circ \sim 27.69^\circ$ 之间,P轴方位角集中在 30° 以内,随纬度的增高存在减小的趋势。在大于北纬 27.69° 度区域中,P轴方位角比较分散。在纬度小于北纬 27.64° ,经度大于东经 120.03° 的区域,P轴方位以小于 30° 的居多。震源深度大于6 km地震的P轴方位角基本都小于 30° 。

4.2.2 节面参数的空间变化特征

这里我们仅讨论节面a的参数。

(a)走向的空间变化特征

由图6看出,北纬 $27.65^\circ \sim 27.69^\circ$ 之间,节面a走向为集中在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间,且高纬度地震的走向比低纬度走向大。在纬度小于北纬 27.64° ,经度大于东经 120.03° 的区域,节面a走向以 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的居多。节面a走向随深度变化不明显。

(b)倾角的空间变化特征

由图7看出,在纬度小于北纬 27.64° ,经度大于东经 120.03° 的区域,节面a倾角基本大于 60° 。在

纬度大于北纬 27.69° ,经度小于东经 119.975° 的区域,节面a倾角以大于 60° 的居多。在经度大于东经 120° 区域节面a倾角较分散,倾角小于 60° 的地震所占比例增多。震源深度在4 km以下的地震节面a倾角以小于 70° 居多,大于 70° 的仅占13%;震源深度4~6 km的地震以大于 70° 的居多,占71%,大于6 km地震节面倾角则以大于 70° 占76%。

(c)滑动角的变化特征

由图8看出,在纬度 $27.66^\circ \sim 27.68^\circ$ 之间,节面a的滑动角多集中在 20° 以下,在大于纬度 27.68° 这个区域地震的节面a的滑动角, 30° 以上和 30° 以下,各占约50%左右。在小于东经 120° 区域内节面a滑动角比较离散,而大于东经 120° 区域内的节面a滑动角比较集中,大部分集中在 20° 以内。在纬度小于北纬 27.64° ,经度大于东经 120.03° 的区域,节面a滑动角以小于 30° 居多。滑动角随震源深度变化规律不明显。

5 结论与讨论

用P波初动方法计算珊溪水库库区34个 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解,同时采用直达P波、S波振幅比计算81个 $M_L < 3.0$ 地震的震源机制解,经分析得到如下结论:

(1) 珊溪水库震源机制解的节面a走向位于 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间占56%,节面b走向位于 $120^\circ \sim 150^\circ$ 之间占59%;节面a倾角大于 60° 占79%,节面b倾

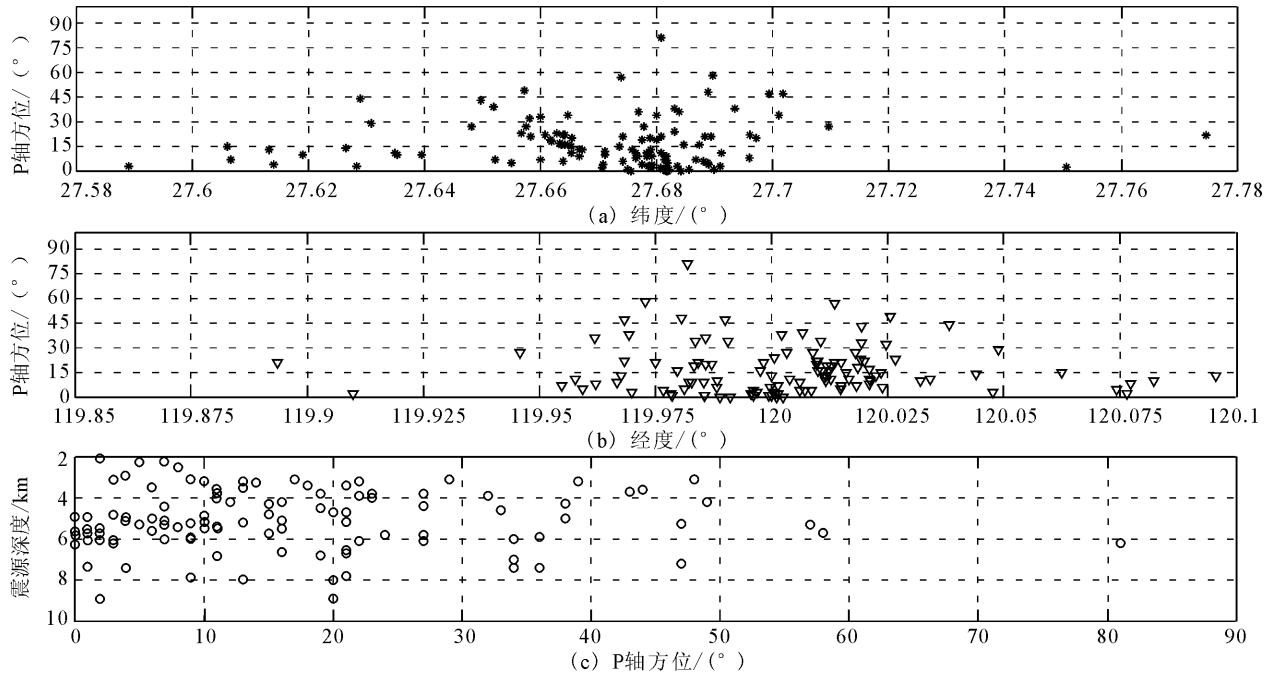


图 5 P 方位角散点图

Fig. 5 Scatter diagram of the azimuths of P axis

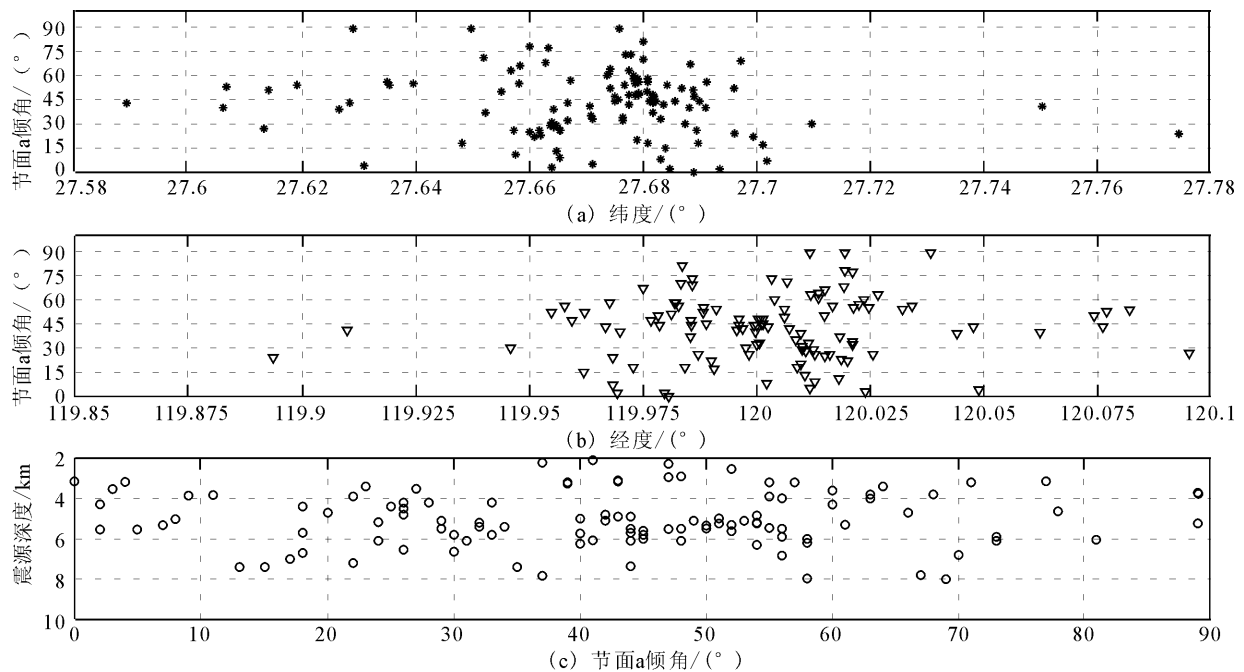


图 6 节面 a 走向散点图

Fig. 6 Scatter diagrams of the strikes of plane a

角大于 60° 占 85%, 滑动角绝对值在位 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $150^\circ \sim 180^\circ$ 的占 75%。根据震中分布图, 判断珊溪水库地震的发震断层为 NW 向, 发震断层的倾角较大, 滑动角绝对值较小, 多为直立走滑断层。

(2) 珊溪水库震源机制解的 P 轴方位在 $150^\circ \sim 210^\circ$ 之间的占 83%, T 轴方位在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 占 80%; P 轴仰角小于 30° 占 77%, T 轴仰角小于 30° 占

80%。该区域所受到的主压应力为 SN 向, 主张应力为 EW 向; 应力主要为水平应力。

(3) 地震发生初期 P 轴方位一致性较好, 随着地震震中的迁移 P 轴方位变化幅度变大, 有趋向于紊乱的趋势。在第 10 个 4 级以上地震 (2006 年 8 月 1 日 $M_L 4.6$) 前, P 轴的方位角有从低到高再从高到底的变化趋势。P 轴方位的这种规律可能是由于

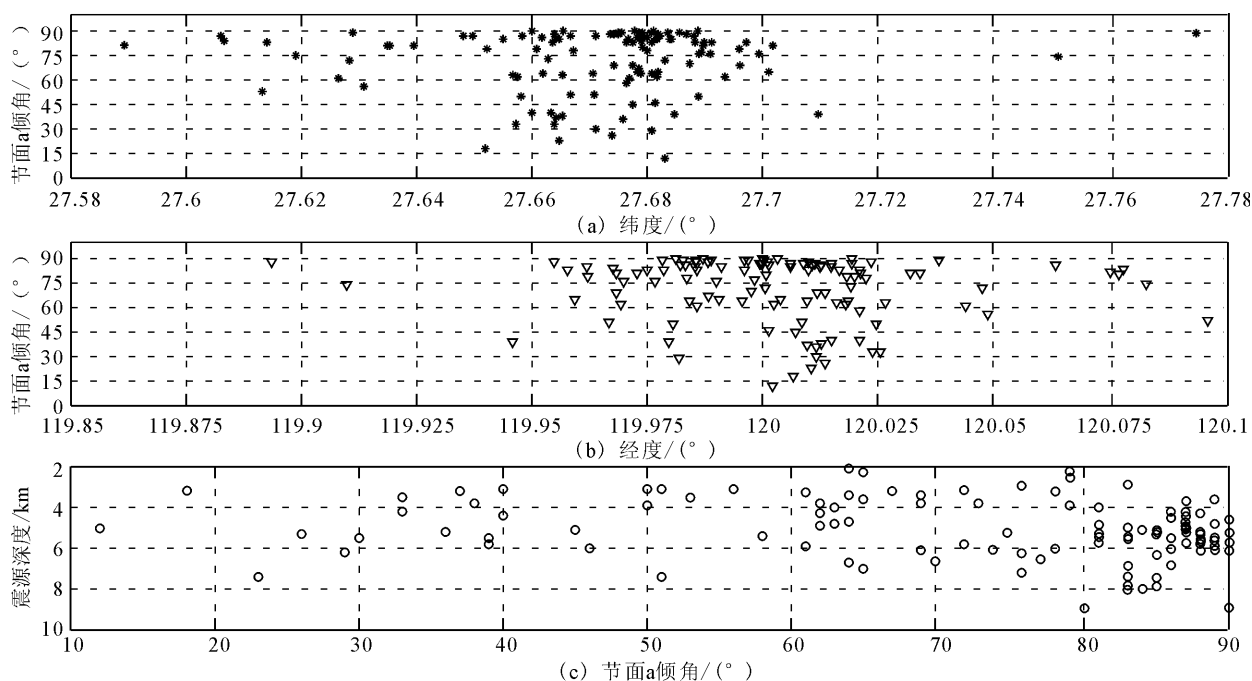


图7 节面a倾角散点图

Fig. 7 Scatter diagram of the dips of plane a

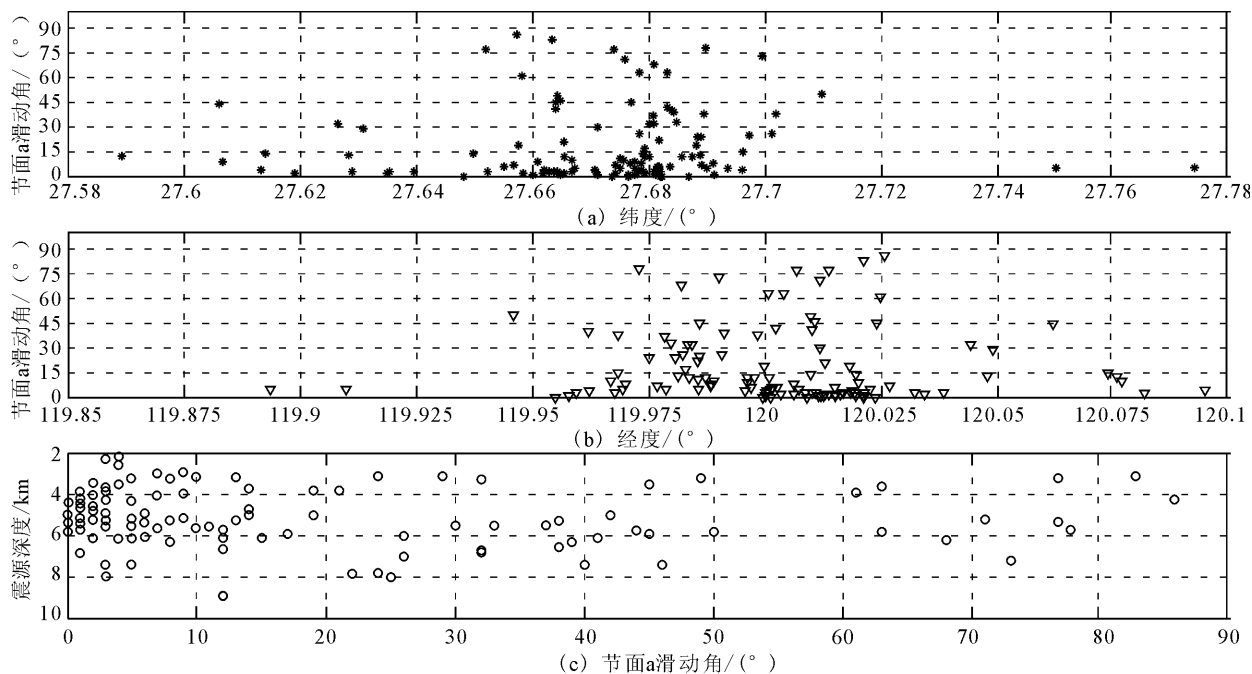


图8 节面a滑动角散点图

Fig. 8 Scatter diagram of the slips of plane a

初期地震的发生主要受区域应力影响,而随着时间的推移,区域应力受到震群的影响发生微小改变,使后续地震的P轴方位趋于紊乱。

(4) 在纬度 $27.65^{\circ} \sim 27.69^{\circ}$ 之间, P轴方位角, 节面a走向有随纬度增高而减小的趋势; 在大于北纬 27.69° 区域中, P轴方位角比较分散。在纬度小于北纬 27.64° , 经度大于东经 120.03° 的东南区域,

P轴方位以小于 30° 居多, 节面a走向以 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间居多, 节面倾角以大于 60° 居多, 滑动角以小于 30° 居多。此外, 地震条带西北角的地震节面a倾角以大于 60° 的居多。

(5) 震源参数随震源深度的变化也有一定的规律, 震源深度大于 6 km 地震的P轴方位角基本都小于 30° 。随震源深度增加节面a倾角增大, 震源深

度小于 4 km 的地震, 节面 α 倾角大于 70° 的仅占 13%, 而大于 4 km 的地震, 节面 α 倾角大于 70° 的则占 70% 以上。

参考文献 (References)

- [1] Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. A Program for Focal Mechanism Determination by Combined Use of Polarity and SV-P Amplitude Ratio Data[J]. Earthquake Notes, 1984, 55 (3): 15.
- [2] 刘杰, 郑斯华, 康英, 等. 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解[J]. 地震, 2004, 24(1): 19-26.
LIU Jie, ZHENG Si-hua, KANG Ying, et al. The Focal Mechanism Determinations of Moderate-small Earthquakes Using the First Motion and Amplitude Ratio of P and S Wave [J]. Earthquake, 2004, 24(1): 19-26. (in Chinese)
- [3] 屠泓为, 王海涛, 赵翠萍. 用 P 波、S 波初动和振幅比计算新疆伽师两次强地震震源机制解[J]. 内陆地震, 2006, 20(2): 131-138.
TU Hong-wei, WANG Hai-tao, ZHAO Cui-ping. Calculating Focal Mechanism Solutions of Two Jiashi Strong Earthquakes in Xinjiang with the First Motion and Amplitude Ratio of P and S Wave [J]. Inland Earthquake, 2006, 20(2): 131-138. (in Chinese)
- [4] 刘丽芳, 毛慧玲, 苏有锦, 等. 利用 P 波、S 波初动和振幅比计算 2000 年姚安 $M_s 6.5$ 地震序列震源机制解[J]. 地震研究, 2009, 32(1): 25-30.
LIU Li-fang, MAO Hui-ling, SU You-jin, et al. Determining Focal Mechanism Solution of the 2000 Yao'an $M_s 6.5$ Earthquake Sequence Using the First Motion and Amplitude Ratio of P and S Wave [J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(1): 25-30. (in Chinese)
- [5] 张辉, 王熠熙. 2012 年 5 月 3 日金塔—阿拉善盟 5.4 级地震震源机制解[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 205-206.
ZHANG Hui, WANG Yi-xi. Focal Mechanism of the Jintan—Alashanmeng $M 5.4$ Earthquake on May 3, 2012 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 205-206. (in Chinese)
- [6] 张辉. 2012 年 5 月 11 日甘肃肃南 $M_s 4.9$ 地震震源机制解[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 207-208.
ZHANG Hui. Focal Mechanism of the Sunan $M_s 4.9$ Earthquake in Gansu Province on May 11, 2012 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 207-208. (in Chinese)
- [7] 刘薇, 张晓清, 石玉成, 等. 利用格林函数库计算 2008 年青海大柴旦 6.4 级地震的余震震源机制[J]. 地震, 2006, 26(1): 26-34.
LIU Wei, ZHANG Xiao-qing, SHI Yu-cheng, et al. Using Green Function Database and Quick Moment tensor Inversion Calculating the Focal Mechanism Solution of Aftershocks of Dachaidan $M_s 6.4$ Earthquake in 2008 in Qinghai Province [J]. Earthquake, 2006, 26(1): 26-34. (in Chinese)
- [8] 张永久, 程万正. 用 P、S 波速度振幅比求小震机制解的可行性研究[J]. 中国地震, 2007, 23(4): 366-374.
Zhang Yong-jiu, Cheng Wan-zheng. Feasibility Study on Determining Focal Mechanism of Small Earthquakes Using Amplitude Ratio of P and S Waves [J]. Earthquake Research in China, 2007, 23(4): 366-374. (in Chinese)
- [9] 梁尚鸿, 李幼铭, 等. 利用区域地震台网 P、S 波振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 1984, 27(3): 247-257. [M].
LIANG Shang-hong, LI You-ming, et al. On the Determining of Source Parameters of Small Earthquakes by Using Amplitude Ratios of P and S from Regional Network Observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1984, 27(3): 247-257. (in Chinese)
- [11] 朱新运, 张帆, 于俊宜. 浙江珊溪水库地震精细定位及构造研究[J]. 中国地震, 2010, 26(4): 380-390.
ZHU Xin-yun, ZHANG Fan, YU Jun-yi. Study on Precise Positioning and Structure of the Shanxi Reservoir Earthquake, Zhejiang Province [J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(4): 380-390. (in Chinese)