

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, 分析了中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。

研究结果表明, 中国海区的构造应力场有一定的分区特点, 它是中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。本文将要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 (m)	S_h 方向 ($^{\circ}$)	测 量 时 间	资 料 来 源
				λ_E ($^{\circ}$)	φ_N ($^{\circ}$)				
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 (m)	S_h 方 向 (°)	测 量 时 间	资 料 来 源
				λ_L (°)	φ_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 号	钻孔 编 号	测 量 地 点	资 料 类 型	经 度		测 深 度 (m)	S_n 方向 (°)	测 量 时 间	资 料 来 源
				λ_p (°)	φ_n (°)				
55	PANYU 27-2-1	南海	BO	114.465	20.243	3860—4795	113		
56	WENGHA- 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 2-1 A	南海	BO	116.226	21.919	1045—1795	145		
61	LUFENG 1-1-1/ST-2	南海	BO	116.072	21.991	3105—3320	165		
62	HAIFENG 28-2-1	南海	BO	116.618	22.265	2945—3890	28		
63	HAIFENG 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	蔚县	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 I

序号	钻孔 编 号	测 量 地 点	资 料 类 型	经 纬 度		测 段 深 度 (m)	S_n 方 向 (°)	测 量 时 间	资 料 来 源
				λ_e (°)	ϕ_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	大冶中坚井	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 et al., 1987
124	都留	日本	HF	138.887	35.513	80~390	120		Tsukahara et al., 1987
125	横须贺	日本	HF	139.701	35.208	190	175		Tsukahara et al., 1987
126	富津	日本	HF	138.962	35.173	210~390	130		Tsukahara et al., 1987
127	修善寺	日本	HF	138.919	34.946	140~400	20		Tsukahara et al., 1987
128	冈部	日本	HF	138.269	34.930	220~430	130		Tsukahara et al., 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 (m)	S_h 方 向 (°)	测 量 时 间	资 料 来 源
				λ_e (°)	ϕ_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 rangjin	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

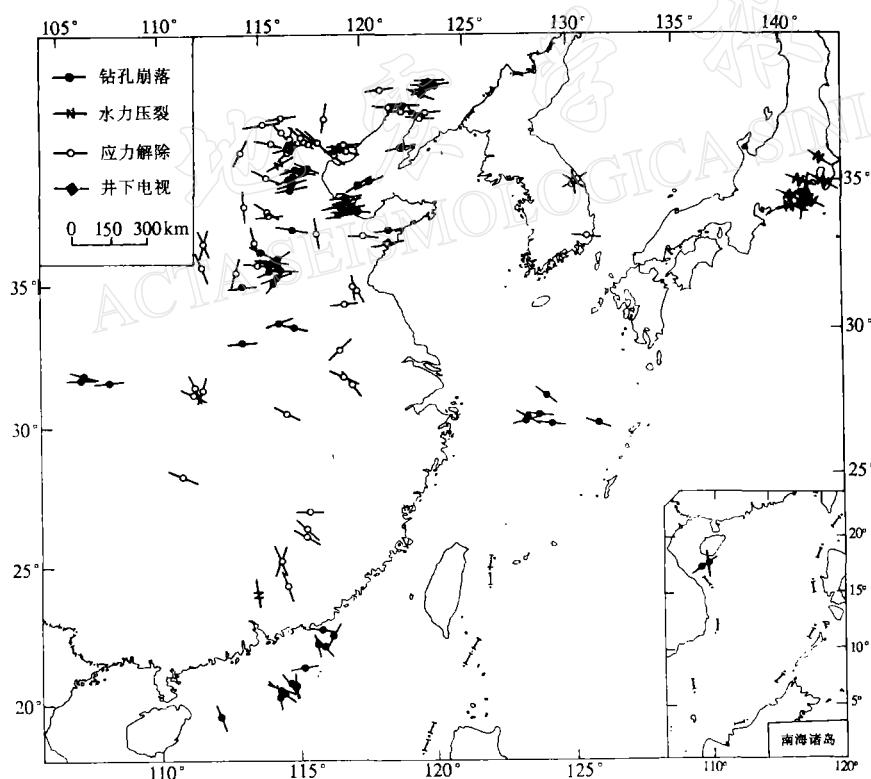


图 1 中国海区及其邻域 S_h 方向展布

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°。渤海内的两个钻孔崩落数据深度达 3000m, S_H 方向为 NE65° 和 NE64°。渤海沿岸唐山地区的三个崩落数据反映其 S_H 方向为 NE83°。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°。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°。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°。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° 和 NE65°,而其沿岸的一些点大多在 NE80° 以上,很少低于 NE70°。这便产生了约 15°—20° 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°,即 N 68°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 N 63°W,江西到广东一带平均为 N 53°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 N 37°W,海南岛附近北部湾一带为 N 13°W。据实地考察,海南岛上第四纪火山排列方向大致为 N 20°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°—170°。

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°,可见该区主压应力方向为近东西(卓秀榕和陈光桐, 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-沼安-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。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°—10°,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)。

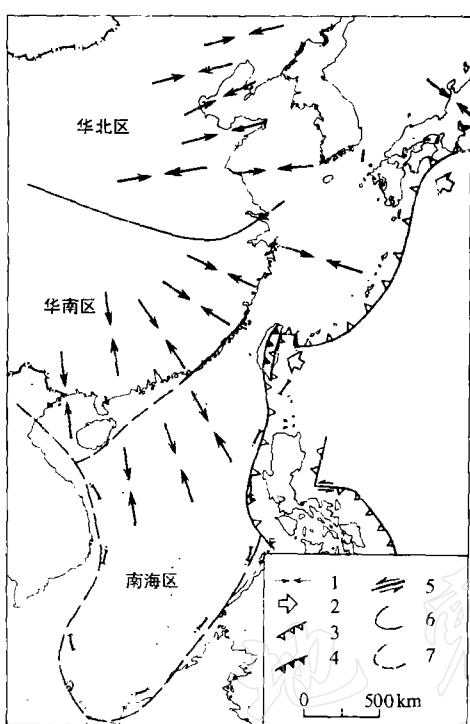


图2 中国海区及其邻域构造应力场分区

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

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°—180°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

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°—170°。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°—100°之间,绝大多数为NEE向,极少数呈NWW

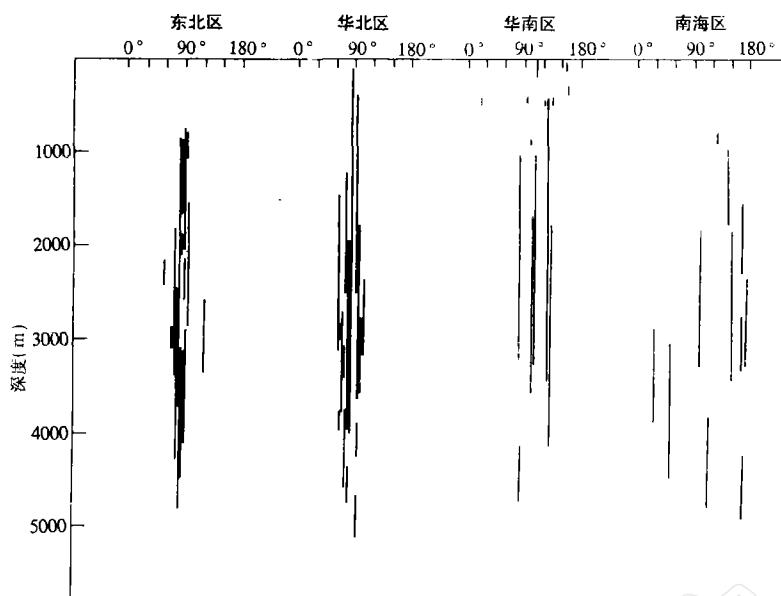


图3 最大水平主应力方向随深度的变化

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_b 与深度 Z 之间的回归计算,结果见图4和(1),(2)式。

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

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

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

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

(1),(2)式中 S_h 和 S_b 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_b^1-Z 的 $r=0.96$; S_h^2-Z 的 $r=0.79$, S_b^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 $S_h > S_v > S_b$ 。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。

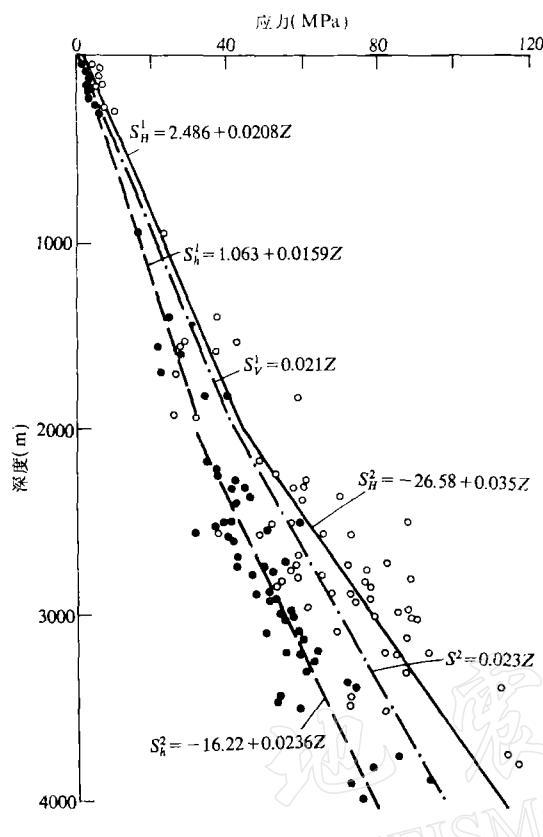


图4 华北平原区三向主应力随深度的变化
 S_H —最大水平主应力; S_h —最小水平主
应力; S_V —垂直向主应力

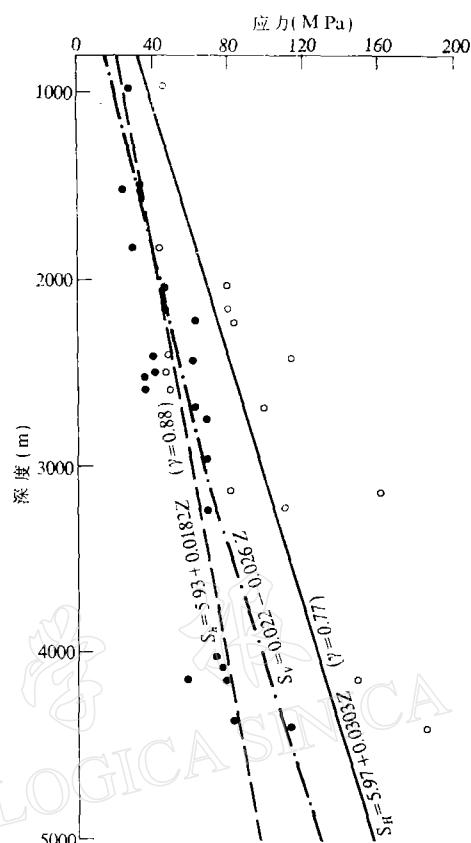


图5 华南区三向主应力值随深度的变化

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

(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 $S_v > S_h > S_b$. 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.
- 邬家全、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、陈光桐, 1983. 岩石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.