

# 中国海区及其邻域的原地应力状态

高建理 丁健民 梁国平 夏大荒 郭启良

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

## 摘 要

本文根据钻孔崩落、应力解除和水压致裂等方法得出的 137 个应力数据以及部分油井压裂资料, 分析了我国海区及其邻域的原地应力状态和构造应力场, 并在此基础上探讨了有关力源问题。

研究表明, 我国海区的构造应力场有一定的分区特点, 它是我国东部的华北和华南两大应力区向海域的延伸, 其中渤海、黄海及其邻域受 NEE 向挤压应力场控制, 区内的断层活动性质以走滑为主, 而东海、台湾海峡及其南海则处于 NWW-NW-NNW 向挤压应力场的作用下, 其最大水平主应力方向由内陆向东南沿海呈辐射状展布, 主应力方向随深度增加更趋稳定一致, 在华北地区及邻域断层活动以走滑为主, 而华南地区及其邻域则大致以 1700m 深为界, 上部以逆冲为主, 下部以走滑为主。另外, 研究区构造应力场的力源主要来自太平洋板块、菲律宾板块和印度-澳大利亚板块的综合作用。

**关键词** 原地应力状态; 构造应力场; 断层运动

## 一、前 言

随着板块运动学说的深入发展, 岩石圈动力学的研究受到了广泛的重视。地壳内的应力状态和构造应力场特征, 是岩石圈动力学研究的基础之一, 对反推板块的运动方式和建立区域构造运动模式(如断层运动的性质及其随深度的变化)有重要意义。

鉴于构造应力场研究的重要意义, 已有许多学者从不同途径探讨了中国大陆内的构造应力场及其有关问题。早在 1979 年, 鄢家全等就从 193 个震源 P 波初动解资料入手, 分析了中国大陆的构造应力场, 认为华北地区与朝鲜半岛、西南日本的构造应力场一致, 主压应力方向为 NEE, 这可能与其东部毗邻的太平洋板块的运动有关; 华南地区与菲律宾板块相接, 受该板块俯冲的影响, 华南地区受制于 NWW 向主压应力(鄢家全等, 1979)。此后, 汪素云等以小震 P 波初动解研究了中国东部大陆的构造应力场, 发现平均  $P$ 、 $T$  轴的方向基本水平, 其中  $P$  轴方向由西部陆地中心向沿海呈放射状分布;  $T$  轴方向的展布则沿向东凸出的弧形线呈环状(汪素云和许忠淮, 1985)。李方全和丁旭初又根据水压致裂和应力解除资料, 分别探讨了中国大陆和中国东部大陆的构造应力场, 得出太行山以东的华北地区内最大水平主应力方向呈 NEE, 秦岭以南的华南地区为 NW 向(李方全和刘光勋, 1986; 丁旭初和丁文涛, 1988)。另外, 还有一些专门讨论某一地区的文章, 对本文也将有一定的参考价值。

1989 年 5 月 13 日收到本文初稿, 1990 年 5 月 1 日决定采用。

(许忠淮等, 1983; 林纪曾等, 1980; 卓秀榕和陈光桐, 1983; 汪素云等, 1987).

虽然已有不少人研究过中国大陆的构造应力场, 但对与陆区相邻的中国海区涉足并不多. 本文将较为详细地分析中国海区及其邻域的原地应力状态和构造应力场的分区特点, 并将侧重于三向主应力之间的关系以及随深度的变化, 因为这关系到断层运动的性质. 我们以钻孔原地应力测量结果分析大区域应力场特征尚属首次, 但由于我们搜集和整理了大量钻孔崩落和油井压裂资料, 并汇编了已发表的水压致裂和应力解除的数据, 基本达到了预期目的. 对于资料贫乏区, 我们借助其它有关资料进行了必要的分析和推测. 文中有大量钻孔崩落资料为首次发表.

## 二、中国海区及其邻域的原地应力及其应力场分区

中国海区包括渤海、黄海、东海、台湾海峡和南海等海域. 除南海外, 其余均属沿海大陆架, 与华北和华南陆区相连, 故这些海区的应力状态与相邻的陆区关系密切, 可结合起来讨论. 南海是一独立海盆, 其应力状态可能较为特殊, 应单独考虑. 我们在工作中搜集和整理了大量钻孔崩落和油井压裂资料, 由前者可得出主应力方向, 后者可得主应力大小. 其中钻孔崩落资料除极个别外均从斯伦贝谢四臂测井曲线中提取, 油井压裂资料则来源于油井压裂的压力-时间曲线. 此外, 还引用了已发表的应力解除和水压致裂资料. 有关应力方向的数据列于表 1. 由于中国东部绝大部分地区的  $P$ 、 $T$  轴近于水平, 故表中所列最大水平主应力  $S_H$  的方向往往就是最大主应力  $S_1$  的方向. 表中凡标明资料来源的数据可参见参考文献, 其余数据则为首次发表或经过重新整理. 图 1 为相应于表 1 的中国海区及其邻域的应力图象.

表 1 中国海区及其邻域原地应力测量数据

| 序号 | 钻孔编号   | 测量地点 | 资料类型 | 经纬度             |                 | 测段深度<br>(m) | $S_H$ 方向<br>(°) | 测量时间       | 资料来源       |
|----|--------|------|------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|------------|------------|
|    |        |      |      | $\lambda_E$ (°) | $\varphi_N$ (°) |             |                 |            |            |
| 1  | 曹 5    | 辽宁辽河 | BO   | 123.217         | 41.916          | 2200—2596   | 89              | 1984. 6. 3 |            |
| 2  | 胜 10   | 辽宁辽河 | BO   | 123.146         | 41.819          | 2771—3751   | 82              | 1983.12. 3 |            |
| 3  | 哈 3    | 辽宁辽河 | BO   | 123.183         | 41.747          | 2185—2435   | 56              | 1984.11.27 |            |
| 4  | 牛 76   | 辽宁辽河 | BO   | 122.979         | 41.625          | 2883—3109   | 70              | 1984.12.18 |            |
| 5  | 半 74   | 辽宁辽河 | BO   | 122.906         | 41.469          | 2640—3380   | 120             | 1985. 3. 7 |            |
| 6  | 杜 139  | 辽宁辽河 | BO   | 121.904         | 41.148          | 2220—2868   | 96              | 1985. 5. 6 |            |
| 7  | 锦 128  | 辽宁辽河 | BO   | 121.604         | 40.883          | 3367—4502   | 87              | 1985. 4.19 |            |
| 8  | 岔 49   | 河北任丘 | BO   | 116.197         | 39.065          | 1950—3225   | 81              | 1980.11.20 | 梁国平等, 1988 |
| 9  | 岔 12-9 | 河北任丘 | BO   | 116.253         | 39.041          | 1620—3080   | 83              | 1984.12.29 | 梁国平等, 1988 |
| 10 | 苏 401  | 河北任丘 | BO   | 116.623         | 39.049          | 4660—5080   | 95              | 1984. 8.16 | 梁国平等, 1988 |
| 11 | 苏 6    | 河北任丘 | BO   | 116.506         | 38.962          | 4026—4237   | 95              | 1984. 8.23 | 梁国平等, 1988 |
| 12 | 雁 33   | 河北任丘 | BO   | 115.983         | 38.784          | 2846—2955   | 70              | 1984. 7.30 | 梁国平等, 1988 |
| 13 | 高深 1   | 河北任丘 | BO   | 115.937         | 38.713          | 3750—4505   | 78              | 1984. 8.29 | 梁国平等, 1988 |
| 14 | 任 239  | 河北任丘 | BO   | 116.027         | 38.615          | 3140—3375   | 75              | 1980.10.18 | 梁国平等, 1988 |
| 15 | 留 421  | 河北任丘 | BO   | 115.901         | 38.358          | 2790—3370   | 78              | 1981. 3. 8 | 梁国平等, 1988 |
| 16 | 孤北 18  | 山东东营 | BO   | 118.527         | 37.925          | 4430—4746   | 80              |            | 丁健民等, 1986 |

续表 1

| 序号 | 钻孔编号         | 测量地点 | 资料类型 | 经纬度             |                 | 测段深度<br>(m) | $S_H$ 方向<br>(°) | 测量时间       | 资料来源       |
|----|--------------|------|------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|------------|------------|
|    |              |      |      | $\lambda_E$ (°) | $\varphi_N$ (°) |             |                 |            |            |
| 17 | 义深 2         | 山东东营 | BO   | 118.500         | 37.772          | 3800—3986   | 70              |            | 丁健民等, 1986 |
| 18 | 郑 17         | 山东东营 | BO   | 118.229         | 37.589          | 1250—1764   | 75              | 1984.5.1   | 丁健民等, 1986 |
| 19 | 利 25         | 山东东营 | BO   | 118.240         | 37.478          | 1831—2600   | 95              | 1979.7.18  | 丁健民等, 1986 |
| 20 | 东风 10        | 山东东营 | BO   | 118.695         | 37.475          | 2450—3648   | 95              | 1981.7.21  | 丁健民等, 1986 |
| 21 | 营 67         | 山东东营 | BO   | 118.521         | 37.444          | 2850—3158   | 100             | 1981.10.24 | 丁健民等, 1986 |
| 22 | 纯 59         | 山东东营 | BO   | 118.200         | 37.322          | 2150—2870   | 95              | 1979.12.28 | 丁健民等, 1986 |
| 23 | 梁 43         | 山东东营 | BO   | 118.188         | 37.278          | 2945—3230   | 85              | 1984.1.24  | 丁健民等, 1986 |
| 24 | 胶参 2         | 山东东营 | BO   | 120.354         | 36.576          | 110—1703    | 85              | 1980.8.27  | 丁健民等, 1986 |
| 25 | 高 11         | 河北唐山 | BO   | 118.521         | 39.234          | 2295—3937   | 80              | 1980.12.2  | 郭启良等, 1986 |
| 26 | 高 7          | 河北唐山 | BO   | 118.542         | 39.185          | 2200—4001   | 85              | 1980.11.30 | 郭启良等, 1986 |
| 27 | 高 6          | 河北唐山 | BO   | 118.500         | 39.161          | 2700—4000   | 85              | 1980.9.13  | 郭启良等, 1986 |
| 28 | BZ 28-1-1    | 渤海   | BO   | 119.619         | 38.323          | 1495—3100   | 65              | 1981.3.7   |            |
| 29 | BZ 25-1-3    | 渤海   | BO   | 119.113         | 38.284          | 1800—2470   | 64              | 1983.7.13  |            |
| 30 | 康古 1         | 河南   | BO   | 115.863         | 36.800          | 2350—3150   | 105             | 1978.9.12  |            |
| 31 | 濮 6-65       | 河南濮阳 | BO   | 114.979         | 35.717          | 2885—3550   | 100             | 1986.3.9   | 丁健民等, 1987 |
| 32 | 卫 42         | 河南濮阳 | BO   | 114.944         | 35.703          | 2000—3800   | 130             | 1984.6.17  | 丁健民等, 1987 |
| 33 | 文 109        | 河南濮阳 | BO   | 114.890         | 35.645          |             | 50              |            | 丁健民等, 1987 |
| 34 | 文 128        | 河南濮阳 | BO   | 114.973         | 35.626          | 3096—4013   | 55              | 1985.12.21 | 丁健民等, 1987 |
| 35 | 胡 30         | 河南濮阳 | BO   | 114.713         | 35.572          | 1480—2500   | 110             | 1986.3.20  | 丁健民等, 1987 |
| 36 | 庆古 1         | 河南濮阳 | BO   | 114.615         | 35.481          | 4429—5073   | 98              | 1985.11.21 | 丁健民等, 1987 |
| 37 | 桥 31         | 河南濮阳 | BO   | 115.136         | 35.364          | 3498—4134   | 89              | 1986.6.14  | 丁健民等, 1987 |
| 38 | 马古 24        | 河南濮阳 | BO   | 114.965         | 35.116          | 2500—3803   | 71              | 1986.6.10  | 丁健民等, 1987 |
| 39 | 春古 3         | 河南濮阳 | BO   | 114.906         | 34.979          | 2913—3200   | 45              | 1984.4.27  | 丁健民等, 1987 |
| 40 | 南 10         | 河南南阳 | BO   | 113.388         | 34.759          | 400—2499    | 93              | 1985.5.30  |            |
| 41 | 周参 10        | 河南南阳 | BO   | 114.917         | 33.377          | 1500—2523   | 75              | 1984.10.29 |            |
| 42 | 南 6          | 河南南阳 | BO   | 115.614         | 33.166          | 2400—3128   | 105             | 1984.10.24 |            |
| 43 | 泌 101        | 河南南阳 | BO   | 113.208         | 32.665          | 1000—3200   | 84              | 1985.1.19  |            |
| 44 | 平湖一井         | 东海   | BO   | 124.920         | 29.069          | 500—3420    | 125             | 1983       |            |
| 45 | 龙井二井         | 东海   | BO   | 125.935         | 29.879          | 1840—4150   | 133             |            |            |
| 46 | 孤山一井         | 东海   | BO   | 125.932         | 28.765          | 1050—3265   | 105             |            |            |
| 47 | 平湖三井         | 东海   | BO   | 124.895         | 29.066          | 1050—3265   | 80              |            |            |
| 48 | 天外天一井        | 东海   | BO   | 128.004         | 28.535          | 1690—3587   | 113             |            |            |
| 49 | 平湖二井         | 东海   | BO   | 124.934         | 29.138          | 2100—3030   | 125             |            |            |
| 50 | 玉泉一井         | 东海   | BO   | 125.475         | 29.205          | 2190—2830   | 103             | 1985.2.12  |            |
| 51 | PANYU 24-1-1 | 南海   | BO   | 114.904         | 20.465          | 1885—3440   | 150             | 1984.6.30  |            |
| 52 | PANYU 16-1-1 | 南海   | BO   | 114.993         | 20.426          | 1675—2300   | 166             | 1984.5.13  |            |
| 53 | PANYU 27-1-1 | 南海   | BO   | 114.493         | 20.207          | 830—905     | 125             |            |            |
| 54 | PANYU 33-1-1 | 南海   | BO   | 114.373         | 20.088          | 2372—3320   | 171             |            |            |

续表 1

| 序<br>号 | 钻 孔<br>编 号           | 测 量<br>地 点 | 资料<br>类型 | 经 纬 度           |                 | 测 段 深 度<br>(m) | S <sub>11</sub> 方向<br>(°) | 测 量<br>时 间 | 资 料<br>来 源 |
|--------|----------------------|------------|----------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------|------------|------------|
|        |                      |            |          | $\lambda_e$ (°) | $\varphi_N$ (°) |                |                           |            |            |
| 55     | PANYU<br>27-2-1      | 南海         | BO       | 114.465         | 20.243          | 3860—4795      | 113                       |            |            |
| 56     | WENGHA-<br>NG 19-1-5 | 南海         | BO       | 112.089         | 19.381          | 2850—3150      | 165                       | 1984.8.6   |            |
| 57     | YA13-1-2             | 南海         | BO       | 109.033         | 17.514          | 3077—4462      | 53                        | 1984.5.24  |            |
| 58     | YA8-2-1              | 南海         | BO       | 109.311         | 17.810          | 4319—4882      | 168                       | 1983.3.17  |            |
| 59     | HZ33-1-1             | 南海         | BO       | 115.350         | 21.148          | 2015—2053      | 80                        |            |            |
| 60     | LUFENG<br>2-1 A      | 南海         | BO       | 116.226         | 21.919          | 1045—1795      | 145                       |            |            |
| 61     | LUFENG<br>1-1-1/ST-2 | 南海         | BO       | 116.072         | 21.991          | 3105—3320      | 165                       |            |            |
| 62     | HAIFENG<br>28-2-1    | 南海         | BO       | 116.618         | 22.265          | 2945—3890      | 28                        |            |            |
| 63     | HAIFENG<br>33-3-1    | 南海         | BO       | 116.408         | 22.509          | 1830—3275      | 100                       |            |            |
| 64     | 锦州                   | 辽宁         | OC       | 121.188         | 41.117          |                | 98                        | 1974       |            |
| 65     | 大连                   | 辽宁         | OC       | 121.625         | 38.915          |                | 64                        | 1976       |            |
| 66     | 沈阳                   | 辽宁         | OC       | 123.333         | 41.727          |                | 68                        | 1974       |            |
| 67     | 温坨子                  | 辽宁         | OC       | 121.339         | 39.605          |                | 80                        | 1983.9     |            |
| 68     | 海城                   | 辽宁         | OC       | 122.865         | 40.677          |                | 87                        | 1975.7     | 李方全等, 1986 |
| 69     | 营口                   | 辽宁         | OC       | 122.667         | 40.537          |                | 96                        | 1975.10    | 李方全等, 1986 |
| 70     | 北票                   | 辽宁         | OC       | 120.802         | 41.822          | 870            | 84                        | 1985       | 丁旭初等, 1988 |
| 71     | 房山                   | 北京         | OC       | 115.948         | 39.743          | 7—16           | 50                        | 1977.5     | 李方全等, 1986 |
| 72     | 昌平                   | 北京         | OC       | 116.188         | 40.275          | 4.34—14.69     | 105                       | 1974.10    | 李方全等, 1986 |
| 73     | 顺义                   | 北京         | OC       | 116.823         | 40.135          |                | 122                       | 1973.11    | 李方全等, 1986 |
| 74     | 怀柔                   | 北京         | OC       | 116.679         | 40.262          |                | 97                        | 1976.11    | 李方全等, 1986 |
| 75     | 隆尧                   | 河北         | OC       | 114.667         | 37.418          | 7.7—15         | 93                        | 1976.5     | 丁旭初等, 1988 |
| 76     | 唐县                   | 河北         | OC       | 114.792         | 38.880          | 6—11.1         | 114                       | 1982.6     | 丁旭初等, 1988 |
| 77     | 涿县                   | 河北         | OC       | 115.188         | 40.095          | 7—13.3         | 107                       | 1982.9     | 丁旭初等, 1988 |
| 78     | 潘家口                  | 河北         | OC       | 117.875         | 40.841          | 27.69          | 15                        | 1980.10    | 丁旭初等, 1988 |
| 79     | 赤城                   | 河北         | OC       | 115.761         | 40.995          |                | 82                        | 1977.7     | 李方全等, 1986 |
| 80     | 茅山                   | 河北         | OC       | 114.750         | 37.485          | 8—10           | 126                       | 1966.10    |            |
| 81     | 藁县                   | 河北         | OC       | 117.417         | 40.032          |                | 148                       | 1971.9     | 丁旭初等, 1988 |
| 82     | 怀来                   | 河北         | OC       | 115.708         | 40.486          |                | 151                       | 1977.9     |            |
| 83     | 滦县                   | 河北         | OC       | 118.698         | 39.805          |                | 84                        | 1976.8     | 丁旭初等, 1988 |
| 84     | 唐山                   | 河北         | OC       | 118.194         | 39.626          | 6—15           | 133                       | 1976.10    | 丁旭初等, 1988 |
| 85     | 峰峰                   | 河北         | OC       | 114.125         | 36.393          | 8.7—15         | 168                       | 1982.9     | 丁旭初等, 1988 |
| 86     | 三河                   | 河北         | OC       | 116.948         | 40.000          |                | 111                       | 1976.10    | 丁旭初等, 1988 |
| 87     | 张家口                  | 河北         | OC       | 114.888         | 40.810          | 21—28          | 82                        | 1982       | 丁旭初等, 1988 |
| 88     | 平定                   | 山西         | OC       | 113.631         | 37.774          | 7.5—10         | 177                       | 1980       |            |
| 89     | 浑源                   | 山西         | OC       | 113.667         | 39.716          | 6—9.3          | 32                        | 1980.8     |            |

续表 1

| 序号  | 钻孔编号     | 测量地点 | 资料类型 | 经纬度             |                 | 测段深度<br>(m) | S <sub>0</sub> 方向<br>(°) | 测量时间    | 资料来源                           |
|-----|----------|------|------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------------|---------|--------------------------------|
|     |          |      |      | $\lambda_E$ (°) | $\varphi_N$ (°) |             |                          |         |                                |
| 90  | 洪洞       | 山西   | OC   | 111.663         | 36.252          | 5.8-14      | 14                       | 1984    |                                |
| 91  | 洪洞郭盆     | 山西   | OC   | 111.663         | 36.252          | 7-19        | 162                      |         |                                |
| 92  | 绛县       | 山西   | OC   | 111.567         | 35.487          | 17-19       | 158                      | 1980    |                                |
| 93  | 青岛       | 山东   | OC   | 120.375         | 36.084          | 3.62-7.95   | 74                       | 1979.9  | 李方全等, 1986                     |
| 94  | 安丘       | 山东   | OC   | 119.177         | 36.398          | 13.63-19    | 96                       | 1979.7  | 李方全等, 1986                     |
| 95  | 济南       | 山东   | OC   | 117.021         | 36.618          | 9.91-13.27  | 175                      | 1979.6  | 李方全等, 1986                     |
| 96  | 淇县       | 河南   | OC   | 114.198         | 35.584          | 9-13.4      | 98                       | 1982.6  | 丁旭初等, 1988                     |
| 97  | 焦作       | 河南   | OC   | 113.233         | 35.270          | 13-17       | 18                       | 1980.5  | 丁旭初等, 1988                     |
| 98  | 安阳       | 河南   | OC   | 114.354         | 36.089          | 8-15        | 118                      | 1980.5  | 丁旭初等, 1988                     |
| 99  | 新沂       | 江苏   | OC   | 118.525         | 34.397          | 5.21-10.27  | 156                      | 1979.10 | 李方全等, 1986                     |
| 100 | 淮北       | 安徽   | OC   | 117.933         | 33.960          | 3.2-13.5    | 86                       | 1979.9  | 丁旭初等, 1988                     |
| 101 | 铜陵       | 安徽   | OC   | 117.800         | 30.964          |             | 150                      | 1978.7  | 丁旭初等, 1988                     |
| 102 | 庐江       | 安徽   | OC   | 117.529         | 31.227          | 9.74-15.0   | 117                      | 1979.11 | 丁旭初等, 1988                     |
| 103 | 定远       | 安徽   | OC   | 117.500         | 32.274          | 7.06-14.97  | 50                       | 1979.10 | 李方全等, 1986                     |
| 104 | 宿县       | 安徽   | OC   | 116.983         | 32.362          | 6.4         | 87                       | 1979    | 李方全等, 1986                     |
| 105 | 无为       | 安徽   | OC   | 117.888         | 31.699          | 10-15       | 117                      | 1979    | 李方全等, 1986                     |
| 106 | 葛州坝      | 湖北   | OC   | 111.267         | 30.739          | 18-28       | 54                       | 1981    | 丁旭初等, 1988                     |
| 107 | 大冶秀山     | 湖北   | OC   | 114.958         | 30.085          |             | 109                      | 1964    | 丁旭初等, 1988                     |
| 108 | 大冶中竖井    | 湖北   | OC   |                 |                 |             | 129                      | 1964    | 丁旭初等, 1988                     |
| 109 | 大冶狮子山    | 湖北   | OC   |                 |                 |             | 121                      | 1964    | 丁旭初等, 1988                     |
| 110 | 三斗坪      | 湖北   | OC   | 111.181         | 30.775          | 31          | 107                      | 1979    | 丁旭初等, 1988                     |
| 111 | 锡矿山      | 湖南   | OC   | 111.575         | 27.267          | 11          | 100                      | 1975    | 丁旭初等, 1988                     |
| 112 | 锡矿山      | 湖南   | OC   |                 |                 | 15.6        | 145                      | 1975    | 丁旭初等, 1988                     |
| 113 | 赣南矿区 I   | 江西   | OC   | 115.798         | 26.566          | 420         | 93                       | 1983.11 |                                |
| 114 | 赣南矿区 II  | 江西   | OC   | 115.573         | 25.850          | 450         | NW-SE                    | 1983.11 |                                |
| 115 | 赣南矿区 III | 江西   | OC   | 115.525         | 25.659          | 460         | 123                      | 1983.11 |                                |
| 116 | 全南大吉山    | 江西   | OC   | 114.363         | 24.583          | 450         | 20                       | 1973    | 丁旭初等, 1988                     |
| 117 | 天峨山      | 广西   | OC   | 107.167         | 25.023          |             | 130                      | 1980.1  | 丁旭初等, 1988                     |
| 118 | 河源       | 广东   | OC   | 114.683         | 23.765          |             | 156                      | 1965    | 丁旭初等, 1988                     |
| 119 | 密云       | 北京   | HF   | 116.944         | 40.408          | 45          | 143                      |         | 李方全等, 1986                     |
| 120 | 易县       | 河北   | HF   | 115.491         | 39.298          | 84          | 59                       |         | 李方全等, 1986                     |
| 121 | 唐山       | 河北   | HF   | 118.342         | 39.720          | 300         | 78                       |         | 李方全等, 1986                     |
| 122 | 安康       | 陕西   | HF   | 109.027         | 32.634          | 20-173      | 117                      |         | 丁旭初等, 1988                     |
| 123 | 筑坡       | 日本   | HF   | 140.094         | 36.123          | 560         | 135                      |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 124 | 都留       | 日本   | HF   | 138.887         | 35.513          | 80-390      | 120                      |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 125 | 横须贺      | 日本   | HF   | 139.701         | 35.208          | 190         | 175                      |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 126 | 富津       | 日本   | HF   | 138.962         | 35.173          | 210-390     | 130                      |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 127 | 修善寺      | 日本   | HF   | 138.919         | 34.946          | 140-400     | 20                       |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 128 | 冈部       | 日本   | HF   | 138.269         | 34.930          | 220-430     | 130                      |         | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |

续表 1

| 序号  | 钻孔编号         | 测量地点 | 资料类型 | 经纬度             |                 | 测段深度<br>(m) | $S_H$ 方向<br>(°) | 测量时间   | 资料来源                           |
|-----|--------------|------|------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|--------|--------------------------------|
|     |              |      |      | $\lambda_e$ (°) | $\varphi_N$ (°) |             |                 |        |                                |
| 129 | 西尹豆          | 日本   | HF   | 138.797         | 34.778          | 260—440     | 20              |        | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 130 | 下田           | 日本   | HF   | 138.949         | 34.718          | 70—440      | 144             |        | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 131 | 滨同           | 日本   | HF   | 138.167         | 34.628          | 120—250     | 90              |        | Tsukahara <i>et al.</i> , 1987 |
| 132 | 门头沟          | 北京   | TV   | 116.029         | 39.981          | 632—814     | 75              |        |                                |
| 133 | Kangweon     | 朝鲜   | OC   | 129.000         | 37.450          |             | 2               |        | Lim <i>et al.</i> , 1986       |
| 134 | 2nd yeonhwa  | 朝鲜   | OC   | 129.063         | 37.442          |             | 71              |        | Lim <i>et al.</i> , 1986       |
| 135 | Sang dong    | 朝鲜   | OC   | 128.927         | 37.433          |             | 133             |        | Lim <i>et al.</i> , 1986       |
| 136 | Sam rang jin | 朝鲜   | OC   | 129.000         | 35.325          |             | 111             |        | Lim <i>et al.</i> , 1986       |
| 137 | 从化           | 广东   | HF   | 113.583         | 23.583          | 200         | 133             | 1989.1 |                                |

注：资料分四类：BO——钻孔崩落；OC——应力解除；HF——水压致裂；TV——超声波电视测井

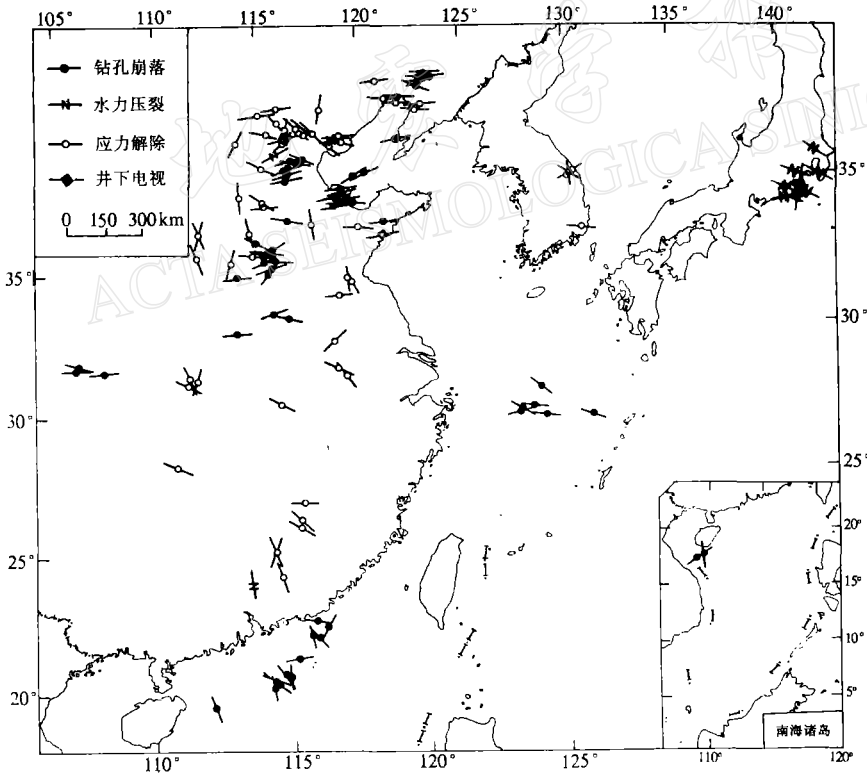


图 1 中国海区及其邻域  $S_H$  方向展布

图 1 展示了研究区内各应力测点的最大水平主应力方向. 由此可大致看出, 以秦岭东段和大别山向东直至长江入海口为界, 将本区划分为南北两大应力区, 海区的最大水平主应力方向基本是陆区的延伸. 黄海与东海虽分属两大应力区, 但其界线不十分明显, 似乎是渐变过渡的. 下面分区讨论应力场特征.

### 1. 渤海、黄海及附近陆区

渤海、黄海区与华北的东部及东北的东南部相连, 属沿海大陆架. 华北地区最大水平主应力方向以 NEE 为主, 平均约  $NE85^\circ$ . 渤海内的两个钻孔崩落数据深度达 3000m,  $S_H$  方向为  $NE65^\circ$  和  $NE64^\circ$ . 渤海沿岸唐山地区的三个崩落数据反映其  $S_H$  方向为  $NE83^\circ$ . 黄海内虽没有实测资料, 但黄海西部的陆缘区钻孔崩落资料颇为丰富, 其平均  $S_H$  方向为  $NE87^\circ$ . 可见, 黄海附近的主压应力方向较渤海更接近东西. 北部辽东湾附近的主压应力方向平均为  $NE86^\circ$ . 我们由表 1 列出的有关资料可求得整个渤海、黄海及其邻区的平均最大水平主应力方向为  $NE84^\circ$ . 这里有一个问题值得引起注意, 那就是渤海里的两个点为  $NE64^\circ$  和  $NE65^\circ$ , 而其沿岸的一些点大多在  $NE80^\circ$  以上, 很少低于  $NE70^\circ$ . 这便产生了约  $15^\circ-20^\circ$  的偏差. 其原因可能要追究到郯庐断裂跨越渤海的沈阳—潍坊段, 它控制了渤海断陷盆地, 形变资料也表明它是以右旋引张为主, 引张方向应为 NW 向, 则水平压应力方向应为 NE 向, 结果便出现了上述偏差. 因此, 在渤海、黄海及其相邻的华北区东部和东北区的东南沿海一带, 最大水平主应力的方向以 NEE 为主, 局部呈 NE 向.

### 2. 东南海域及华南区

东南海域主要指东海和台湾海峡. 东海与黄海的应力分区界线虽不十分清楚, 但它们无疑属于两大应力场. 东海属华南应力场的一部分. 我们由东海内的七口油井的钻孔崩落, 得出最大水平主应力方向的平均值为  $NE112^\circ$ , 即  $N68^\circ W$ . 故可以断定, 东海区内以 NWW-NW 向挤压为主.

华南区应力场受来自东海和南海两个方向的挤压应力控制, 因而该区内  $S_H$  没有统一的方向, 表现为以内陆为中心向东南陆缘呈辐射状展布. 由表 1 列出的应力解除数据可得出中南地区主压应力方向为  $N63^\circ W$ , 江西到广东一带平均为  $N53^\circ W$ . 由南海钻井崩落资料得出珠江口一带的主压应力方向为  $N37^\circ W$ , 海南岛附近北部湾一带为  $N13^\circ W$ . 据实地考察, 海南岛上第四纪火山排列方向大致为  $N20^\circ W$ , 这与该区的最大水平主应力方向基本一致. 因此, 华南地区的最大水平主应力方向呈辐射状, 大致以内陆为中心向东南海域散去, 变化范围为  $NE100^\circ-170^\circ$ .

迄今, 我们尚未搜集到台湾地区的实测应力资料. 由该地区震源机制解得出的  $P$  轴方向平均为  $NE90^\circ$ , 可见该区主压应力方向为近东西(卓秀裕和陈光桐, 1983).

### 3. 南海区

中国南海是在“南海地台”上发生发展而成的海盆(黄福林, 1986). 海盆内曾有四处微中心扩张, 这种扩张目前已经停止(李卢玲, 1985). 南海海盆的北界就是与华南区的分界线, 它是沿东南沿海的长乐-诏安-潮汕及海域 50m 等深线的滨海断裂带, 向西大致沿南海大陆架边缘, 绕海南岛南端与红河断裂连接(马杏垣, 1987). 南海北部边界附近有一系列拗陷, 我们所掌握的部分崩落资料就源于此处. 南海海盆东侧与菲律宾板块呈被动俯冲边界, 西侧以红河断裂南延的走滑断层为界. 据南海北部的钻孔崩落资料得出的最大水平主应力方向, 自东而西为  $NW50^\circ-10^\circ$ , 这与沿海附近陆区的主压应力方向基本一致.

由上述分区讨论的结果,我们得出了研究区构造应力场分区图(图2)。

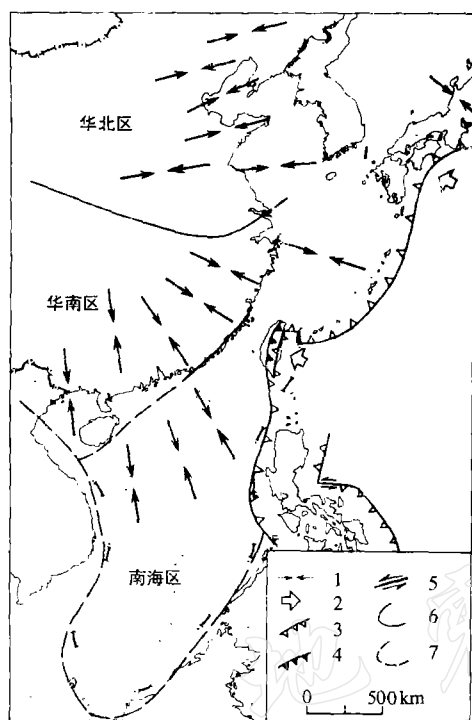


图2 中国海区及其邻域构造应力场分区

1. 区域主压应力方向; 2. 板块运动方向;
3. 板块俯冲边界; 4. 板块碰撞边界;
5. 转换边界; 6. 应力区边界; 7. 推测应力区边界

根据图2和前面的分析,可将研究区的构造应力场分区特点归纳为:大致以内陆的秦岭大别山及其东延至黄海与东海的分界线为界,将研究区分为两大应力区。此界以北受NEE向主压应力场控制,以南的主压应力场则从内陆向东南沿海呈辐射状展布,其变化范围为 $NE100^{\circ}-170^{\circ}$ 。海域内的最大水平主应力方向大致是陆区的外延。

### 三、各分区的应力状态及其随深度的变化

#### 1. 最大水平主应力方向随深度的变化

最大水平主应力方向有一定的分区特点。然而,它在纵向上是否有随深度分带的特点?现作些讨论。据表1列出的 $S_H$ 方向及相应的深度现分东北区(包括辽东湾)、华北区(包括渤海和黄海)、华南区(包括东海和台湾海峡)和南海区分别给出5km以内 $S_H$ 方向随深度变化图(图3)。因为钻孔崩落的深度大,而且连续性强,故该图中以钻孔崩落为主,浅部采用了应力解除资料。

由图3可见,华北和东北区内最大水平主应力方向的分布颇为相似,基本在 $NE80^{\circ}-100^{\circ}$ 之间,绝大多数为NEE向,极少数呈NWW

向。随深度的增加更趋稳定一致。华南区的情况则有所不同, $S_H$ 方向规则地分布于 $NE90^{\circ}-180^{\circ}$ 之间。南海区的 $S_H$ 方向则从SE变到SSE。这两区的 $S_H$ 方向随深度变化规律不明显,这可能与 $S_H$ 方向分散有关。然而,我们仍可得出这样的看法,即随深度的增加最大水平主应力方向不仅不会改变,而且会更趋稳定一致,即区域挤压方向。

#### 2. 三向主应力值随深度的变化

众所周知,从三向主应力值随深度变化的规律,可以分析地壳深部的应力状态和现今断层活动的性质。开展这项工作的理想条件是区域小且数据丰富。然而,我们要讨论的是中国海这样的大区域,且目前海区内应力值数据极其贫乏,故只有通过附近陆区的一些资料予以推测。由于陆区应力值资料也很有限,因此所得出的结果仅供参考。

(1) 华北区及其邻近海域 华北区以太行山脉为界被分为西部鄂尔多斯高原和东部华北平原。因东部应力值资料丰富又靠近渤海和黄海,故在此我们仅讨论东部地区的三向主应力值及其随深度的变化。近些年来我们从华北平原内诸大油田搜集了大量油井压裂资料,其深度在1000—4000m。油井压裂是在油田为增产而实施的一种大型水压致裂试验,由它得出的压力参数同样可求出最小和最大水平主应力值。在分析了华北平原内的



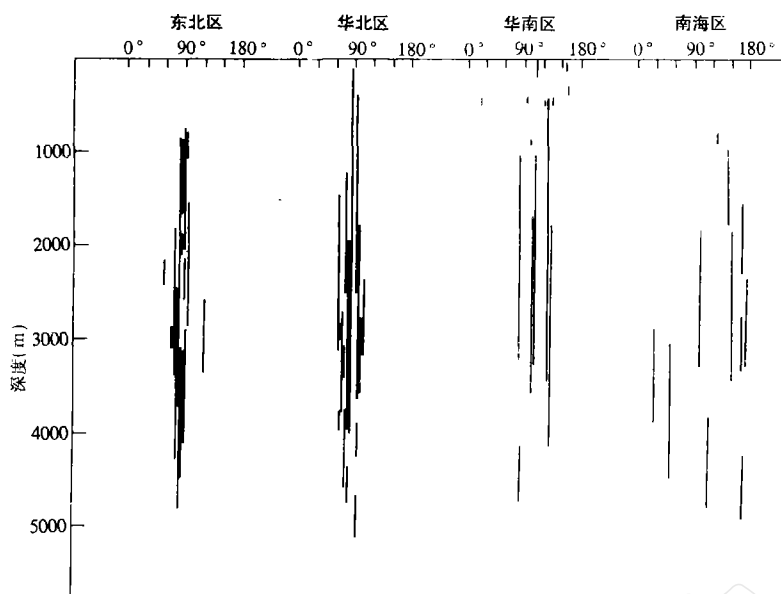


图3 最大水平主应力方向随深度的变化

水平主应力值及其随深度增加的变化规律后,我们发现大约在 2000m 深以下孔隙压力迅速增加,远远大于相同深度上的静水压力值.这种现象必然会影响  $S_H$  值随深度变化的连续性(高建理等,1987).所以,我们以 2000m 为界,上、下分别进行  $S_H$  和  $S_h$  与深度  $Z$  之间的回归计算,结果见图 4 和(1),(2)式.

$$0 \leq Z \leq 2000 \text{ m}$$

$$\begin{cases} S_H^1 = 2.486 + 0.0208Z \\ S_h^1 = 1.063 + 0.0159Z \\ S_v^1 = 0.021Z \end{cases} \quad (1)$$

$$Z \geq 2000 \text{ m}$$

$$\begin{cases} S_H^2 = -26.58 + 0.035Z \\ S_h^2 = -16.22 + 0.0236Z \\ S_v^2 = 0.023Z \end{cases} \quad (2)$$

(1),(2)式中  $S_H$  和  $S_h$  与深度  $Z$  之间的相关性较为显著.其中  $S_H^1$ - $Z$  的相关系数  $r=0.92$ ,  $S_h^1$ - $Z$  的  $r=0.96$ ;  $S_H^2$ - $Z$  的  $r=0.79$ ,  $S_h^2$ - $Z$  的  $r=0.87$ .另外,从式中还可看出 2000m 以下的应力递增率高 > 2000m 以上.换言之,随深度的增加,地应力值增加的速率也在上升.图 4 中垂直应力  $S_v$  居中,这表明区内三向主应力之间的关系为  $S_H > S_v > S_h$ .因而,华北平原及邻近海域内断层运动性质以走滑为主.

(2) **华南区及邻近海域** 华南区范围很大,地形复杂,深部应力值资料又极少,这给应力状态的分析带来不少麻烦.现仅以四川和江汉两油田的部分油井压裂资料为代表作出华南区地应力随深度变化图(图 5).相应的回归关系见(3)式.

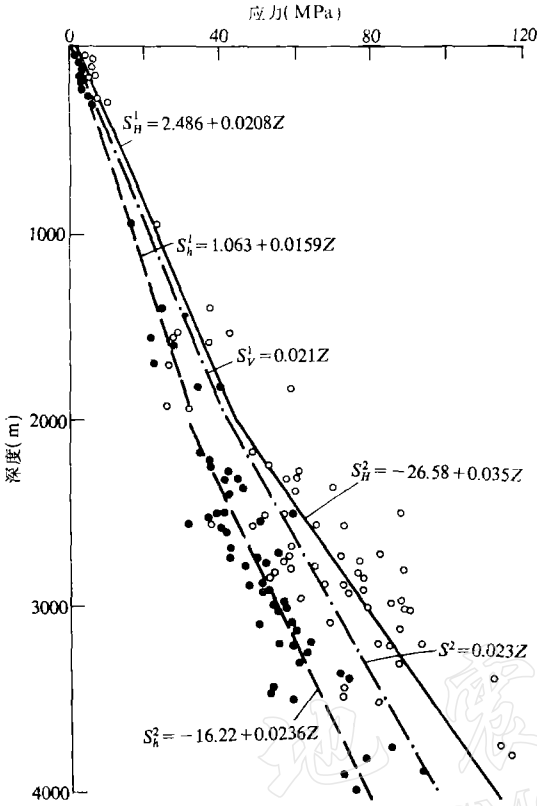


图 4 华北平原区三向主应力随深度的变化  
 $S_H$ ——最大水平主应力;  $S_h$ ——最小水平主应力;  $S_v$ ——垂直向主应力

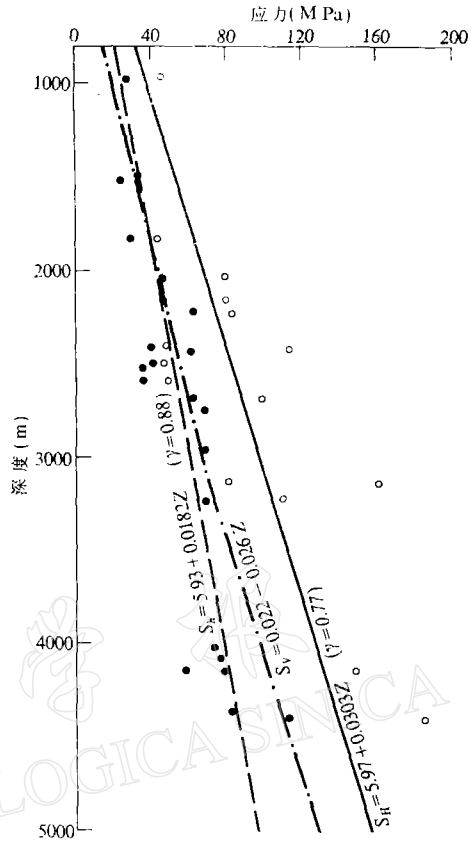


图 5 华南区三向主应力值随深度的变化

$$\begin{cases} S_H = 5.97 + 0.0303 Z \\ S_h = 5.93 + 0.0182 Z \\ S_v = 0.022 - 0.026 Z \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式中水平主应力与深度之间的关系较显著. 其中  $S_H - Z$  的  $r=0.77$ ,  $S_h - Z$  的  $r=0.88$ . 大约在 1700 m 深处三向主应力轴发生了转变. 1700 m 以上三向主应力之间的关系为  $S_H > S_h > S_v$ , 相应的断层运动性质以逆冲型为主; 1700 m 以下则表现为  $S_H > S_v > S_h$ , 相应的断层运动性质以走滑型为主. 令人遗憾的是, 上述结果的原始资料来源于华南区的中部和西部, 东南部尚属空缺. 因此, 若能获取东南沿海区的应力值资料, 综合回归计算出的应力随深度的变化关系式, 将能弥补现有结果的不足.

(3) 南海区 迄今, 南海区尚缺乏能够求出应力值的有关资料, 故难以作出三向应力随深度的变化图. 我们知道, 南海盆地是多中心扩张的产物, 目前这种扩张业已停止. 这样, 海盆内三向主应力之间的关系将不再是  $S_v > S_H > S_h$ , 可能已成为  $S_H > S_v > S_h$ , 类似于大陆内的某些断陷盆地. 所以盆地内断层活动方式也以走滑为主.

#### 四、研究区构造应力场的力源

研究构造应力场的目的有两个: 其一是弄清断层运动类型; 其二就是找出力源。后者对岩石圈动力学的研究意义重大。

由前述讨论可见, 中国海区的构造应力场与中国东部相近, 几乎是华北和华南区的扩展。其力源也应大体相同。许多研究者都曾讨论过中国东部大陆的应力源。一些已发表的文章指出, 中国大陆的构造应力场主要取决于西南部印-澳板块与欧亚板块的碰撞(汪素云和许忠淮, 1985; Molner and Tapponnier, 1975)。我们未曾计算过该碰撞边界的推挤力以及随着距边界距离的增加而产生的衰减。然而, 中国大陆被南北带划分为东西两部分, 其间在地质构造、地貌景观以及一些地球物理场(如: 重、磁等)上存在着很大差异, 因此其应力源也必定不同。我们认为, 西部力源来自印-澳板块与欧亚板块相碰撞产生的推挤力; 东部则来源于太平洋板块俯冲和印-澳板块推挤两者的综合作用。

众所周知, 印-澳与欧亚板块之间的碰撞始于第三纪初, 但太平洋板块的俯冲可追溯至中生代末(马杏垣, 1987)。中国东部的一系列 NNE-NE 向盆地便形成于第三纪前后。其成因是太平洋板块俯冲, 使得贝尼奥夫带附近上地幔岩浆上涌, 以致上部地壳被拉薄而逐渐形成的断陷盆地。当时盆地内的应力状态应是  $S_v > S_h > S_h$ 。然而, 自第四纪以来, 由于印-澳与欧亚两板块间的碰撞, 中国大陆内的构造应力场发生了根本改变。原先的拉张盆地受到了挤压, 以致一些作为地堑边界的正断层转变为走滑断层。断层活动性质的变化也证实了这一现象的存在, 比如郯庐断裂北段的依兰-伊通断裂。因而, 我们认为近期中国东部断层运动, 除个别地区外仍以走滑为主。显然, 中国东部的构造应力场的改变是因为受到了印-澳与欧亚两板块相撞的影响。

此外, 从应力分区特点也可间接地分析构造应力场的力源问题。以秦岭东段—大别山—黄、东海的交界线为界, 北部的最大水平主应力方向为 NEE, 这里太平洋板块的俯冲方向为 NW, 其弧后扩张方向也应为 NW, 相应的主压应力就成为 NE 到 NEE 了; 南部的最大水平主应力方向呈辐射状展布, 从东海到台湾海峡一带以 NWW-NW 为主, 这显然与菲律宾板块的影响有关。南海及其北部的主压应力转为 NW-NNW 向, 其力源来自菲律宾板块向西和印-澳板块向北运动的综合推挤力。因中国大陆东南部的板块边界不存在弧后扩张, 故华南区及邻近海域内主压应力方向与板块俯冲方向基本一致。

综上所述, 我们认为中国海区及其邻域的构造应力场之力源, 来自印度-澳大利亚板块和太平洋及菲律宾海板块的共同作用。

#### 五、结 语

以原地应力测量资料为主, 分析了中国海区及其邻域的构造应力场和深部应力状态后, 我们发现其构造应力场具分区性, 最大水平主应力方向与中国东部陆区基本一致, 可看作是陆区的延伸。渤海和黄海及其邻区的最大水平主应力方向为 NEE, 与华北区东部及东北区东南沿海一致; 东海、台湾海峡及南海区则为 NWW-NNW, 与华南区的辐射状展布的构造应力场相同。

不同地区的三向主应力值随深度的变化有一定差异,但都反映出研究区内断层活动以走滑型为主.其中华南及其邻区在 1700m 深以上存在逆断层活动,而在 1700m 以下仍以走滑断层活动为主.

中国海区及其邻域内构造应力场的力源来自太平洋板块、菲律宾海板块和印度-澳大利亚板块的综合作用.

## 参 考 文 献

- 丁旭初、张文涛,1988. 中国大陆东部现今构造应力状态. 地震学报, 10, 25—38.
- 丁健民、梁国平、郭启良,1986. 山东渤海沿岸地区深部应力测量——主应力方向的测定与分析. 地震学刊, 1: 1—9.
- 丁健民、梁国平、郭启良、高建理,1987. 根据钻孔崩落椭圆确定地壳应力方向. 地震学报, 9, 143—153.
- 郭启良、丁健民、梁国平,1986. 根据钻孔崩落椭圆确定唐山地区深部地壳应力方向. 中国地震, 2, 3, 54—59.
- 高建理、丁健民、梁国平、郭启良,1987. 华北地区盆地内地壳应力随深度的变化. 中国地震, 3, 4, 82—89.
- 黄福林,1986. 论南海的地壳结构及深部过程. 海洋地质与第四纪地质, 6, 1, 31—42.
- 李方全、刘光勋,1986. 我国现今地应力状态及有关问题. 地震学报, 8, 156—170.
- 林纪曾、梁国昭、赵毅、谢明富,1980. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场. 地震学报, 2, 245—257.
- 梁国平、丁健民、郭启良、高建理,1988. 用孔壁崩落法测量冀中平原地区地壳应力方向. 地震研究, 11, 1, 49—58.
- 李卢玲,1985. 南海的形成与邻区构造关系. 海洋地质与第四纪地质, 5, 1, 71—82.
- 马杏垣,1987. 中国岩石圈动力学纲要, 1—70. 地质出版社, 北京.
- 汪素云、许忠淮,1985. 中国东部大陆的地震构造应力场. 地震学报, 7, 17—32.
- 汪素云、许忠淮、葛民,1987. 黄海、东海及邻区的地震构造应力场. 中国地震, 3, 3, 18—25.
- 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. 地震学报, 5, 268—279.
- 鄭家全、时振梁、汪素云、环文林,1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1, 9—24.
- 卓秀榕、陈光制,1983. 闽台震源机制和区域应力场. 地震学报, 5, 397—411.
- Lim Han-uk and Lee Chung-in, 1986. *In-situ stress measurements of rock by stress relief method at some locations in Korea. Proceedings of the international symposium on rock stress and rock stress measurements*, 561—568. CENTEX publishers, Sweden.
- Molner, P. and Tapponnier, P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189, 419—426.
- Tsukahara, H. and Ikeda, R., 1987. Hydraulic fracturing stress measurements and *in-situ* stress field in the Kanto-Tokai area, Japan. *Tectonophysics*, 135, 329—345.