

冲绳海槽和琉球岛弧的地震 活动与应力场*

黄培华¹⁾ 苏维加²⁾ 陈金波¹⁾

1) 中国合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学系

2) 美国 MA02138 哈佛大学地球和行星科学系

摘要

依据 1977—1991 年 $m_b \geq 5.0$ 的地震目录和汇编的 68 个地震机制解, 分析了冲绳海槽和琉球岛弧的地震活动特征和应力状态, 提出了 29°N 附近的吐噶喇海峡断裂带是一条切穿岩石圈的地震断裂带, 指出产生该断裂带南北两侧俯冲板舌内应力状态不一样的主要原因是两者俯冲深度不同所致. 提出了冲绳海槽在进行 NW-SE 方向的扩张过程中同时伴有垂直于海槽的正断层作用. 并初步提出了冲绳海槽区有两个发震层分布的可能.

关键词 冲绳海槽; 琉球岛弧; 地震活动; 应力场

引言

冲绳海槽和琉球岛弧位于中国东海和琉球海沟之间, 是菲律宾海板块向欧亚板块俯冲而形成的西太平洋边缘活动带上重要的弧后盆地和岛弧. 这个地区的地震活动、应力场、地质构造及其演化, 长期以来一直受到地学界的注意. Konishi(1965)首先提出冲绳海槽和琉球岛弧被吐噶喇和宫古两条 NWW 向左行剪切断裂带分割为北段、中段和南段三部分. Katsumata 和 Sykes(1969)分析了 1961—1967 年地震资料, 提出了琉球岛弧下菲律宾海板块俯冲形成的向北西倾斜的地震带. Isacks 和 Malnar(1971)认为这个俯冲带沿倾向为挤压带. Wu(1970)研究了冲绳海槽南端和台湾的地震机制解. 80 年代以来, Lee 等(1980)依据地震测深记录分析, 证实了冲绳海槽是由一系列张性正断层构成的地堑盆地所组成. 地壳厚度 13.6 km, 加上海水层, 莫霍面深度为 15.5 km. Shiono 等(1980)较详细地分析了 1964—1975 年地震资料, 提出吐噶喇海峡北侧俯冲带倾角陡, 属拉张型; 以南倾角较缓, 属挤压型. Eguchi 和 Uyeda(1983)初步研究了海槽的应力场. 最近, 臧绍先等(1989)利用 1966—1982 年地震分布和地震机制解, 论证了琉球岛弧的不同地段 Benioff 带形态和应力状态, 并探讨了菲律宾海板块俯冲作用对中国大陆及华北地

* 1993 年 1 月 22 日收到初稿, 1993 年 11 月 25 日决定采用.

区应力场的影响。

本文依据 1977—1991 年 $m_b \geq 5.0$ 地震目录和汇编的 1961—1991 年 $m_b \geq 5.0$ 地震的 68 个震源机制解(表 1), 分析了冲绳海槽和琉球区的地震活动分布规律和应力场特征, 讨论了吐噶喇海峡断裂带的性质和特点, 探讨了菲律宾海板块俯冲板舌在不同地段呈现不同应力状态的主要原因和冲绳海槽区具有两个发震层分布的可能性。

表 1 震源机制解

| No. | 日期 | 时间 | φ (°N) | λ (°E) | h km | m_b | 节面 A | | 节面 B | | P 轴 | | N 轴 | | T 轴 | | 备注 |
|-----|------------|-------|-------------------|-------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| | 年-月-日 | 时:分 | | | | | 走向 (°) | 倾角 (°) | 走向 (°) | 倾角 (°) | 方位 (°) | 倾角 (°) | 方位 (°) | 倾角 (°) | 方位 (°) | 倾角 (°) | |
| 01 | 1984-03-19 | 03:04 | 25.89 | 129.60 | 42 | 5.3 | 64 | 53 | 177 | 62 | 34 | 49 | 204 | 41 | 298 | 5 | 海沟 |
| 02 | 1989-01-03 | 04:41 | 29.20 | 130.99 | 23 | 5.8 | 3 | 35 | 201 | 56 | 142 | 76 | 15 | 8 | 283 | 11 | 海沟 |
| 03 | 1961-07-18 | | 27.74 | 131.73 | 23 | 6.6 | | | | 177 | 62 | 29 | 24 | 294 | 13 | 海沟 ^③ | |
| 04 | 1968-08-03 | | 25.60 | 128.40 | 19 | 6.5 | | | | 274 | 64 | 48 | 20 | 145 | 18 | 海沟 ^③ | |
| 05 | 1981-12-08 | 05:11 | 29.30 | 131.15 | 28 | 5.5 | 44 | 63 | 221 | 27 | 133 | 18 | 223 | 1 | 317 | 72 | 北段 |
| 06 | 1988-04-04 | 15:43 | 30.21 | 130.83 | 42 | 5.2 | 46 | 77 | 163 | 27 | 117 | 28 | 220 | 23 | 344 | 55 | 北段 |
| 07 | 1986-06-02 | 03:56 | 29.58 | 130.67 | 26 | 5.2 | 48 | 73 | 201 | 19 | 131 | 27 | 225 | 8 | 331 | 61 | 北段 |
| 08 | 1987-03-28 | 11:26 | 30.73 | 131.76 | 15 | 5.1 | 29 | 73 | 168 | 23 | 108 | 26 | 205 | 14 | 321 | 60 | 北段 |
| 09 | 1980-02-27 | 06:24 | 29.05 | 131.05 | 15 | 5.1 | 29 | 75 | 151 | 26 | 101 | 27 | 203 | 21 | 326 | 55 | 北段 |
| 10 | 1980-03-29 | 17:04 | 28.95 | 129.89 | 15 | 5.1 | 53 | 75 | 210 | 17 | 137 | 29 | 231 | 6 | 332 | 60 | 北段 |
| 11 | 1991-08-03 | 08:33 | 29.37 | 128.54 | 24 | 5.4 | 249 | 89 | 339 | 86 | 294 | 2 | 51 | 86 | 204 | 4 | 北段 |
| 12 | 1976-12-14 | 19:35 | 28.26 | 130.65 | 13 | 5.6 | 33 | 72 | 13.5 | 58 | 170 | 38 | 08 | 52 | 267 | 10 | 中段 ^① |
| 13 | 1990-05-17 | 23:28 | 26.31 | 127.42 | 48 | 6.1 | 38 | 63 | 231 | 28 | 133 | 17 | 41 | 5 | 295 | 72 | 中段 |
| 14 | 1984-08-28 | 19:04 | 27.16 | 128.31 | 33 | 5.9 | 57 | 67 | 207 | 26 | 138 | 21 | 232 | 12 | 349 | 66 | 中段 |
| 15 | 1985-02-28 | 20:53 | 27.22 | 128.41 | 37 | 5.9 | 51 | 68 | 226 | 22 | 139 | 23 | 230 | 2 | 325 | 67 | 中段 |
| 16 | 1986-03-24 | 02:01 | 28.36 | 129.86 | 15 | 5.6 | 43 | 79 | 206 | 12 | 130 | 34 | 222 | 3 | 318 | 56 | 中段 |
| 17 | 1988-10-08 | 14:39 | 28.79 | 130.17 | 53 | 5.2 | 69 | 80 | 180 | 26 | 139 | 31 | 24 | 23 | 5 | 49 | 中段 |
| 18 | 1984-10-02 | 04:42 | 26.15 | 128.58 | 10 | 5.6 | 51 | 82 | 193 | 10 | 135 | 37 | 230 | 6 | 328 | 53 | 中段 |
| 19 | 1969-06-19 | 07:03 | 28.13 | 130.00 | 27 | 5.5 | 110 | 74 | 230 | 30 | 142 | 55 | 12 | 25 | 270 | 25 | 中段 |
| 20 | 1986-04-30 | 23:14 | 28.60 | 129.72 | 39 | 5.5 | 228 | 86 | 335 | 15 | 153 | 48 | 47 | 14 | 305 | 39 | 中段 |
| 21 | 1990-09-30 | 19:05 | 24.15 | 125.02 | 20 | 5.9 | 238 | 19 | 35 | 72 | 131 | 27 | 37 | 7 | 294 | 62 | 南段 |
| 22 | 1980-07-12 | 18:33 | 23.83 | 124.93 | 15 | 5.2 | 234 | 20 | 39 | 71 | 133 | 26 | 40 | 5 | 300 | 64 | 南段 |
| 23 | 1981-12-12 | 04:52 | 23.96 | 125.95 | 10 | 6.1 | 231 | 58 | 15.9 | 64 | 283 | 4 | 190 | 46 | 17 | 44 | 南段 ^① |
| 24 | 1984-05-27 | 03:39 | 28.55 | 127.94 | 13 | 5.7 | 80 | 36 | 272 | 55 | 209 | 79 | 88 | 6 | 357 | 9 | 海槽 |
| 25 | 1990-06-16 | 04:53 | 27.43 | 127.18 | 15 | 5.6 | 9 | 32 | 243 | 69 | 188 | 58 | 53 | 24 | 314 | 20 | 海槽 |
| 26 | 1977-12-22 | 04:45 | 29.00 | 127.45 | 15 | 5.5 | 92 | 33 | 233 | 64 | 107 | 65 | 242 | 18 | 337 | 16 | 海槽 |
| 27 | 1980-03-02 | 23:29 | 26.67 | 126.12 | 15 | 5.5 | 193 | 81 | 97 | 57 | 60 | 30 | 207 | 55 | 321 | 16 | 海槽 |
| 28 | 1986-07-25 | 23:41 | 26.29 | 125.73 | 15 | 5.5 | 101 | 89 | 11 | 83 | 236 | 4 | 110 | 83 | 326 | 6 | 海槽 |
| 29 | 1980-03-09 | 08:41 | 26.85 | 126.06 | 15 | 5.0 | 183 | 89 | 93 | 71 | 50 | 14 | 187 | 71 | 317 | 12 | 海槽 |
| 30 | 1989-09-05 | 11:25 | 29.29 | 127.93 | 15 | 5.2 | 30 | 77 | 294 | 64 | 255 | 28 | 54 | 61 | 160 | 9 | 海槽 |
| 31 | 1989-09-03 | 00:19 | 25.61 | 124.78 | 15 | 5.3 | 282 | 87 | 191 | 59 | 52 | 19 | 287 | 59 | 151 | 23 | 海槽 |
| 32 | 1989-11-06 | 15:12 | 25.64 | 124.85 | 15 | 5.2 | 20 | 60 | 271 | 60 | 236 | 45 | 56 | 45 | 146 | 0 | 海槽 |
| 33 | 1985-01-15 | 09:56 | 25.05 | 124.95 | 23 | 5.2 | 264 | 71 | 36 | 27 | 202 | 59 | 77 | 18 | 339 | 23 | 海槽 |
| 34 | 1978-09-11 | 07:40 | 24.41 | 124.77 | 15 | 5.7 | 308 | 49 | 142 | 42 | 158 | 82 | 314 | 7 | 44 | 3 | 海槽 |
| 35 | 1977-12-22 | 04:45 | 29.58 | 127.89 | 46 | 5.5 | 121 | 40 | 237 | 70 | 105 | 50 | 250 | 33 | 352 | 17 | 海槽 ^② |
| 36 | 1980-03-02 | 23:28 | 26.99 | 126.73 | 41 | 5.4 | 19 | 58 | 112 | 56 | 70 | 22 | 196 | 56 | 329 | 24 | 海槽 ^① |
| 37 | 1978-05-23 | 07:50 | 31.00 | 130.45 | 175 | 6.3 | 25 | 69 | 229 | 23 | 122 | 23 | 28 | 9 | 279 | 65 | 俯北 |

续表 1

| No. | 日期 | 时间 | φ ($^{\circ}$ N) | λ ($^{\circ}$ E) | h km | m_b | 节面 A | | 节面 B | | P 轴 | | N 轴 | | T 轴 | | 备注 |
|-----|------------|-------|------------------------------|------------------------------|---------|-------|------|----|------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----------------|
| | 年-月-日 | 时:分 | | | | | 走向 | 倾角 | 走向 | 倾角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | |
| 38 | 1987-07-03 | 10:10 | 30.99 | 130.40 | 166 | 5.8 | 5 | 86 | 239 | 6 | 100 | 41 | 6 | 5 | 270 | 49 | 俯北 |
| 39 | 1983-06-21 | 17:06 | 29.69 | 129.45 | 155 | 5.9 | 8 | 78 | 162 | 13 | 93 | 33 | 187 | 6 | 286 | 57 | 俯北 |
| 40 | 1982-07-05 | 08:57 | 30.77 | 130.47 | 119 | 5.7 | 41 | 89 | 304 | 10 | 141 | 43 | 41 | 10 | 301 | 45 | 俯北 |
| 41 | 1967-05-18 | 23:39 | 30.91 | 130.90 | 64 | 5.5 | 188 | 20 | 133 | 78 | 237 | 32 | 137 | 16 | 54 | 24 | 俯北 ^① |
| 42 | 1978-09-12 | 00:41 | 29.81 | 129.51 | 151 | 5.2 | 16 | 62 | 151 | 38 | 88 | 12 | 184 | 23 | 330 | 63 | 俯北 ^① |
| 43 | 1968-05-14 | 14:05 | 29.93 | 129.39 | 162 | 5.9 | 87 | 28 | 245 | 64 | 162 | 19 | 69 | 10 | 316 | 69 | 俯北 ^① |
| 44 | 1970-03-23 | 12:14 | 29.82 | 129.39 | 162 | 5.7 | 1 | 48 | 170 | 42 | 265 | 5 | 185 | 5 | 13 | 75 | 俯北 ^① |
| 45 | 1969-12-31 | 19:01 | 28.55 | 129.15 | 62 | 5.8 | 2 | 44 | 235 | 60 | 194 | 59 | 37 | 29 | 301 | 9 | 俯中 ^① |
| 46 | 1981-02-24 | 06:45 | 28.02 | 129.81 | 65 | 5.6 | 282 | 66 | 131 | 28 | 168 | 67 | 288 | 12 | 22 | 20 | 俯中 |
| 47 | 1989-03-17 | 02:21 | 26.82 | 127.08 | 102 | 5.8 | 243 | 85 | 348 | 18 | 318 | 38 | 62 | 17 | 171 | 47 | 俯中 |
| 48 | 1991-04-14 | 08:09 | 26.98 | 127.39 | 130 | 6.2 | 230 | 89 | 136 | 14 | 333 | 42 | 230 | 14 | 126 | 44 | 俯中 |
| 49 | 1988-11-07 | 03:24 | 25.69 | 126.09 | 113 | 5.7 | 230 | 80 | 55 | 10 | 321 | 35 | 230 | 1 | 139 | 55 | 俯中 |
| 50 | 1982-04-09 | 11:51 | 25.99 | 126.44 | 114 | 5.5 | 343 | 59 | 103 | 50 | 307 | 55 | 138 | 35 | 44 | 5 | 俯中 |
| 51 | 1980-04-25 | 11:35 | 26.89 | 126.80 | 126 | 5.2 | 213 | 80 | 150 | 20 | 324 | 52 | 210 | 20 | 109 | 34 | 俯中 ^① |
| 52 | 1990-12-12 | 03:25 | 27.20 | 126.12 | 160 | 5.3 | 54 | 73 | 237 | 17 | 323 | 62 | 54 | 1 | 145 | 28 | 俯中 |
| 53 | 1969-03-19 | 13:59 | 28.81 | 128.34 | 168 | 5.6 | 243 | 70 | 174 | 46 | 18 | 47 | 225 | 39 | 123 | 15 | 俯中 ^① |
| 54 | 1987-05-03 | 17:21 | 28.31 | 127.03 | 207 | 5.2 | 276 | 88 | 16 | 11 | 355 | 42 | 95 | 11 | 197 | 46 | 俯中 |
| 55 | 1981-01-02 | 15:39 | 29.03 | 128.38 | 216 | 6.1 | 150 | 34 | 15 | 64 | 323 | 63 | 184 | 21 | 88 | 16 | 俯中 |
| 56 | 1986-05-11 | 01:24 | 26.37 | 125.21 | 203 | 5.9 | 169 | 21 | 18 | 72 | 303 | 62 | 195 | 10 | 100 | 26 | 俯中中段 |
| 57 | 1977-09-02 | 05:41 | 26.43 | 126.35 | 92 | 5.6 | 198 | 84 | 112 | 58 | 330 | 31 | 198 | 58 | 69 | 18 | 俯中 ^① |
| 58 | 1989-03-20 | 02:36 | 23.96 | 124.67 | 63 | 5.3 | 43 | 63 | 24 | 28 | 140 | 18 | 48 | 8 | 293 | 70 | 俯南 |
| 59 | 1981-04-18 | 02:05 | 25.79 | 125.82 | 84 | 5.6 | 95 | 76 | 263 | 14 | 4 | 32 | 94 | 3 | 186 | 58 | 俯南 ^① |
| 60 | 1965-03-16 | 17:05 | 25.45 | 125.25 | 94 | 5.6 | 130 | 10 | 130 | 80 | 40 | 35 | 130 | 0 | 220 | 55 | 俯南 ^② |
| 61 | 1968-05-03 | 05:32 | 25.19 | 124.68 | 95 | 5.7 | 113 | 36 | 233 | 70 | 290 | 58 | 65 | 29 | 162 | 21 | 俯南 ^① |
| 62 | 1981-04-18 | 02:05 | 25.25 | 125.41 | 98 | 5.6 | 277 | 77 | 111 | 13 | 9 | 32 | 277 | 3 | 182 | 58 | 俯南 |
| 63 | 1973-09-11 | 23:18 | 25.65 | 124.58 | 137 | 5.7 | 100 | 56 | 276 | 70 | 314 | 42 | 151 | 50 | 52 | 10 | 俯南 ^① |
| 64 | 1974-01-02 | 14:41 | 26.02 | 124.38 | 203 | 5.5 | 358 | 68 | 178 | 22 | 267 | 67 | 358 | 0 | 88 | 23 | 俯南 ^① |
| 65 | 1976-11-02 | 19:29 | 26.77 | 125.27 | 215 | 5.5 | 256 | 64 | 150 | 60 | 296 | 42 | 110 | 48 | 222 | 3 | 俯南 ^① |
| 66 | 1983-08-25 | 20:23 | 33.42 | 131.31 | 127 | 6.1 | 9 | 55 | 230 | 42 | 117 | 7 | 25 | 22 | 224 | 67 | 日本九州 |
| 67 | 1985-01-26 | 21:36 | 32.26 | 131.36 | 117 | 5.8 | 351 | 66 | 236 | 46 | 102 | 12 | 10 | 37 | 214 | 51 | 日本九州 |
| 68 | 1978-07-04 | 02:41 | 32.33 | 131.36 | 120 | 5.7 | 33 | 65 | 286 | 58 | 158 | 4 | 63 | 47 | 252 | 43 | 日本九州 |

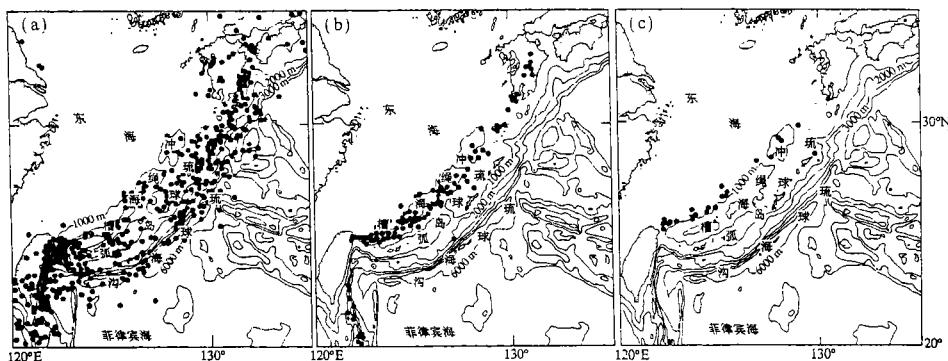
注: 本文采用 1977—1991 年 $m_b \geq 5.0$ 地震的 CMT 震源机制解。

海沟——琉球海沟; 北段、中段和南段——琉球岛弧各段浅震(<60 km); 海槽——冲绳海槽; 俯北、俯中和俯南——俯冲板舌各段深度 >60 km 地震。

① 戚绍先等, 1989; ② Eguchi, T. and Uyeda, S., 1983; ③ Shiono, K. et al., 1980.

1 冲绳海槽和琉球区的地震活动特征

本文的地震目录是用计算机从美国哈佛大学地球和行星科学系地震数据库中直接取出, 再绘制成图 1(图 1 范围: 20° — 35° N, 120° — 135° E; 图 1a, b, c 中绘制的分别为震源深度 <100 km, 100 — 200 km 和 >200 km 的地震)。

图1 沖繩海槽—琉球海沟 $m_b \geq 5.0$ 地震分布图

(a) 震源深度 0—100 km; (b) 震源深度 100—200 km; (c) 震源深度 >200 km

从图1a, b, c的地震分布来看, 地震活动位于琉球海沟两侧至冲绳海槽西缘, 宽达300 km。从日本九州南端至台湾东北呈NE-SW向延伸长达近1 000 km的条带上, 震源深度由东南向西北逐渐加深, 显示出菲律宾海板块向西北俯冲于欧亚大陆板块之下的图象。值得注意的是: (1) 29°—30°N附近的吐噶喇海峡断裂带南北两侧的Benioff带倾角和板舌俯冲的深度有明显的差异。北面的地震条带在平面图上宽度较狭窄, 揭示了该处的Benioff带倾向西北且倾角较陡, 反映俯冲板舌的俯冲角度达73°左右(臧绍先等, 1989), 但俯冲深度较浅。从该处最深的地震震源深度推测, 约在200 km左右。南面的地震条带较宽, Benioff带倾角较缓, 板舌俯冲角度在55°左右, 但俯冲的深度较大。从该处最深的地震深度(约280 km左右)推测, 约达300 km深处; (2) Katsumata和Syskes(1969)曾认为, 在24°—25°N、126°—128°E之间地震稀少区是未来发生大地震的围空区。在图1a中, 这个空区是位于25°—26°N, 126°—128°E之间。若以他们利用的地震目录年限(1961—1967年)来计算, 这个地震围空区至今已存在了30 a之久; (3)关于吐噶喇海峡断裂带性质问题。从图1b震源深度100—200 km的地震分布来看, 断裂带两侧俯冲的地震带宽度是不同的, 北窄南宽; 断裂带北侧俯冲板舌的俯冲角度比南侧的将近陡18°; 俯冲的深度南侧比北侧深100 km左右。可见, 吐噶喇海峡断裂带不仅是一条浅部的剪切断裂带, 而且是切穿岩石圈的深大断裂带。

2 沖繩海槽和琉球区应力场特征

本文除采用1977—1991年 $m_b \geq 5.0$ 的48个地震的CMT震源机制解外, 还引用了Shiono等(1980)、Eguchi和Uyeda(1983), 以及臧绍先等(1989)的20个较可靠或有参考价值的震源机制解, 共有68个震源机制解(表1)结果对冲绳海槽和琉球区的浅震应力场进行分析研究。

2.1 琉球海沟带

位于海沟带的震源机制较少, 除本文采用的两个地震机制解(No. 1和2)外, 还引用了Shiono等(1980)研究过的两个地震机制解(No. 3和4)。这4个地震机制解的T轴都近于水平, 倾角仅5°—18°, 引张方向为NW向, 与海沟走向大致垂直。它们一致反映了

琉球海沟仍继续处于 NW-SE 方向的拉张作用之下(图 3).

2.2 琉球岛弧带

北部(吐噶喇海峡, 29°N 以北), No. 5-10 震源机制解的 P 轴方位角在 108°-137°, 倾角 18°-29°, T 轴倾角大(55°-72°), 而 N 轴倾角很小(1°-23°), 显示出较典型的压性逆倾滑断层解. No. 11 地震位于吐噶喇海峡断裂带上, 属走滑断层解. No. 12, 16, 17, 19 和 20 地震, 因处于吐噶喇海峡断裂带附近南侧, 机制解 P 轴虽然大多数的方位仍为 SE(130°-153°), 但属介于逆倾滑-走滑型之间. 中段, 从吐噶喇海峡至宫古凹陷(25°N), No. 13-15 和 18 地震, P 轴方位角较一致, 为 133°-139°, 倾角 17°-37°, T 轴 53°-72°, N 轴近于水平, 为 2°-12°, 也显示出典型的压性逆倾滑断层解. 南段, 宫古凹陷以南, No. 21-22 地震, P 轴方位角与北段和中段一致, 为 131°-133°, 倾角 26°-27°, T 轴倾角大, 为 62°-64°, N 轴水平, 为 5°-7°, 同样显示了典型的压性逆倾滑断层解. 由上述可见, 沿着整个琉球岛弧, 从北段经中段至南段, 主压应力轴优势方向为 NW-SE 向, 反映了菲律宾海板块向欧亚板块俯冲的过程中, 使琉球岛弧现在仍处于较强烈的 NW-SE 向的挤压应力作用之下.

2.3 冲绳海槽

Eguchi 和 Uyeda (1983) 曾研究过 No. 35 地震, 它位于海槽北端, T 轴方位角为 352°, 反映了海槽受着近南北向的拉伸作用. 减绍先等(1989)研究了 4 个海槽内(包括上述的 No. 35 地震)和 4 个海槽边缘的震源机制解认为, 海槽浅震基本上反映 NNW 方向的拉伸. 本文依据冲绳海槽区的 11 个新的震源机制解(图 2, No. 24-34), 进行了较详细的分析后表明, 位于海槽内的地震, T 轴方向很集中. 海槽北段, 海槽走向 NNE, No. 35, 30, 26 和 24 地震(No. 35 地震位于 No. 30 地震稍北处), T 轴方向近南北向至 NNW 向(337°-357°, 与 No. 35 地震机制解一致). 海槽中段, 海槽走向 NE-SW, No. 25, 36, 29, 27, 28, 32, 33 和 31 地震(No. 36 地震位于 No. 29 地震的偏东北处), T 轴方向除 No. 33 为 339°外, 均为 NW 向(314°-331°). 南段海槽转为 NEE-SWW 向, 仅有一个 No. 34 地震, T 轴方向与海槽走向接近一致, 为 NE(44°)向. 由上述可见, 海槽区的 T 轴方位角随着海槽走向变化而呈有规律的改变. 显示了海槽北段正进行着与海槽走向相一致的近于南北向的拉张伸展运动; 海槽中段正进行着与菲律宾海板块向 NW 俯冲方向相一致的 NW 向弧后盆地扩张运动, 形成海槽宽度最大的扩张中心地段; 南段似乎也进行着与海槽走向相一致的拉伸运动.

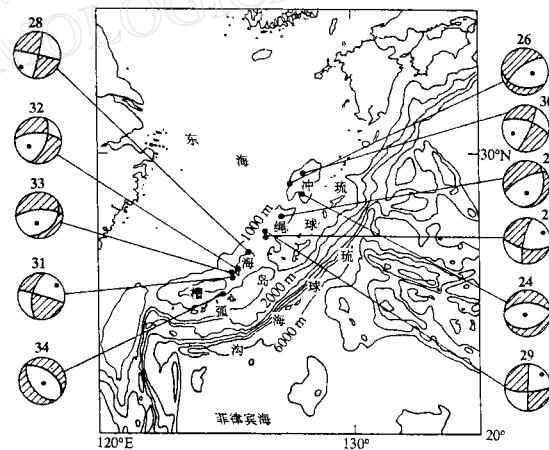


图 2 冲绳海槽区 $m_b \geq 5.0$ 浅震震源机制解分布图. 图中机制解编号见表 1, 黑区为压缩波区, “.”是 P 轴出地点

从图 2 中还可看出, 海槽浅震有两种类型的断层解: 张性正倾滑断层解和走滑断层解。从代表断层面的节面走向可以明显地显示出两组方向的断裂: 一组是与海槽走向相一致的断裂; 另一组是与海槽走向相垂直的断裂, 特别是正倾滑断层解的节面大多横切海槽。这些反映了冲绳海槽在进行 NW-SE 方向扩张的同时, 还伴随着切割海槽的横向张性断层作用。

3 菲律宾海板块俯冲板舌的应力状态

对震源深度 >100 km 左右的震源机制解主应力轴分析表明: (1) 吐噶喇海峡以北 7 个地震 (No. 37—44, 除去 No. 41 震源深度不足 100 km 以外) 和日本九州 3 个地震 (No. 66—68 作为对比的参考), 震源深度在 117—175 km, T 轴倾角在 43° — 75° , 均位于俯冲板舌平面内, 反映了北段的俯冲板舌处于拉伸状态; (2) 吐噶喇海峡和宫古凹陷之间的中段, 俯冲板舌内应力状态与北段不同。在深度 100 km 左右, No. 47 和 49 的震源在 100 km 左右, T 轴倾角为 47° 和 55° 。在 120 km 以下, No. 51—56 的震源深度为 126—216 km, P 轴倾角在 55° — 63° (图 3)。显示出该区段俯冲板舌在深度 100 km 左右为拉伸状态, 100 km 以下的板舌前端转变为压缩状态。但也有少数地震, 例如 No. 48 和 54 地震, T 轴和 P 轴的倾角基本相等, 与俯冲板舌的应力状态不协调; (3) 宫古凹陷以南, 俯冲板舌的应力状态与中段相似。在深度 60—90 km 左右, No. 58—62 地震, T 轴在 55° — 70° (除 No. 61 地震外), 板舌内为拉伸状态。震源深度在 100 km 以下, 如 No. 63—65 地震, P 轴在 42° — 67° , 反映了板舌前端为压缩状态。

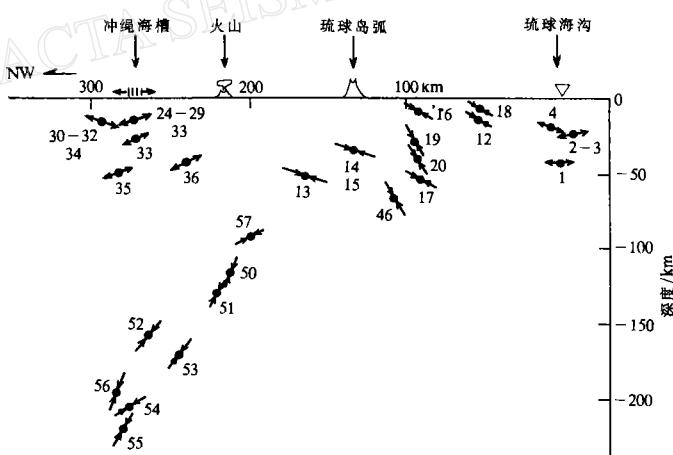


图 3 垂直于琉球海沟中段区 (29° — 25° N) 剖面主应力轴分布图。

剖面内地震编号见表 1。海沟区 No. 1—4, 琉球岛弧 No. 13—20,
俯冲板舌 No. 46—57, 海槽区 No. 24—35

关于产生吐噶喇海峡南北两侧俯冲板舌内应力状态不同的主要原因, 除臧绍先等 (1989) 认为与俯冲带倾角陡缓和海沟两侧板块会聚速度大小的不同有关外, 更重要的原

因可能是吐噶喇海峡北侧和南侧的俯冲板舌所达到的俯冲深度不同所致。Turcotte 和 Schubert (1982) 曾指出, 俯冲板舌的负浮力中心约在 200—300 km 的深度。北段, 依据震源最大深度约在 180 km 左右, 推测该区段板舌的俯冲深度小于 200 km。这一区段海沟两侧板块会聚的相对运动速率为 4.9 cm/a (Seno, 1977)。再加上该处板舌的弯曲度大, 又受到负浮力作用影响, 故北段俯冲板舌呈拉伸状态。中段和南段, 震源最大深度可达

280 km, 推测板舌俯冲深度可达到近 300 km 左右。该处海沟两侧板块会聚的相对速度较大, 中段 5.6 cm/a, 南段 6.3 cm/a (Seno, 1977)。板舌弯曲度较小, 在负浮力中心以上的板舌内, 板舌呈拉张状态; 在负浮力中心以下的板舌前端则处于挤压状态(图 4)。

4 冲绳海槽发震层、应力场形成和海槽的发育阶段探讨

4.1 海槽 15 km 发震层与莫霍界面的关系

图 2 中冲绳海槽内 11 个地震的 CMT 机制解中, 有 10 个地震(除 No. 33 地震深度 23 km 外)的震源深度在 15 km 左右。若依据 CMT 地震目录, 表 1 中 No. 35 和 36 地震的深度也都为 15 km。笔者认为, 这是海槽区一个较浅的发震层, 它与海槽区的莫霍面深度基本一致。笔者依据布格重力异常(gB)与莫霍面深度(H)关系式(Woolard and Strange, 1962)

$$H = 40.5 - 32.5 \left[\frac{(gB + 75)}{275} \right]$$

将海槽中段和南段的布格重力异常值($140 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^2$)(金翔龙等, 1983)代入, 获得莫霍面深度 $H = 15.1 \text{ km}$ (Huang, 1985)。这一数值与折射地震测量结果(15.5 km)相符 (Lee *et al.*, 1980)。可见, 15 km 左右的发震层是与海槽下莫霍间断面有关的。

4.2 海槽 40—50 km 深度可能的发震层与岩石圈底部界面的关系

值得注意的是, 在臧绍先等(1989)研究的海槽区地震中震源深度多在 40—50 km 左右, 如该文中的 No. 41, 42 和 43 地震。故初步推测这一深度可能为海槽区下另一个稍深的发震层, 并与该区岩石圈底部界面相吻合。Huang(1985)曾利用剩余重力异常(RGA)与岩石圈厚度(L)关系式(Yoshii, 1973)

$$L = \frac{\{ [FA - 2\pi G \sum_{i=1}^n h_i (\rho_i - \rho_m)] - \text{const} \}}{4.5}$$

式中, FA 为自由重力异常值, 海槽中段和南段取 $25 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^2$ (Watts *et al.*, 1978);

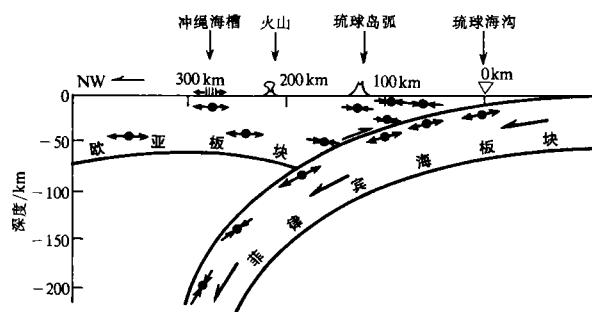


图 4 冲绳海槽—琉球海沟 29°—25°N 间菲律宾海板块向欧亚大陆板块俯冲形成的应力场模式图。俯冲板块 $<100 \text{ km}$ 的应力状态参照 Shiono 等(1980)图 6

G 为引力常数, h_i 为第 i 层地壳厚度, ρ_i 为第 i 层地壳密度, ρ_m 为地幔密度, 据 PREM 地球模型, 波速 8.16 km/s 上地幔密度为 3.38 g/cm^3 (Dziewonski and Anderson, 1981); const 取 RGA 值为 $400 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^2$ (依据太平洋岩石圈形成年龄与 RGA 值的相应关系). 将上述数据代入上式中, 得到冲绳海槽中段和南段岩石圈厚度为 47 km . 自 1961 年以来, 地震目录中海槽区 $m_b \geq 5.0$ 地震较少, 发生于 50 km 左右的地震就更少. 本文依据上述的一些现象提出, 海槽区岩石圈底界面处存在着另一发震层的可能, 供今后深入研究时参考.

4.3 海槽的形成年龄、发育阶段与地震活动和应力场的关系

利用半无限空间热传导方程, 若仅考虑向上的热传导作用, 热流值 (Φ) 近似地与其岩石圈年龄 (t) 平方根成反比 (Turcotte and Schubert, 1982)

$$t = T_m^2 \left(\frac{k \rho_m c}{\pi} \right) \frac{1}{(\Phi - kr)^2}$$

式中, k 为热传导率, $3.1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, T_m 为地幔热源温度, 1250°C , ρ_m 为地幔密度, 3.38 g/cm^3 ; c 为比热, $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; r 为热梯度常数, 0.5°C/km ; Φ 为热流值, 取 3 HFU ^① 等值线值 (位于海槽中部和南部对称部分, Hays *et al.*, 1978). 上述数据代入公式获得冲绳海槽形成的年龄 (t) = 10.6 Ma 即中新世晚期. 刘光鼎 (1988) 也认为, 菲律宾海板块开始向西北俯冲, 琉球海沟、岛弧和冲绳海槽的形成都是在中新世末期. 如冲绳海槽形成年龄按 11 Ma 和海槽宽度 80 km 估算, 海槽的扩张速率为 0.72 cm/a . 参照 Wilson (1968) 提议的海盆发育阶段的有关指标, 冲绳海槽现阶段应介于胚胎期 (如东非裂谷) 与幼年期 (如红海) 之间 (表 2). 建议冲绳海槽现阶段称为海盆发育的婴儿期阶段.

表 2 冲绳海槽与东非裂谷和红海对比表

| 地 区 | 地壳厚度 km | 扩展速率 cm/a | 地壳性质 | 地形特征 | 海盆发育阶段 |
|------|------------|--------------|------|------|--------|
| 东非裂谷 | 25 | <0.1 | 陆壳 | 裂谷 | 胚胎期 |
| 冲绳海槽 | 15 | 0.7 | 混合壳 | 海槽 | 婴儿期 |
| 红海 | <10 | 2.0 | 洋壳 | 海盆 | 幼年期 |

综上所述, 可得出这样的结论: 冲绳海槽、琉球岛弧和琉球海沟的地震活动、应力场特征和发震层深度, 不仅仅是菲律宾海板块向欧亚板块俯冲作用的产物, 同时也是冲绳海槽作为弧后盆地不断进行扩张向幼年期海盆发展的结果.

参 考 文 献

- 金朔龙、喻普之、林美华、李常珍、王惠卿, 1983. 冲绳海槽地壳结构性质之初步探讨. 海洋与湖沼, 14, 2, 105—116.
- 刘光鼎, 1988. 东海的地质与油气勘探. 地球物理学报, 31, 2, 184—197.
- 臧绍先、宁杰元、许立忠, 1989. 琉球岛弧地区的地震分布、Benioff 带及应力状态. 地震学报, 11, 113—123.
- Bowin, C, and Reynolds, P. H., 1975. Radiometric ages from Ryukyu Arc region and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age from biotite

① $1\text{HFU} = 41.84 \text{ mW/m}^2$

- dacite on Okinawa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **27**, 363—370.
- Dziewonski, A. and Anderson, D. L., 1981. Preliminary reference earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297—356.
- Eguchi, T. and Uyeda, S. 1983. Seismotectonics of the Okinawa trough and Ryukyu arc. *Memoir of Geol. Soc. of China*, **5**, 89—210.
- Hay, D. E., Houtz, R., Jarrard, R. D., Mrozowski, C. L. and Watanabe, T., 1978. A geophysical atlas of the East and Southeast Asian Seas. In: Hayes, D. E. (Editor), *Crustal Structure*, MC-25. Geological Society America.
- Huang, P. H., 1985. Deep-structure, tectonic stress field and evolution of the Okinawa trough. *Symposium, 3, 23rd IASPEI, Abstract*, Vol. 1, T₃—48, p. 282. Tokyo, Japan.
- Isacks, B. and Molnar, P., 1971. Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **9**, 103—174.
- Katsumata, M. and Sykes, L., 1969. Seismicity and tectonics of the western Pacific: Izu-Mariana-Caroline and Ryukyu-Taiwan regions. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5923—5948.
- Konishi, K., 1965. Geotectonic framework of the Ryukyu islands. *Bull. Geol. Soc. Japan*, **71**, 437—457.
- Lee, C. S., Shor, G. G. Jr., Bibee, L. Dy., Lu, R. S. and Hilde, T. W. C., 1980. Okinawa Trough: Origin of a back-arc basin. *Marine Geol.*, **54**, 1611—1643.
- Seno, T., 1977. The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate. *Tectonophysics*, **42**, 209—226.
- Shiono, K., Mikumo, T. and Ishikawa, Y., 1980. Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate deep earthquakes. *J. Phys. Earth*, **28**, 17—43.
- Turcotte, D. L. and Schubert, G., 1982. *Geodynamics*, 450pp. John Wiley & Sons, New York.
- Watts, A. B., Bodine, J. H. and Bowin, C. O., 1978. A geophysical atlas of the east and southeast Asia seas. In: Hayes, D. E. (Editor). *Free-air Gravity Field*, MC-25. Geological Society of America.
- Wilson, J. T., 1968. Static or mobile earth: The current scientific revolution. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **112**, p. 309.
- Woolard, G. P. and Strange, W. E., 1962. Gravity anomalies and crust of the earth in the Pacific Basin. *Geophys. Monogr.*, **6**, 60—80. Amer. Geophys. Union.
- Wu, F. T., 1970. Focal mechanism and tectonics in the vicinity of Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **60**, 2045—2056.
- Yoshii, T., 1973. Upper mantle structure beneath the north Pacific and the marginal sea. *J. Phys. Earth*, **21**, 313—328.