

红河断裂带的震源机制与现代构造应力场*

王绍晋, 张建国, 余庆坤, 龙晓帆

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用震源机制解对红河断裂带的现代构造应力场和震源破裂进行分析, 结果表明沿断裂带震源机制、应力场和震源破裂存在着主体类型、优势作用和主要特征, 同时也存在着复杂性特征, 断裂带北、中、南段存在差异, 反映了断裂带各段构造活动的差异。

关键词: 震源机制解; 构造应力场; 震源破裂

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2010)02-0200-08

0 引言

红河断裂带是横贯云南西部、中部和东南部的一条大型走滑断裂。其总体走向北西, 略向西南突出, 大部分地段沿红河河谷延伸, 向南一直延伸至越南。该断裂带形成于古生代之前, 断层运动具有多期性, 其运动性质在前期为左旋错动, 大致于中新世后期转变为右旋错动(虢顺民等, 2001), 第四纪时期活动性仍然很强。断裂活动方式从东南向西北由以倾向滑动为主变为以走向滑动为主。红河断裂带是康滇菱形断块的西南边界, 是西南地区地壳构造块体运动的重要边界, 也是西南地区现代构造应力场分区的重要边界之一。历史地震活动显示, 沿红河断裂带地震活动水平存在显著差异。在云南境内断裂带北西段(北段), 近代地震活动频度高、强度大, 最大地震是1925年3月16日大理凤仪发生的7级大震; 另据史料记载, 1652年在弥渡也曾发生过7级大震。断裂带东南段(中段), 近代地震活动水平很弱, 断裂活动表现出明显的蠕滑特征。红河断裂带延伸到越南境内的部分(南段), 近代地震活动水平介于北段和中段之间。

对地质构造断裂的研究, 既要研究其现今活动性, 还要研究其所处区域现代构造应力场环境以及断裂本身的破裂特征及力学性质。地震活动

性是地壳构造运动强弱程度的直接表征, 是构造断裂现今活动水平最直观的反映。在地壳不断的构造运动过程中, 区域地壳岩石受到构造应力的不断作用, 当构造应力达到或超过岩石的破裂强度时, 先存的或新生的构造断裂即会产生急速破裂错动释放能量从而发生地震。地震的发生需要有特定的地质构造环境, 更取决于构造动力作用的状态, 构造应力场是地震发生的重要因素。对构造断裂带及其附近发生的地震震源应力场和震源破裂特征进行研究, 有助于分析了解地震的孕育、发生过程, 以及构造断裂的受力状态、破裂错动性质及其与地震活动的关系, 对地震监测预报具有重要的意义。单个地震的震源机制解包含了震源等效释放应力场、震源力学过程和震源动力过程的信息。对发生在一定区域的多个地震的震源机制解进行统计分析可以再现区域构造应力场的平均状态(许忠淮等, 1983), 震源机制解方法是推断地壳构造应力场的有效方法之一。

本文利用发生在红河断裂带内及其附近地区的强震和中小地震震源机制解, 探讨沿断裂带的现代构造应力场分布及震源破裂特征。

1 方法和资料

1.1 强震震源机制解

主要包括3方面的资料, 一是利用云南区域地

* 收稿日期: 2009-06-18.

基金项目: 宁洱6.4级地震现场综合考察和研究公益性行业科研专项经费资助.

震台网、四川地震台网和全国基准地震台网记录到的地震P波初动求解得到的16个强震（不包括余震）震源机制解（阚荣举等，1977，1983；王绍晋等，1989）。其中断裂带北段10个，中段4个，中段南侧附近1个，东南端附近1个。二是由美国地质调查局（USGS）地震报告给出的矩心矩张量解得到2个位于断裂带南段南侧附近的强震结果。图1是这些地震的相对位置及震源机制图解示意图，表1列出它们的参数。三是由宏观地震资料及地震地质资料等推测得到，发生在断裂带北段的2次7级大震的发震构造等的定性分析结果。

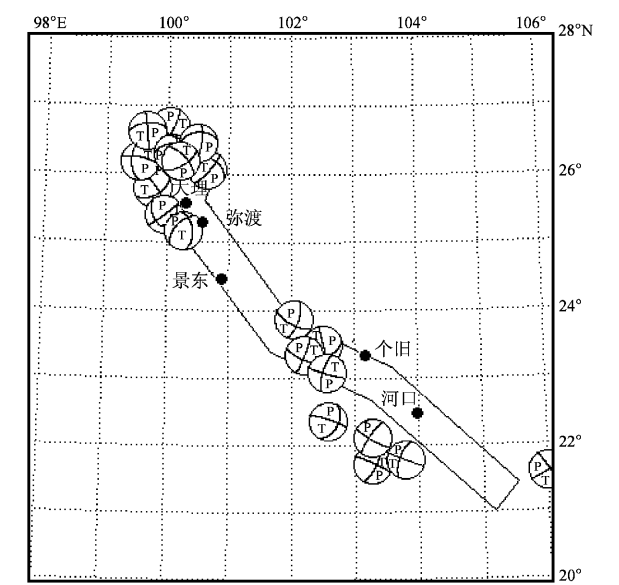


图1 强震震源机制解空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the focal-mechanism solution of the strong earthquakes

1.2 中小地震震源断层面解

1999年昆明数字化地震台网正式运行，目前在云南省已布设了25个数字化地震台，使用的是速度平坦型数字地震仪。数字地震记录与地动速度成正比，具有频带宽、动态范围大、时间服务准确、精度高、记录仪器统一等显著特点，为地震科学研究和地震预测实践提供了更加丰富、更加可靠的数字化地震记录资料。数字地震记录中包含了模拟记录中所没有的丰富的地动信息。本文利用昆明数字化地震台网记录到的地震 \bar{P} 、 \bar{S} 波振幅资料，采用层状介质点源位错模型的广义透射系数的快速算法，由理论地震图的 \bar{P} 、 \bar{S} 波最大

振幅比值，与观测值拟合，反演中小地震的震源机制断层面解方法（梁尚鸿等，1984），求解中小地震震源断层面解。在沿红河断裂带区域一共得到了245个 $2.5 \leq M_L \leq 4.3$ 中小震的震源断层面解，其中北段208个、中段37个（图2）。

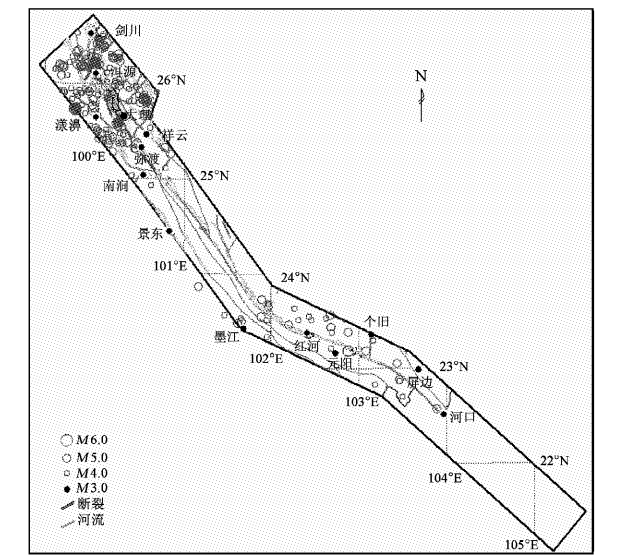


图2 中小地震震中分布

Fig. 2 Epicentral distribution of the medium-small earthquakes

吴幸鸿（2002）利用在越南架设的临时地震观测台网的2期观测资料，采用地震矩张量反演地震断层面解的方法，得到4个发生在红河断裂带南段（越南境内）的小震断层面解和5个在红河断裂带南段附近的小震断层面解。表2中还给出了4个强震和中强震的哈佛大学矩心矩张量解或复合解，即第10~13号地震，其中第12、13号地震与前文提到的由美国地质调查局（USGS）地震报告给出的2个矩心矩张量解（表1中第14、15号地震）相同。吴幸鸿（2002）只列出了解的一个节面参数，笔者据此经过计算还原了13个解完整的参数（表2）。

2 结果分析

近代地震活动水平直接反映构造断裂的近代活动程度，而地震定位的空间分布图像，直接显示了构造活动的空间格架。一定地域发生的地震，是在相对统一的构造应力场作用下的结果。地震

表 1 红河断裂带强震震源机制解参数
Tab. 1 Focal-mechanism solution of the strong earthquakes

| 序号 | 震中位置 | | | | 节面 I | | | | 节面 II | | | | P 轴 | | T 轴 | | N 轴 | | 精度 | 资料来源 |
|----|------------|--------|---------|----|------|------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|------|
| | 年-月-日 | 北纬 | 东经 | 震中 | 震级 | h/km | 走向 / (°) | 倾角 / (°) | 滑动角 / (°) | 走向 / (°) | 倾角 / (°) | 滑动角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | | |
| 1 | 1951-12-21 | 26°42' | 100° | 剑川 | 6¼ | 20 | 311 | 60 | -158 | 209 | 71 | -31 | 347 | 36 | 82 | 7 | 181 | 53 | A | * |
| 2 | 1961-06-12 | 21°36' | 106° | 越南 | 5 | 28 | 237 | 85 | -171 | 146 | 82 | -6 | 282 | 10 | 191 | 2 | 92 | 81 | A | * |
| 3 | 1972-01-23 | 23°26' | 102°26' | 石屏 | 5.5 | 33 | 167 | 88 | 127 | 260 | 37 | 4 | 47 | 32 | 289 | 36 | 166 | 37 | A | * |
| 4 | 1973-10-20 | 25°57' | 100°35' | 宾川 | 4.2 | 20 | 117 | 40 | 160 | 222 | 78 | 52 | 160 | 23 | 275 | 44 | 51 | 37 | B | ** |
| 5 | 1975-07-09 | 23°53' | 102°03' | 建水 | 5.2 | 16 | 114 | 76 | -156 | 17 | 67 | -15 | 337 | 27 | 244 | 6 | 158 | 55 | B | ** |
| 6 | 1975-09-04 | 25°49' | 99°51' | 漾濞 | 5.0 | 20 | 143 | 76 | 141 | 243 | 53 | 15 | 18 | 16 | 275 | 35 | 128 | 50 | B | ** |
| 7 | 1977-03-17 | 25°51' | 99°41' | 漾濞 | 5.2 | 20 | 102 | 74 | -142 | 1 | 55 | -19 | 147 | 37 | 47 | 13 | 301 | 51 | B | ** |
| 8 | 1977-09-30 | 23°27' | 102°21' | 建水 | 4.7 | 20 | 294 | 70 | -175 | 202 | 85 | -20 | 336 | 18 | 70 | 11 | 191 | 69 | C | ** |
| 9 | 1978-05-19 | 25°32' | 100°18' | 下关 | 5.3 | 10 | 330 | 45 | -172 | 234 | 85 | -45 | 2 | 35 | 111 | 26 | 228 | 44 | B | ** |
| 10 | 1982-02-20 | 22°23' | 102°35' | 越南 | 5.2 | 30 | 108 | 82 | 132 | 207 | 43 | 12 | 347 | 24 | 235 | 38 | 101 | 42 | B | *** |
| 11 | 1982-07-03 | 26°31' | 99°50' | 剑川 | 4.6 | 15 | 83 | 59 | 178 | 175 | 88 | 30 | 125 | 20 | 223 | 22 | 358 | 59 | B | *** |
| 12 | 1982-07-03 | 26°30' | 99°46' | 剑川 | 5.4 | 15 | 85 | 50 | 158 | 190 | 73 | 42 | 133 | 14 | 236 | 41 | 28 | 45 | B | *** |
| 13 | 1982-10-08 | 26°17' | 99°55' | 洱源 | 5.0 | 10 | 82 | 45 | 156 | 189 | 74 | 47 | 130 | 17 | 238 | 44 | 24 | 40 | B | *** |
| 14 | 1983-06-24 | 21°48' | 103°42' | 越南 | 6.3 | 10 | 110 | 90 | -156 | 20 | 66 | -1 | 338 | 17 | 243 | 16 | 111 | 66 | | USGS |
| 15 | 1983-07-15 | 21°54' | 103°18' | 越南 | 5.3 | 15 | 301 | 80 | 168 | 34 | 78 | 11 | 348 | 1 | 257 | 16 | 83 | 74 | | USGS |
| 16 | 1985-09-02 | 23°27' | 102°21' | 建水 | 5.3 | 10 | 287 | 89 | -170 | 197 | 81 | -1 | 154 | 7 | 61 | 6 | 267 | 72 | B | *** |
| 17 | 1986-03-13 | 26°12' | 100°10' | 鹤庆 | 5.3 | 10 | 136 | 65 | 152 | 239 | 66 | 28 | 187 | 1 | 277 | 37 | 97 | 54 | B | *** |
| 18 | 1998-12-02 | 25°32' | 100°16' | 下关 | 4.7 | 10 | 42 | 55 | 124 | 172 | 47 | 51 | 288 | 5 | 189 | 62 | 22 | 27 | B | 本文 |

注: * 阙荣举等(1977); ** 阙荣举等(1983); *** 王绍晋等(1989)。

表 2 红河断裂带震源机制解
Tab. 2 Focal-mechanism solution given by Doctor Hsin-Hung Wu

| 序号 | 震中位置 | | | | 震级 | h/km | 节面 I | | | | 节面 II | | | | P 轴 | | T 轴 | | N 轴 | |
|----|------------|----------|----------|--|------|-------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|--|
| | 年-月-日 | 北纬 / (°) | 东经 / (°) | | | | 走向 / (°) | 倾角 / (°) | 滑动角 / (°) | 走向 / (°) | 倾角 / (°) | 滑动角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | 方位 / (°) | 仰角 / (°) | | |
| 1 | 1997-04-23 | 21.75 | 105.03 | | 1.24 | 20.01 | 318.4 | 89.6 | -133.2 | 228.0 | 43.2 | -5.8 | 198.9 | 31.4 | 82.7 | 30.7 | 318.8 | 43.2 | | |
| 2 | 1997-04-23 | 21.75 | 105.03 | | 0.98 | 19.61 | 321.9 | 82.7 | -133.3 | 224.2 | 43.8 | -10.6 | 194.6 | 36.9 | 84.2 | 24.9 | 328.7 | 42.9 | | |
| 3 | 1997-04-27 | 21.76 | 105.02 | | 1.36 | 17.09 | 311.4 | 86.5 | -126.4 | 216.7 | 36.5 | -5.9 | 189.4 | 37.7 | 70.9 | 31.7 | 313.9 | 36.3 | | |
| 4 | 1997-10-06 | 20.64 | 105.57 | | 1.55 | 23.01 | 324.2 | 84.4 | -131.4 | 227.9 | 41.7 | -8.4 | 198.6 | 36.7 | 85.9 | 27.3 | 329.1 | 41.2 | | |
| 5 | 1997-12-23 | 21.46 | 106.15 | | 1.96 | 3.91 | 4.6 | 77.4 | -129.2 | 259.6 | 40.9 | -19.5 | 236.5 | 43.6 | 126.5 | 22.4 | 14.7 | 38.1 | | |
| 6 | 1997-12-29 | 21.11 | 106.21 | | 1.72 | 6.74 | 314.5 | 62.9 | 143.0 | 63.5 | 57.6 | 32.6 | 10.1 | 3.3 | 276.9 | 44.5 | 103.5 | 45.3 | | |
| 7 | 1998-03-15 | 21.29 | 105.20 | | 1.69 | 7.46 | 318.0 | 87.6 | 136.5 | 50.3 | 46.6 | 3.3 | 12.8 | 27.2 | 264.8 | 31.1 | 135.5 | 46.5 | | |
| 8 | 1998-11-07 | 21.53 | 106.12 | | 1.74 | 3.28 | 107.4 | 89.0 | -106.5 | 14.0 | 16.5 | -3.5 | 1.3 | 43.7 | 213.0 | 41.7 | 107.7 | 16.5 | | |
| 9 | 1998-11-08 | 21.49 | 106.08 | | 1.57 | 4.34 | 119.0 | 88.2 | -108.5 | 23.6 | 18.6 | -5.7 | 10.9 | 43.8 | 226.1 | 40.4 | 119.6 | 18.5 | | |
| 10 | 1991-10-06 | 21.38 | 104.16 | | 4.8 | 7.00 | 133.0 | 72.0 | 157.0 | 230.5 | 69.2 | 19.4 | 182.3 | 2.5 | 90.5 | 28.8 | 276.9 | 61.1 | | |
| 11 | 1993-03-29 | 21.83 | 103.15 | | 4.8 | 10.00 | 155.0 | 75.0 | 155.0 | 251.9 | 65.9 | 16.5 | 204.9 | 6.1 | 111.6 | 28.1 | 305.9 | 61.1 | | |
| 12 | 1983-06-24 | 21.8 | 103.7 | | 6.3 | 10.00 | 110.0 | 90.0 | -156.0 | 20.0 | 66.0 | -1.0 | 338.0 | 17.0 | 243.0 | 16.0 | 111.0 | 66.0 | | |
| 13 | 1983-07-15 | 21.9 | 103.3 | | 5.3 | 15.00 | 301.0 | 80.0 | 168.0 | 34.0 | 78.0 | 11.0 | 348.0 | 1.0 | 257.0 | 16.0 | 83.0 | 74.0 | | |

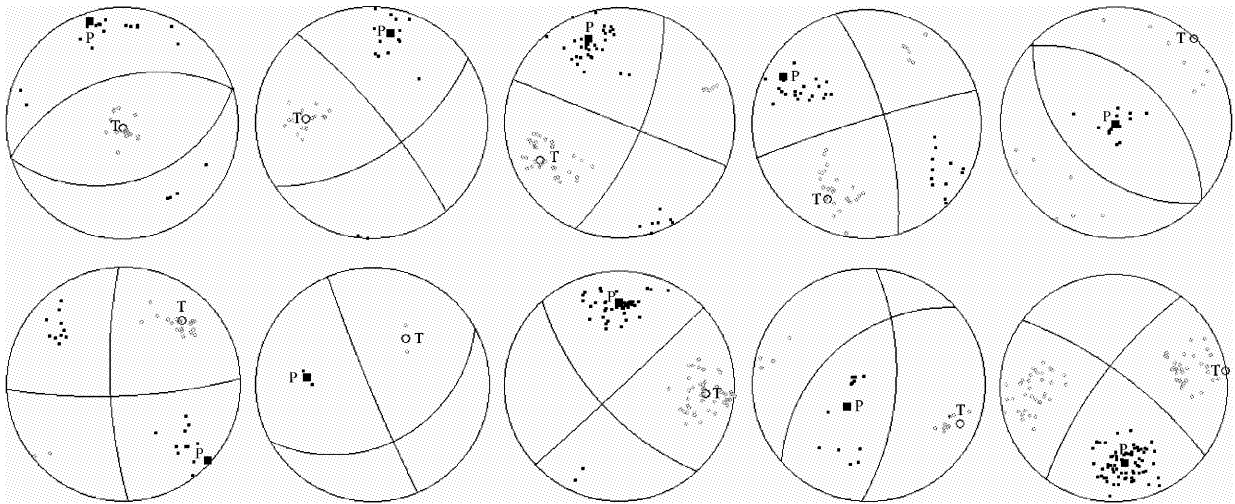


图 3 震源机制解最长距离法聚类分析 10 类平均解

Fig. 3 Ten types of average solutions of the focal mechanism got through the Longest-Distance Clustering Analysis

震源机制解给出了地震等效释放应力场以及震源破裂特征的信息。地震的发生，一方面与大范围的构造应力作用有关，另一方面还与震源所在局部区域的构造应力环境有关。地震越大，与更大范围的构造应力作用和构造活动的关系就更为密切。而小地震的发生与局部地域的构造应力关系较为密切。通过对发生在一定地域、一定数量的地震震源机制解参数的统计分析，可以再现构造应力场分布状态，同时还可以描述构造断裂的破裂性质。震源机制解资料的分析，主要遵循统计分析原则。

2.1 震源机制解分类

震源机制解的对比分析是对数量较多的资料进行分析的有效方法。震源机制解是三维空间解，它包含了两个节面的走向、倾角、滑动角和三个力轴的方位、仰角等参数。为了对数量较多的震源机制解作全面、系统、客观的对比分析，刁桂苓等（1992）借助模式识别中系统聚类的基本思想，从震源机制解本身的表达方式出发，定义以每两个解的 P 轴和 T 轴夹角之和为距离，采用最长距离法和最短距离法作聚类分析。对划分为同类的震源机制解，再利用矢量合成方法给出应力轴的平均空间取向。当采用最长距离法时，在确定了一个合适的距离阈值后，就可依据所得解之间的亲疏关系，把解分为若干类。

由全部 274 个震源机制解得到的平均应力场状态参数：主压应力 P 轴方位 342°，仰角 4°；主张

应力 T 轴方位 251°，仰角 5°；中等应力 B 轴方位 107°，仰角 84°。

对所得到的 245 个中小地震震源机制断层面解和 18 个强震震源机制解，以及吴幸鸿（2002）的 11 个震源机制解，一并作最长距离法聚类分析。全部解被分为 10 类，表 3 列出了每类解的主应力轴平均参数和解的数量，图 3 是相应的图解。

表 3 震源机制解最长距离法聚类分析
各类解主应力轴平均参数

Tab. 3 Average parameters of the main stress axes of focal mechanism got through the Longest-Distance Clustering Analysis

| 类 别 | P 轴 | | T 轴 | | B 轴 | | X 轴 | | Y 轴 | | 地 震 个 数 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | |
| | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | / (°) | |
| 1 | 343 | 5 | 167 | 85 | 72 | 1 | 163 | 44 | 342 | 36 | 20 |
| 2 | 11 | 14 | 273 | 31 | 123 | 56 | 230 | 12 | 326 | 33 | 15 |
| 3 | 340 | 14 | 245 | 15 | 111 | 69 | 293 | 22 | 202 | 1 | 41 |
| 4 | 299 | 10 | 207 | 17 | 60 | 70 | 254 | 20 | 163 | 4 | 33 |
| 5 | 186 | 88 | 43 | 1 | 313 | 1 | 44 | 48 | 222 | 46 | 14 |
| 6 | 132 | 1 | 43 | 17 | 226 | 72 | 88 | 13 | 357 | 12 | 21 |
| 7 | 275 | 32 | 36 | 38 | 160 | 35 | 67 | 4 | 331 | 54 | 2 |
| 8 | 359 | 18 | 95 | 16 | 223 | 65 | 317 | 2 | 48 | 25 | 46 |
| 9 | 223 | 60 | 113 | 9 | 18 | 27 | 273 | 27 | 139 | 44 | 13 |
| 10 | 172 | 22 | 81 | 1 | 350 | 68 | 126 | 16 | 217 | 16 | 69 |

表 3 和图 3 的结果显示：（1）第 10 类解包含的地震最多，有 69 个，其次是第 8 类解包括 46 个地震，第 3 类解有 41 个地震，这 3 类解的应力场

状态接近一致。这 3 类解共有 156 个地震, 约占总数的 56.9%。这 3 类解的应力场状态与全部解的平均应力场状态接近一致, 地震主压应力 (P 轴) 方位为 SSE ~ 近 SN, 平均为 SSE (170°), 仰角近于水平, 平均 18° , 以水平作用为主。主张应力轴 (T 轴) 方位为 NEE ~ EW, 平均 80° , 仰角近于水平, 平均 11° 。两节面倾角大于 65° , 接近直立。中等应力轴 (B 轴) 仰角大于 65° , 表明破裂面具有以水平走滑为主的错动性质。(2) 第 4 类解有 33 个地震, 第 6 类解有 21 个地震, 此两类解相近, 共有 54 个地震, 约占总数的 19.7%, 此两类解地震主压应力方位为 SE, 平均为 126° , 仰角近于水平, 平均 6° , 以水平作用为主。两节面错动力轴仰角小于 16° 和 8° , 接近水平。中等应力轴仰角也近于直立, 平均大于 71° , 表明破裂面具有以水平走滑为主的错动性质。(3) 第 1 类解有 20 个地震, 约占总数的 7.3%, 主压应力方位为 NNW, 平均为 343° , 仰角近于水平, 平均 5° 。主张应力轴方位 SSE, 平均 167° , 仰角近于直立, 平均 85° 。显示 NEE 向破裂面以逆倾滑动为主。(4) 第 2 类解有 15 个地震, 约占总数的 5.5%, 主压应力方位为 NNE ~ 近 SN, 平均为 11° , 仰角近于水平, 平均 14° , 以水平作用为主, 破裂面具有以水平走滑为主的错动性质。(5) 第 5 类解有 14 个地震, 约占总数的 5.1%, 主压应力方位近 SN, 平均 186° , 仰角近于直立, 平均 88° 。主张应力轴方位 NE, 平均 43° , 仰角近于水平, 平均 1° 。显示 NW 向破裂面以正倾滑动为主。(6) 第 9 类解有 13 个地震, 约占总数的 4.7%, 主压应力方位为 SW, 平均为 223° , 仰角平均 60° , 以垂直作用为主。两节面错动为水平滑动兼具较大的正倾滑动。(7) 第 7 类解只有 2 个地震, 约占

总数的 0.7%, 主压应力方位近 EW, 平均为 275° , 仰角平均 32° , 以水平作用为主。NNW 向节面为水平走滑错动, NEE 向节面水平滑动兼具较大的逆倾滑动。

吴幸鸿 (2002) 得到的发生在红河断裂带南段的 4 个小震断层解, 有 3 个 (表 2 中第 1、2、3 号) 地震属于第 10 类解, 1 个 (表 2 中第 7 号) 地震属于第 2 类解。

由以上分析可知, 沿红河断裂带近代发生的地震的震源应力场和震源破裂性质, 一方面表现出具有其主体优势特征, 如第 10、第 8 和第 3 类解的地震数量占总数的 56.9%, 集中反映出主体优势特征, 另一方面还显示出震源机制解的复杂性, 尤其是第 1、第 5 类解, 虽然数量只占总数的 12.4%, 但与第 10、第 8 和第 3 类明显不同。第 9 和第 7 类也与主体优势类型明显不同。

2.2 震源应力场与区域应力场

由震源机制解聚类分析表明, 第 10、第 8 和第 3 类解是近代沿红河断裂带发生的地震的优势主体, 其震源等效释放应力场主压应力方位为 SSE ~ 近 SN, 仰角近于水平, 以水平作用为主。进一步对全部解的各个参数作频数归一化处理, 图 4 是 P 轴和 T 轴方位和仰角每 10° 间隔内频数归一化分布。同样可以看出, P 轴方位主要集中在 SSW ~ SN ~ SSE 方位, 即 $190^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 之间, 约占总数的 59%。其次是 SE 方位, 即 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间, 约占总数的 26%。此外, 还有 9% 分布在 NE 方位, 即 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间。P 轴仰角有 82% 的地震的仰角小于 30° , 接近水平。T 轴方位主要集中在 NEE ~ EW ~ SEE, 即 $70^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 之间, 约占总数的 56%。其次是 NNE 和 NE 方位。T 轴仰角有 81% 的地震小于 30° , 接近水平。

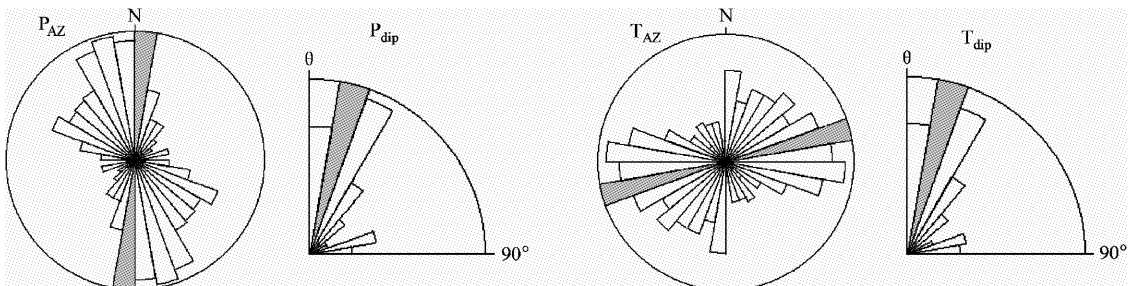


图 4 全部解 P 轴和 T 轴方位和仰角频数归一化分布

Fig. 4 Orientation of P-axis and T-axis and unitary distribution of the number of elevations of the earthquakes in the whole area of the Red River Fault Zone

分别对断裂带北段和中段的震源机制解参数 P 轴方位和仰角每 10° 间隔内频数归一化分布（图 5），可以看出，北段所表现出来的特征与全部解反映的特征接近一致，P 轴方位主要集中在近 SN ~ SSE，其次是 SEE。中段所显示出来的特征与北段有较大的区别，P 轴方位主要集中在 SE ~ SEE。

北段和中段 P 轴仰角小于 30° 的解分别占总数的 82% 和 75%，显示出以水平作用为主。相应的 T 轴方位北段与中段也有区别。南段虽然结果不多，但通过对断裂带近旁的强震震源机制解分析和吴幸鸿（2002）得到的结果分析，该段的特征与北段或整个断裂带的总体特征较为相似。

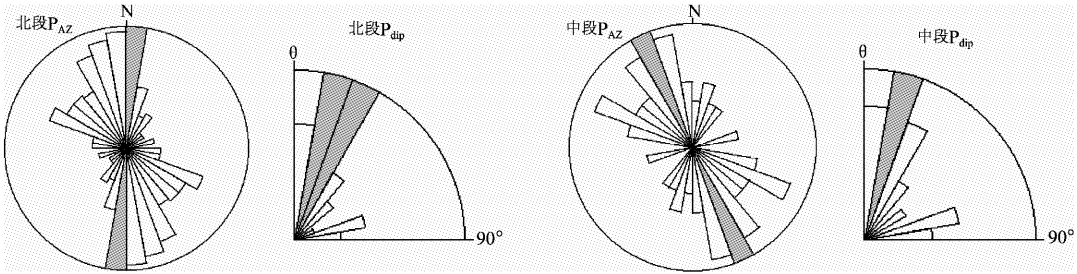


图 5 北段和中段 P 轴方位和仰角频数归一化分布
Fig. 5 Orientation of P-axis and unitary distribution of the number of elevations of the earthquakes in the north segment and middle segment

通过上述分析表明，沿红河断裂带现代构造应力场主压应力优势方位为 SSE ~ SN 方向，其次是 SE ~ SEE 方向，其仰角绝大多数接近水平，以水平作用为主。此外，还存在 NNE ~ NE 向的主压应力作用和以垂直作用为主的主压应力方式。资料分析可以看出，沿断裂带主压应力轴的优势方位分布有区别，由北段向中段出现一定偏转，由以 SSE ~ SN 为主转为以 SE ~ SEE 为主，由中段向南段又转为以 SSE 为主。一方面沿红河断裂带现代构造应力场具有明显的优势状态，显示出统一性，另一方面无论是主应力作用方向，还是其作用方式均表明，沿断裂带应力场还具有复杂性特征。

2.3 震源断裂与断裂带破裂特征

对全部解的两节面走向方位和倾角的频数分

别作归一化处理，图 6 给出它们每 10° 间隔内频数归一化分布。结果显示，节面 I 走向主要分布在 NW 方向，即 300° ~ 330° 之间，占总数的 54%。其次是 NEE ~ EW ~ SEE 方向，占总数的 33%。节面 I 中 73% 的倾角大于 70°，85% 的倾角大于 60°。节面 I 在 SSE 方向接近水平的压应力作用下，错动性质以右旋走滑为主。节面 II 走向主要分布在 NE ~ NEE 方向，即 30° ~ 60° 之间，占总数的 55%。其次是 NNW ~ SN ~ NNE 方向，占总数的 30%。节面 II 73% 的倾角大于 70°，87% 的倾角大于 60°。节面 II 错动性质以左旋走滑为主。震源机制聚类分析显示，占总数 56.9% 的第 10、第 8 和第 3 类解，NW 走向（平均 306°）的破裂面错动性质以右旋走滑为主。NE 走向（平均 35°）的破裂面错动性质以左旋走滑为主。吴幸鸿得到的发

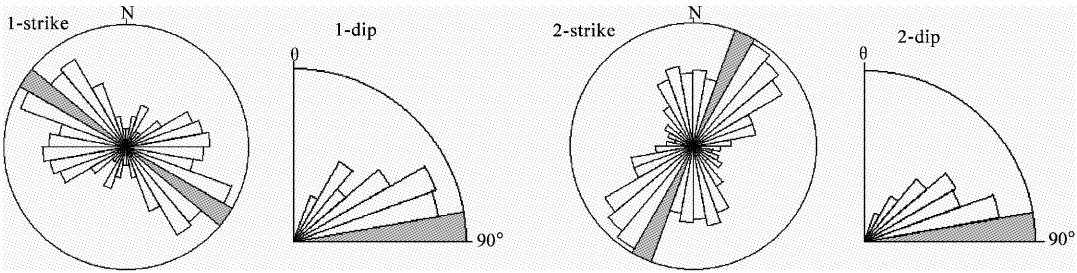


图 6 全部解两节面走向位和仰角频数归一分布
Fig. 6 Orientation of the strike and the unitary distribution of the number of elevations of two nodal planes of the earthquakes in the whole area of the Red River Fault Zone

生在断裂带南段的 4 个小震断层解,判定的破裂面走向均为 NW,平均 317° ,倾角很陡,平均 87° ,错动性质以右旋走滑为主。1652 年 7 月 13 日发生在红河断裂带北段弥渡县城与直力之间的 7 级地震,等震线长轴方向为 NW 向。毛玉平和韩新民(2003)认为其发震构造为红河断裂带主干断裂北段的弥渡至金宝山段,走向 330° 左右,倾角较陡。1925 年 3 月 16 日发生在大理凤仪的 7 级地震,等震线长轴呈 NW 向,大约为 $20^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{W}$ 。(毛玉平,韩新民,2003)认为其发震构造为红河断裂带主干断裂北段的江尾至直力段,走向 $340^\circ \sim 330^\circ$,倾角较陡。虢顺民等对红河断裂带分段研究得到,北段总体走向平均为 $322^\circ \sim 332^\circ$,中段为 $290^\circ \sim 320^\circ$ 。综合分析判定,确定节面 I 为主要的地震破裂面,其走向 NW,在 $310^\circ \sim 330^\circ$ 之间,倾角陡立,大于 60° ,在 SSE 方位的水平压应力作用下,呈现出以右旋走滑为主的错动性质。

除此而外,由前述震源机制解分类还显示,沿断裂带发生的地震,其破裂面还存在其它方向的构造断裂,呈现出与主要破裂面在走向、错动性质等方面的差异。

进一步对断裂带北段和中段分析,得到北段和中段节面 I 走向方位和倾角每 10° 间隔内频数

归一化分布(图 7)。由图 7 可以看出,北段和中段节面 I 走向分布有较大差别,北段优势方向分布明显,走向 NW ($300^\circ \sim 340^\circ$) 的节面占总数的 64%。其次是 NEE \sim EW \sim SEE 方向的节面,占总数的 30%。节面倾角大于 60° 者占总数的 88%,大于 70° 的,占总数的 76%。中段节面 I 走向分布相对集中在 NNE \sim NE 方向,占总数的近 30%,显示出微弱的优势。其它方向都较分散。节面倾角大于 60° 的,占总数的 65%,大于 70° 的,占总数的 51%,有 27% 的节面倾角小于 40° 。显然,北段和中段地震破裂面在空间展布和错动性质方面都有差异。节面 II 同样显现出这样的差异。南段虽然得到的震源机制解较少,但仍然可以看出,地震破裂面走向主要分布在 NW 向,并且倾角较陡。分析表明,沿断裂带的北、中、南各段,地震破裂面的空间展布存在明显差异,北段破裂面走向方位分布优势明显,主要集中在 NW 方向,其错动性质以右旋走滑为主。南段也有类似情况。中段破裂面空间展布优势不明显,相对集中分布的方位与北段不一致。破裂面错动性质除了以右旋走滑为主的地震,还存在一定数量的具有较大倾滑分量性质的地震,所占比例较北段相对较多。

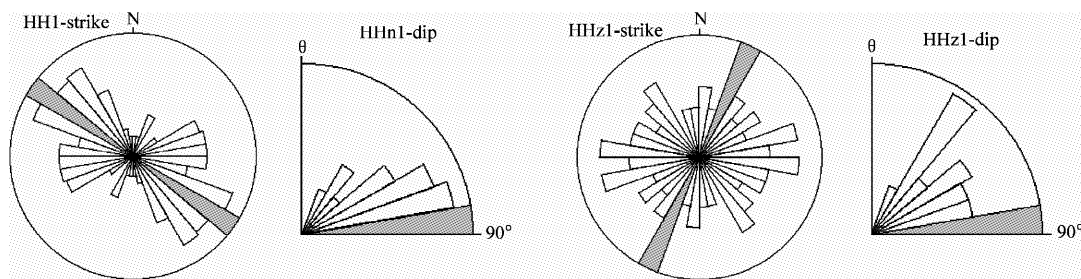


图 7 北段和中段节面 I 走向方位和倾角频数归一化分布

Fig. 7 Orientation of the strike and the unitary distribution of the number of elevations of the first nodal plane of the earthquakes in the whole area of the Red River Fault Zone in the north segment and middle segment

3 认识与讨论

(1) 由强震和中小地震震源机制解分析表明,沿红河断裂带地震震源机制解存在着主体类型,其主应力轴呈现主导优势方向,震源破裂面显示主要破裂特征。沿红河断裂带,走向 NNW \sim NW 方向,倾角陡峭的破裂面, SSE \sim SN 向,在以水

平作用为主的主压应力作用下,呈现出以右旋走滑为主的错动性质。它显示出了红河断裂带现代构造应力场的主体状态及震源破裂的主要特征。沿断裂带构造应力场主体状态相对稳定。此外,还存在其它类型的震源机制解,它们反映出沿红河断裂带构造应力场应力主轴方位还存在不止一种次要方向,不止一种作用方式。震源破裂面不止一种走向方位,破裂错动不止一种性质。应力

场空间分布及震源破裂特征存在着复杂性。

(2) 震源机制解资料反映出沿断裂带北、中、南不同分段,应力场状态和震源破裂特征存在差异,北段与中段差异显著,北段与南段较为相似。北段和南段更多的反映出沿断裂带构造应力场和震源破裂的主体特征,中段有较大的区别。沿断裂带主压应力轴优势方位由北段向中段出现一定偏转,由北段的以 SSE ~ SE 为主,中段偏转为以 SE ~ SEE 为主,到南段又转为以 SSE 为主。地震破裂面的空间展布和错动性质也存在差异。这些差异在一定程度上反映出沿断裂带分段构造活动的差异。

(3) 沿断裂带呈现的应力场和震源破裂的主体优势状态,与强震危险性密切相关。显然,构造应力场的优势作用方位,最容易造成主体破裂面上出现最大的剪切应力,成为最容易产生破裂滑动的场所,为地震危险性分析提供依据。构造应力场优势越显著,地震危险性越大。红河断裂带北段较南段和中段存在更大的强震危险性。

参考文献:

- 刁桂苓,于利民,李钦祖. 1992. 震源机制解的聚类分析[J]. 中国地震, 8(2): 86-92.
- 魏顺民,计凤桔,向宏发,等. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京:海洋出版社.
- 阚荣举,王绍晋,黄崑,等. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, 5(2): 79-90.
- 阚荣举,张四昌,晏凤桐,等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96-108.
- 梁尚鸿,李幼铭,束沛镒,等. 1984. 利用区域地震台网 P/S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 27(3): 249-257.
- 毛玉平,韩新民. 2003. 云南地区强震($M \geq 6$)研究[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 王绍晋,阚荣举,胡克坚. 1989. 云贵地区现代构造应力场空间分布与地震危险区划. 云贵地区地震危险性研究文集[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 吴幸鸿. 2002. 红河断裂带地震活动以及东南亚地壳与上部地幔构造之研究[D]. 台北:中央大学.
- 许忠淮,阎明,赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, 5(3): 268-279.

Focal Mechanism of Strong and Medium-small Earthquakes and Modern Tectonic Stress-Field of the Red-River Fault Zone

WANG Shao-jin, ZHANG Jian-guo, YU Qing-kun, LONG Xiao-fan
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Using the mechanism solutions of the strong and medium-small earthquakes in the Red-River Fault Zone and its vicinity, we analyze the distribution of the modern tectonic stress-field of the Fault Zone and discuss the Characteristics of the focal rupture of the earthquakes alongside the Fault Zone. We find that the orientation of the main stress of focal mechanism is predominant. Focal rupture plane exposes the general state of the modern tectonic stress field of the Fault Zone and shows the main features of focal rupture. The stress field and features of the focal rupture in north segment are remarkably different from the ones in the middle segment but highly similar with the ones in south segment.

Key words: focal mechanism solution, tectonic stress field, focal rupture