



南海西南次海盆海底地震仪天然地震观测及 ScS 波分裂

阮爱国^①, 李家彪^{①*}, 李昭兴^②, 丘学林^③, 潘少军^①

① 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

② 台湾海洋大学应用地球物理研究所, 基隆 20224;

③ 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

* 联系人, E-mail: jbli@sio.org.cn

2011-12-02 收稿, 2012-02-29 接受

国家自然科学基金重大研究计划(91028006)、国家自然科学基金(40876035, 41176046)和国家重点基础研究发展计划(2007CB411701)资助

摘要 简要介绍了南海西南次海盆 OBS 3D 地震探测台阵, 整理并详细分析了宽频带 OBS 的天然地震记录, 结果表明共记录了 M_s 6.0~6.9 地震 93 个, M_s 7.0 以上地震 10 个, 数据质量较好, 特别是 2011 年 3 月 11 日日本仙台以东海域发生的 M_s 9.0 大地震. 对 4 次 M_s 7.0 以上地震的 ScS 波进行了各向异性反演, 结果表明西南次海盆的快 S 波偏振方向 $N58^\circ E$ 平行于已停止活动的扩张脊(慢波方向 $S35^\circ E$ 垂直于扩张轴), 说明西南次海盆的扩张脊现今处于挤压应力状态, 反映了南海南部边缘的碰撞格局和洋脊停止扩张的动力学原因.

关键词

宽频带海底地震仪
西南次海盆
天然地震
各向异性
扩张脊

南海壳幔结构的研究早期主要是采用重力资料^[1-3]及声纳浮标资料^[4-6]. 岩石圈尺度的地壳结构研究主要采用天然地震面波资料^[7-9]. 更精细可靠的结果主要来自人工震源广角地震试验^[10-17], 但主要集中在北部陆缘. 近期在南部陆缘完成了几条海底地震仪(OBS)测线, 极大地改善了数据结构(图 1). 就天然地震而言, 除了马尼拉海沟外, 南海南北陆缘和海盆的地震频度很低^[18], 而海盆中央又没有地震台站, 因此对南海岩石圈结构更深入更精细的研究还需做两方面的工作: 一是充分利用沿海地区和岛屿的地震台站, 开展国家或地区间的合作, 并新建一些地震台站, 尽可能使地震射线能较均匀地覆盖整个南海地区; 二是将宽频带 OBS 投放到海底, 进行一定时间的观测, 逐年积累.

2010 年 12 月至 2011 年 3 月, 我们在南海的西南次海盆已停止扩张的中脊, 开展了一次 3D OBS 台阵人工震源试验(图 1). OBS 台阵位于中南-长龙海山链, 共使用了 40 台 OBS, 其中 8 台为 I-4C 型宽频带 OBS(中国), 回收了 7 台, OBS09 丢失. 恶劣的天气给

探测工作造成了极大的困难, 导致整个调查持续了近 4 个月的时间. 但又使我们获得了额外的收获, 在此期间, 宽频带 OBS 记录了全球发生的许多天然地震, 特别是 2011 年 3 月 11 日日本仙台以东海域发生的 M_s 9.0 大地震. 本文拟对本次试验获得的天然地震资料进行分析评估, 利用 ScS 波记录进行各向异性研究.

岩石圈各向异性反演是以大量的实践和理论研究为基础的. 自 Hess^[19]的开创性工作以来, 大量的地震观测表明岩石圈(上地幔)存在各向异性, 而这种各向异性被认为是应变导致岩石晶格的优势排列^[20]. 尽管在成因上各种假说之间存在一定的差异, 但总体上认为岩石圈各向异性能够反映板块或深部物质的运动方向. 研究方法主要分为两类: 一种是比较多方位射线的走时差异性, 要求地震射线在方位上均匀分布; 二是利用同一射线 SH 和 SV 波由于偏振方向不同在通过各向异性介质时产生的分裂现象, 常用震相为通过内核的 SKS 和经核幔边界反射的 ScS. 国内外地震各向异性研究已经历了长期的发展, 取

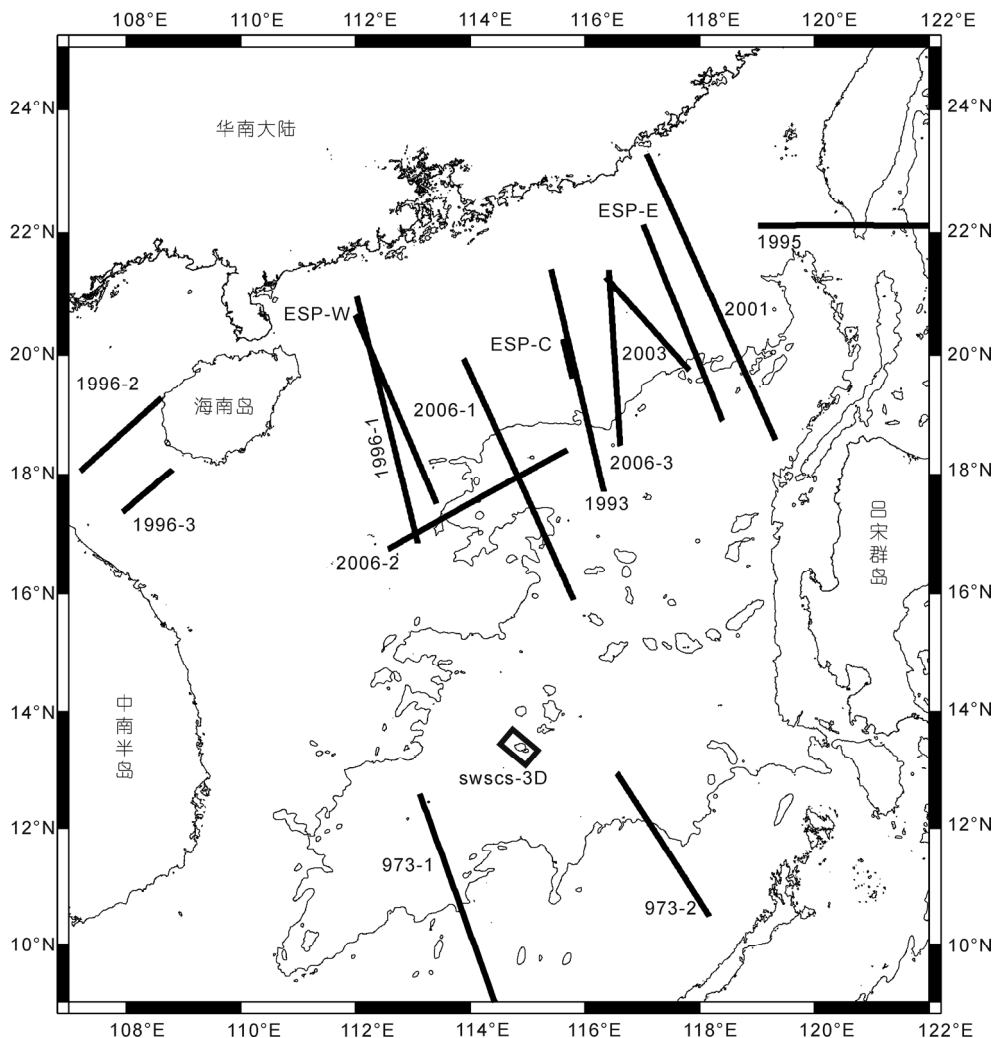


图1 南海西南次海盆 3D 探测作业区示意图

其中的小矩形为作业区, 实直线为 OBS 测线

得了许多成果^[21], 主要是利用陆地台站观测, 对于海洋主要采用面波或海岛台站记录, 用海底下面的宽频带 OBS 记录的还比较少见, 中国还是首次. 由于观测时间较短, 记录中没有找到合适的 SKS.

1 地质背景、观测台阵

西南次海盆是海底扩张形成的小洋盆, 向东北方向呈喇叭形张开. 其中央是中南-长龙海山链和具有较厚沉积的裂谷, 显示了慢速扩张洋脊的特征. 磁异常条带显示海底扩张年代为 23~16 Ma^[22,23], 海山链分布显示了扩张后一定程度的岩浆活动. 对海山区拖网采样获得的玄武岩样品的年代分析表明, 海山的年龄为 14~3.5 Ma^[24,25], 说明扩张停止后岩浆活

动没有即时停止, 因此, 推测扩张轴下面可能有残余岩浆房或特殊构造.

本次 3D OBS 台阵人工震源探测的目标是获取扩张轴(裂谷)和周边洋壳及深部的精细构造, 特别期待能发现残余岩浆房. 因此, 台阵布设比较密集, 间距 10~15 km(图 2), 5 台宽频带 OBS 位于裂谷的西北侧, 3 台位于裂谷的东南侧. 表 1 给出了 OBS 站位坐标.

2 仪器特性和数据采集

I-4C 型宽频带 OBS(中国)的设计适应了国际上技术发展的趋势, 采用的新技术有可充式锂电池、蓝牙输入参数、读取数据和 GPS 通讯等. 仪器舱内集成了姿控宽带三分量地震计, 频带 60 s~50 Hz, 另加 1

图 2 南海西南次海盆 3D 海底地震仪探测系统及宽频带 OBS 分布(黄色)

OBS9(从西北向东南第二排左 4)丢失

表 1 OBS 台站参数及记录时段^{a)}

台站编号	OBS06	OBS07	OBS08	OBS011	OBS34	OBS35	OBS36
纬度(°)	13.44	13.49	13.54	13.57	13.12	13.06	12.95
经度(°)	114.60	114.69	114.76	114.97	114.95	114.87	114.95
罗经 φ (°)	218.50	104.50	208.50	286.00	128.00	31.50	170.50
开始记录日期	2010-12-10	2010-12-10	2010-12-10	2010-12-10	2010-12-10	2010-12-10	2010-12-10
开始记录时间	13:02:15	13:12:38	12:04:13	11:02:20	12:49:47	12:38:01	13:27:11
数据截止日期	2011-03-20	2011-02-27	2011-01-10	2010-12-24	2011-02-05	2011-03-14	2011-02-05
数据截止时间	18:02:39	10:02:40	23:03:47	18:50:11	19:40:48	16:51:17	20:17:33

a) 第一水平分量方位角 $X=\varphi-60^\circ$, 第二水平分量方位角 $Y=\varphi+30^\circ$. 时间为格林尼治时(GMT)

个水听器, 自动记录水平分量方位. 记录器前放电路在信号输入端加配一阶无源 LC 低通抗混叠滤波器, 采用极低噪音精密双运算放大器构成仪器放大电路, 且有很高的抗干扰能力. A/D 采用 4 阶 Σ - Δ 增量调制器, 动态范围 >120 dB, 数据容量 16 G, 整体功耗 <0.3 W, 内部时钟精度优于 5×10^{-8} s. 本次试验数据采样时间间隔 8 ms. 图 3 显示了气枪作业的信号记录, 记录站位 OBS06, 水深 3580 m, 气枪容量 98 L, 工作压力 120 kg/cm^2 , 可以看出, 除了地震信号外, 还记录了被激发的海底的水下波动. 这种水下波动按频率特性, 可以分为两种类型, 一是 50 s 左右的长波, 一种为频率较高的短波, 后者可能是由于该型 OBS

底座较高引起的, 在水听器分量上特别明显.

宽频带 OBS 记录起始时间 2010 年 12 月 10 日, 结束时间 2011 年 3 月 23 日. 共记录 M_s 6.0~6.9 地震 93 个(图 4(a)), M_s 7.0 以上地震 10 个(图 4(b), 表 2), 表 3 给出了 M_s 7.0 以上地震震中距和反方位角. 具有特别意义的是多台宽频带 OBS 很好地记录了 2011 年 3 月 11 日日本仙台以东海域发生的 M_s 9.0 大地震, 图 5 为 OBS06 台站的记录, 震中距 34.93° , 反方位角 39.82° , P 波走时 $6'53.95''$; S 波走时 $12'22.22''$. 另外还识别出了 ScS 等震相. 可以看出本次西南次海盆天然地震观测试验获取的大震记录质量很好, 为后续研究提供了重要数据.

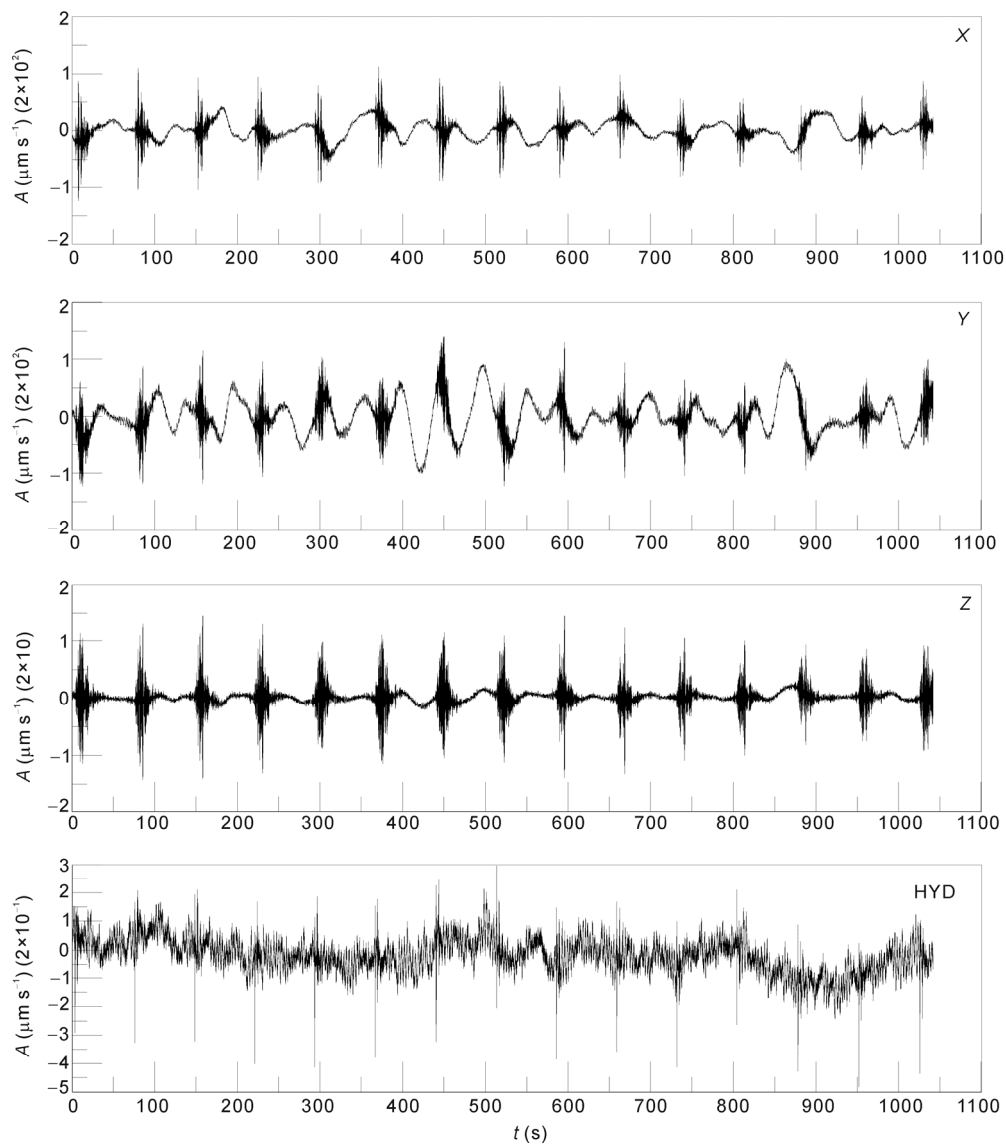


图 3 气枪作业宽频 OBS 的信号记录

表 2 2010 年 12 月~2011 年 3 月 $M \geq 7.0$ 级以上地震目录^{a)}

地震号	发震日期 (年-月-日)	发震时间 (GMT)	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	震级 (Ms)
1	2010-12-21	17:19:40.66	26.90	143.70	14	7.4
2	2010-12-25	13:16:37.00	-19.70	167.95	16	7.3
3	2011-01-01	09:56:58.06	-26.79	-63.09	576	7.0
4	2011-01-02	20:20:17.69	-38.37	-73.35	24	7.1
5	2011-01-13	16:16:41.54	-20.63	168.47	9	7.0
6	2011-01-18	20:23:23.51	28.78	63.94	68	7.2
7	2011-03-09	02:45:20.33	38.44	142.84	32	7.3
8	2011-03-11	05:46:24.12	38.30	142.37	29	9.0
9	2011-03-11	06:15:40.92	36.27	141.11	48	7.9
10	2011-03-11	06:25:50.30	38.06	144.59	18	7.7

a) GMT 指格林尼治时, 地震目录由美国 USGS 网站发布

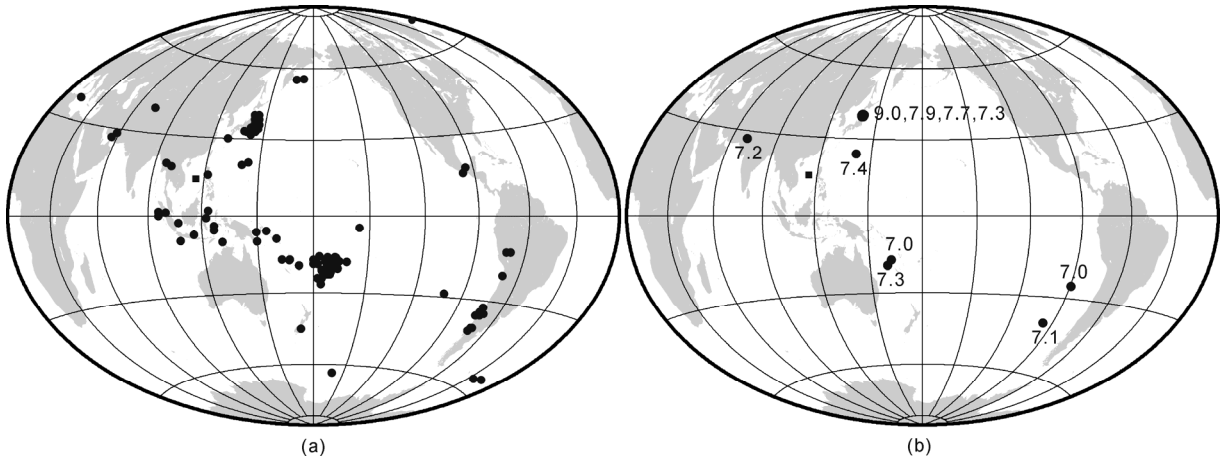


图4 OBS台阵及天然地震分布

实心正方形为 OBS 台阵, 实心圆为震中. (a) M_s 6.0~6.9; (b) M_s 7.0 以上. 本文根据实际数据记录质量, 选取了其中 4 个 M_s 7.0 以上和 1 个 M_s 6.5 的深源地震 ScS 记录进行各向异性反演

表3 OBS 各台站相对 M_s 7.0 以上地震的震中距及反方位角

地震编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OBS06	震中距($^{\circ}$)	30.33	61.98	166.54	154.18	62.84	49.31	35.31	34.93	32.90	36.20
	反方位角($^{\circ}$)	59.32	121.09	188.90	165.54	121.76	296.44	40.01	39.82	41.61	41.92
OBS07	震中距($^{\circ}$)	30.23	61.93	166.60	154.21	62.79	49.36	35.21	34.83	32.81	36.10
	反方位角($^{\circ}$)	59.34	121.16	188.60	165.37	121.83	296.38	39.98	39.78	41.58	41.90
OBS08	震中距($^{\circ}$)	30.14	61.89	166.66	154.24	62.76	49.40	35.13	34.75	32.72	36.02
	反方位角($^{\circ}$)	59.36	121.22	188.34	165.21	121.88	296.34	39.97	39.77	41.57	41.88
OBS11	震中距($^{\circ}$)	29.96	61.74	166.72	154.22	62.60	49.57	34.98	34.60	32.57	35.86
	反方位角($^{\circ}$)	59.28	121.34	187.57	164.84	122.00	296.29	39.82	39.62	41.41	41.75
OBS34	震中距($^{\circ}$)	30.20	61.52	166.27	153.79	62.38	49.75	35.33	34.96	32.92	36.21
	反方位角($^{\circ}$)	58.63	121.12	187.4	165.11	121.79	296.63	39.43	39.23	40.97	41.36
OBS35	震中距($^{\circ}$)	30.29	61.56	166.21	153.76	62.42	49.71	35.42	35.05	33.00	36.30
	反方位角($^{\circ}$)	58.60	121.06	187.66	165.27	121.73	296.68	39.45	39.25	40.99	41.37
OBS36	震中距($^{\circ}$)	30.29	61.43	166.11	153.63	62.82	49.83	35.46	35.08	33.04	36.33
	反方位角($^{\circ}$)	58.39	121.05	187.31	165.20	122.16	296.75	39.29	39.08	40.80	41.21

3 M_s 7.0 以上大震 S 波分裂研究

地震波通过各向异性介质时最直接的特征是剪切波的分裂现象^[26,27], 两个偏振方向不同的 S 波具有不同的传播速度, 从而使 S 波失去分裂前的粒子线性运动状态. 通过适当的旋转和时间校正, 可以将它们分离开来, 恢复线性运动, 从而确定各向异性参数. 其中的快波偏振方向为张应变方向, 对应地幔流或板块运动方向; 时间延迟反映各向异性的强度和厚度. 至于用哪种 S 波, 取决于震中距及实测数据质量.

本次西南次海盆天然地震观测共记录 M_s 7.0 以上大震 10 次(表 2), 遴选出 4 次地震的核幔边界反射

ScS 并采用旋转相关法^[28]进行 ScS 波各向异性反演. 旋转相关法是对经过旋转后重新投影而分解的两个水平分量波列进行时间延迟校正和相关分析, 将相关性最大时对应的旋转方向和时间延迟作为反演结果, 并进而根据时间延迟结合其他资料估算各向异性厚度和强度. 具体做法是将两个水平分量分解为南北(Y 分量)和东西(X 分量), 然后相对正北方向顺时针以步长 $\Delta\varphi=2^{\circ}$ 在 $0^{\circ}\sim180^{\circ}$ 范围内旋转, 得到两个新的分量:

$$\begin{aligned} S_1 &= Y\cos\varphi + X\sin\varphi, \\ S_2 &= -Y\sin\varphi + X\cos\varphi, \end{aligned} \tag{1}$$

对于每一个旋转角度, 以时间步长 $\Delta\tau=0.08\text{ s}$ 在 $-2.4\sim2.4\text{ s}$ 范围内变化时间延迟 τ , 求两水平波列的

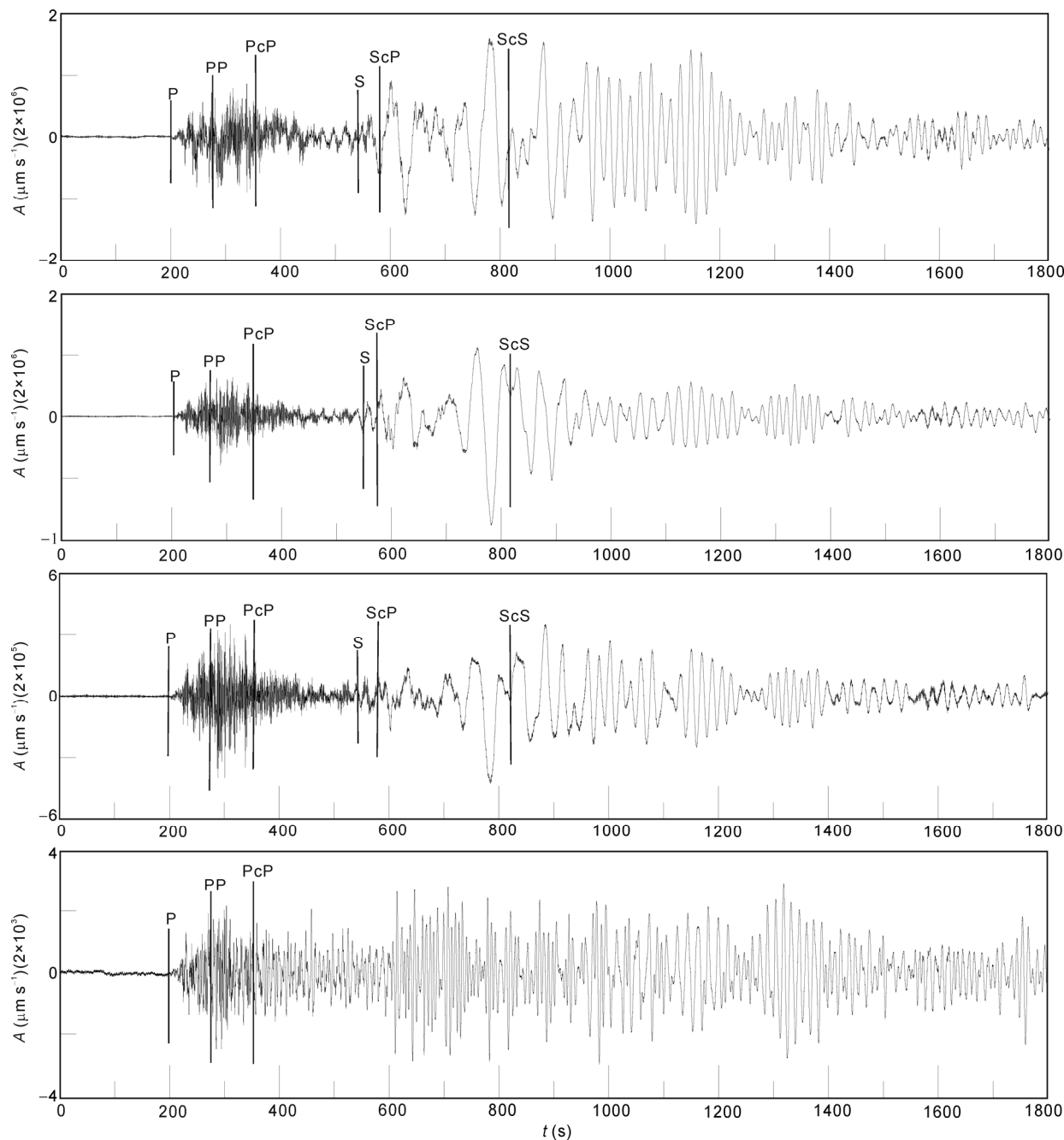


图 5 宽频带 OBS06 站位记录的 3 月 11 日日本东部海域 $M_s9.0$ 大震
从上到下依次为两个水平分量、垂直分量和水听器记录

相关函数:

$$C(\phi, \tau) = \int_{t_1}^{t_2} S_1(t) S_2(t + \tau) dt, \quad (2)$$

其中的 t_1 和 t_2 为所选定的参加计算的数据起点和终点. 需要说明的是, 由于或多或少存在一些干扰, 所

以在计算前应对记录进行滤波处理.

最终反演结果列于表 4, 除了没有记录数据或不收敛外, 可以看出大多数解是稳定的, 快波方向为 $56^\circ \sim 60^\circ$, 时间延迟 $0.8 \sim 1.04$ s. 但也出现了偏差较大的解, 原因可能有三方面, 一是原始记录中干扰的影响带有随机性, 所以各次的记录质量存在差异; 二是

地震的定位误差造成震中距和走时计算的细小误差,使得所选取的计算 ScS 的起始时间不准确. 三是地震本身造成的. 例如震源深度不同,在震中距相同时, S 波在核幔的反射点实际是不一样的. 当然还有其他原因,包括射线路径上的方位非均匀性差异及面波的干扰等.

为了对反演结果进行评估,作了 3 方面的分析(以 OBS06 站位事件 1 为例). 首先是考查反演前后两水平分量的波形. 可以看出,两个原始波波形由于没有将快慢波分离,所以两者不存一致性(图 6(a)),而

反演校正后两列波基本一致(图 6(c)). 二是考查反演前后运动轨迹,可以看出,校正以后的运动轨迹明显呈线性状态(图 6(d)),而原始轨迹较乱(图 6 (b)). 三是分析相关函数等值线的稳定性,等值线图中收敛圆的中点对应最大相关函数,其坐标读数就是各向异性的参数(图 6(e)). 与此类似,图 7 和 8 分别给出 OBS06 站位事件 8 和 OBS35 站位事件 8(日本大地震)的各向异性反演结果,可以看出结果是比较稳定的,快波方向约 58° . 等值线图同时也指示出慢波方向约 145° (时间延迟为负值).

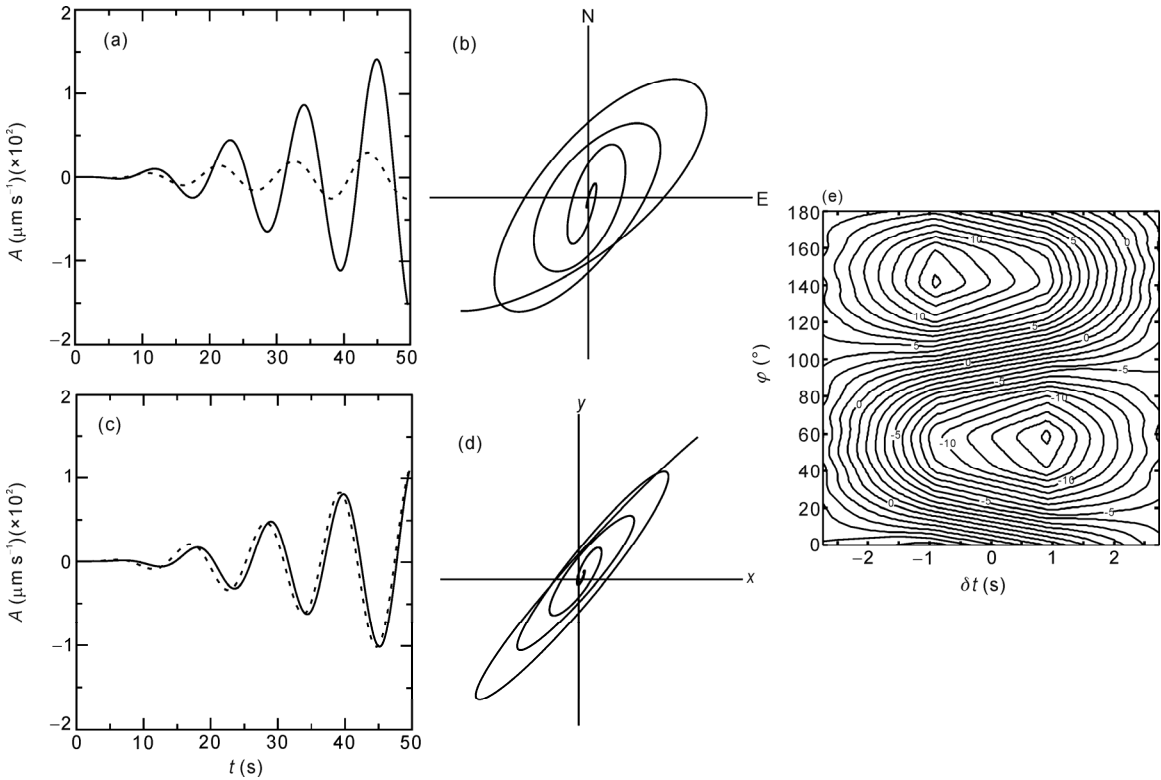


图 6 OBS06 站位事件 1 的反演结果分析

(a) 反演前两水平分量波形; (b) 反演前轨迹图; (c) 反演后两水平分量波形; (d) 反演后轨迹图; (e) 相关函数等值线图

表 4 ScS 波各向异性反演结果^{a)}

地震事件编号	1	2	5	8	11
反演参数	$\phi/\delta t$	$\phi/\delta t$	$\phi/\delta t$	$\phi/\delta t$	$\phi/\delta t$
OBS06	56/0.8	40/1.04	58/0.8	56/0.88	56/0.8
OBS07	28/0.8	58/1.04	58/0.64	—	60/0.8
OBS08	反演失效	62/0.96	—	—	—
OBS11	56/0.8	—	—	—	—
OBS34	60/1.04	60/0.96	40/0.96	—	55/0.96
OBS35	76/0.8	16/0.88	—	58/0.8	—
OBS36	58/1.04	58/0.8	58/0.96	—	56/0.8

a) ϕ 为快波偏振方向(正北顺时针), 单位: $(^{\circ})$; δt 为快慢波时间延迟, 单位: s. “—”表示无记录

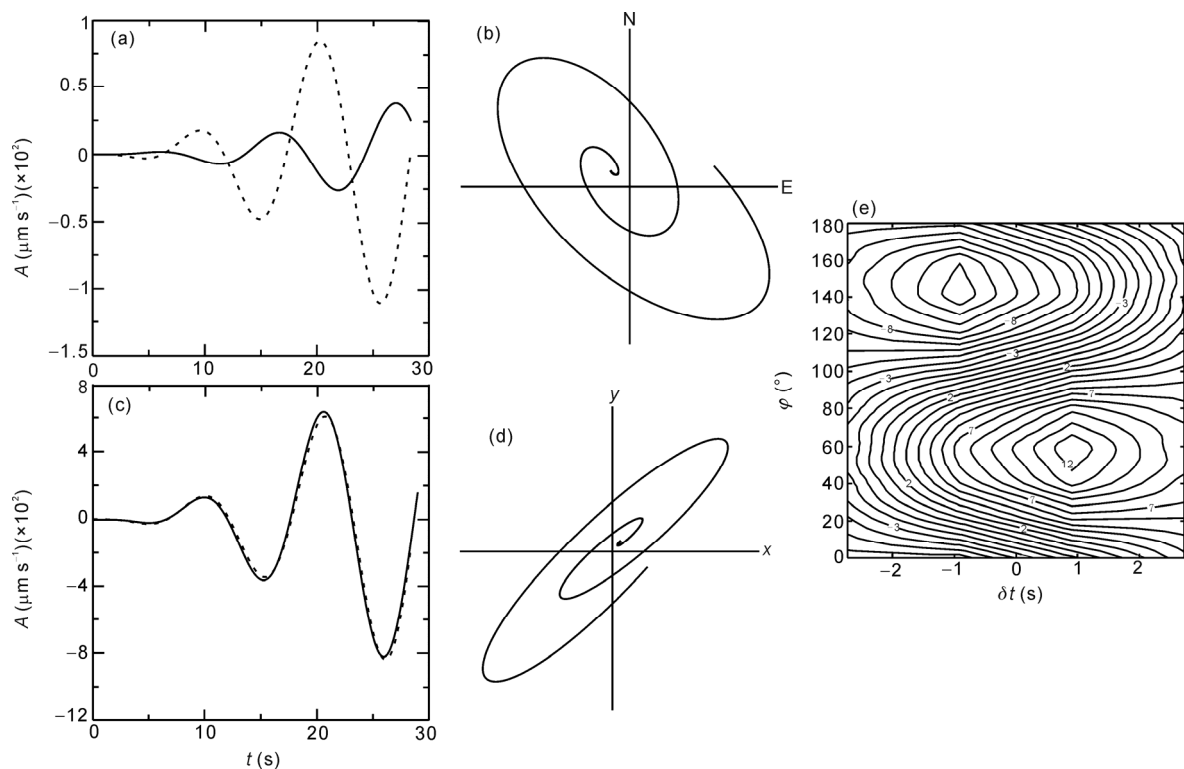


图 7 OBS06 站位事件 8 的反演结果分析

(a) 反演前两水平分量波形; (b) 反演前轨迹图; (c) 反演后两水平分量波形; (d) 反演后轨迹图; (e) 相关函数等值线图

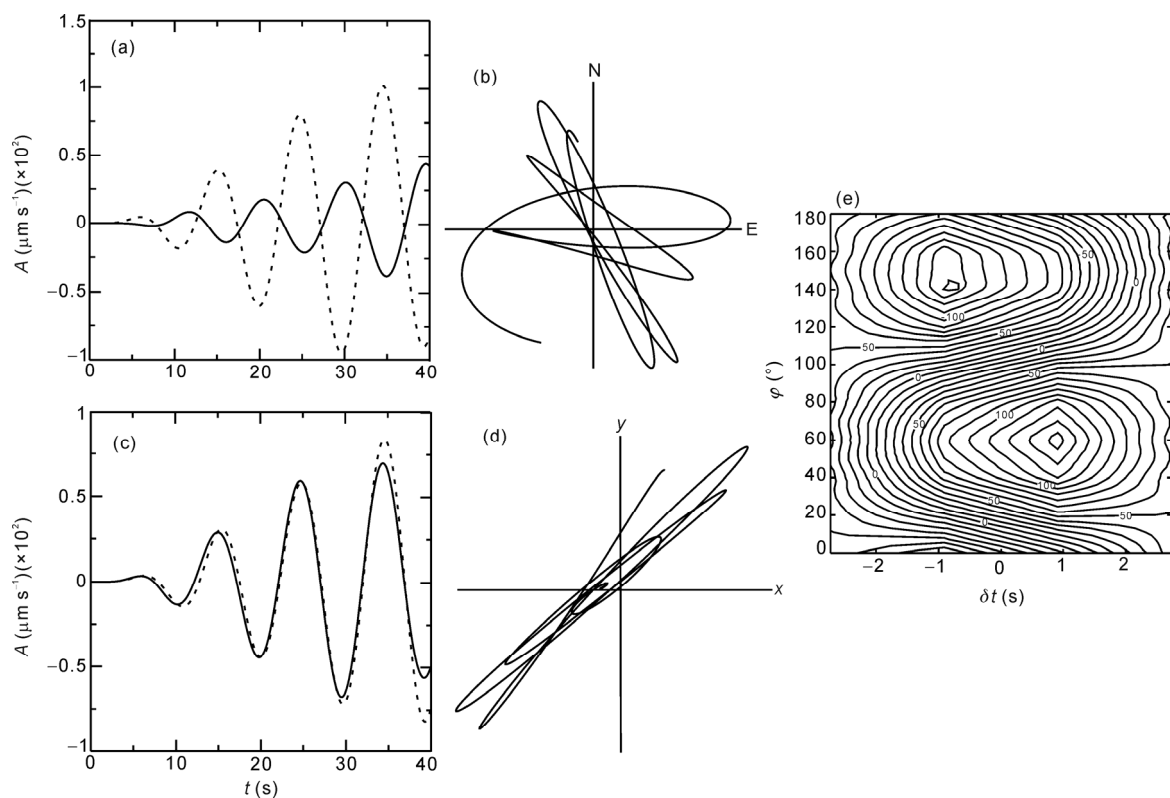


图 8 OBS35 站位事件 8 的反演结果分析

(a) 反演前两水平分量波形; (b) 反演前轨迹图; (c) 反演后两水平分量波形; (d) 反演后轨迹图; (e) 相关函数等值线图

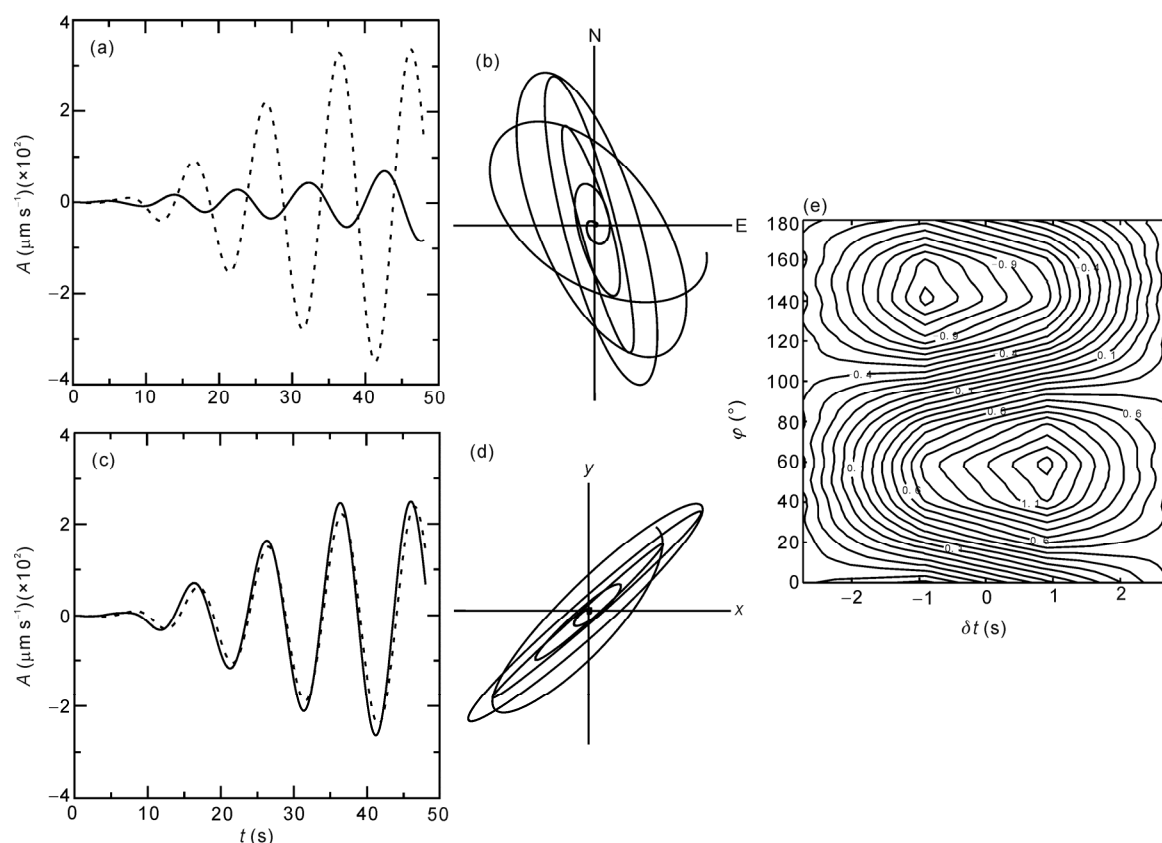


图9 OBS06 站位事件 11(M_s 6.5)的反演结果分析

(a) 反演前两水平分量波形; (b) 反演前轨迹图; (c) 反演后两水平分量波形; (d) 反演后轨迹图; (e) 相关函数等值线图

根据经验,震源越深 ScS 波的可靠性越好,为此增选了一次震源深 527 km 的 M_s 6.5 地震(事件 11)进行了反演. 该地震相对 OBS06 站位距离 27.20° , 反方位角 56.44° , 其反演结果与上述 M_s 7.0 以上地震相同(表 4, 图 9). 根据这些结果,我们确定西南次海盆长龙海山链扩张脊快 S 波偏振方向约为 $N58^\circ E$, 平行于扩张脊走向,时间延迟约 0.9 s;慢波方向约 $S35^\circ E$ (时间延迟为负值),垂直于扩张脊.

4 讨论与结论

本文整理并详细分析了南海西南次海盆 3D 地震测测期间的宽频带 OBS 的天然地震记录,结果表明共记录了 M_s 6.0~6.9 地震 93 个, M_s 7.0 以上地震 10 个,特别是 2011 年 3 月 11 日日本仙台以东海域发生的 M_s 9.0 大地震. 数据质量较好,为后续研究提供了很好的基础.

南海的应力场比较复杂,动力来源多. 重力资料反演结果表明,南海南部下地幔流方向为南东向^[29].

GPS 测量表明主要应力背景是华南块体的东南向运动. 面波反演研究表明南海岩石圈应力场基本特征是西北部为近东西向拉张;中部浅层为南北拉张,深部为东西向拉张;南部以东西向拉张为主^[30]. 另外,数值模拟等研究也给出了不同的结果. 利用 S 波分裂现象是解决这一问题的办法,其精细度远高于面波和重力等方法. S 波各向异性是由应变导致的橄榄石晶格的优势排列,最大张应力方向对应快 S 波的偏振方向,而这种应变是由上地幔或岩石圈物质的运动造成的.

本研究得到的快 S 偏振方向 $N58^\circ E$ 及其与扩张脊的平行关系,验证了前人关于南海海盆海底扩张是由中央海盆向西南海盆发展的说法^[22],因为这种沿扩张轴的线性张裂造成的橄榄石晶格的优势排列是平行于扩张轴的. 结合慢波方向 $S35^\circ E$ 垂直于扩张轴,说明西南次海盆停止扩张的洋脊处于应力挤压状态,反映了南海南部边缘的碰撞格局和洋脊停止扩张的动力学原因.

利用本次试验获得的天然地震记录, 可用接收函数法开展岩石圈 S 波速度结构研究; 拾取各级地震的 P 波和 S 波到时, 将进一步积累整个南海地震层析成像数据库.

致谢 参加西南次海盆海底地震仪海上作业还有国家海洋局第二海洋研究所的吴振利、董崇志、牛雄伟、刘宏扬, 中国科学院南海海洋研究所的朱俊江、黄海波、卫小冬及台湾海洋大学的梁进维、王亮钧、邱懋翔、徐位丰. 所用调查船为上海海洋石油局第一海洋地质调查大队“奋斗 7 号”、“勘 407”及中国科学院南海海洋研究所的“实验 2 号”.

参考文献

- Liu Z, Wang Q, Yuan H, et al. The Bouguer anomalies and depths of Mohorovicic discontinuity in the South China Sea region. *Bull Chin Oceanogr*, 1985, 4: 579–590
- 陈邦彦, 雷受旻. 地壳结构图. 见: 何廉声, 陈邦彦, 编. 南海地质地球物理图集. 广州: 广东省地图出版社, 1987. 10–12
- 苏达权, 刘元龙, 陈雪. 南海的三维莫霍界面. 见: 张中杰, 高锐, 吕庆田, 编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究——庆贺滕吉文院士从事地球物理研究 50 周年. 北京: 科学出版社, 2004. 357–365
- Ludwig W J, Kumar N, Houtx R E. Profiler-Sonobuoy measurements in the South China Sea Basin. *J Geophys Res*, 1979, 84: 3505–3518
- 李振伍. 南海中部和北部地壳性质探讨. *地球物理学报*, 1984, 27: 153–165
- 姚伯初, 王光宇. 南海海盆的地壳结构. *中国科学 B 辑*, 1983, 2: 177–186
- 姚伯初, 万玲, 吴能友. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征. *地质通报*, 2005, 24: 1–8
- 朱介寿. 欧亚大陆及边缘海岩石圈的结构特性. *科学前缘*, 2007, 14: 1–20
- 郝天珧, 黄松, 徐亚, 等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. *地球物理学报*, 2008, 51: 1785–1796
- Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep penetration seismic sounding across the northern margin of the South China Sea. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22407–22433
- Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1–21
- Qiu X L, Ye S Y, Wu S, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179–193
- Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237–254
- 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. *地球物理学报*, 2004, 47: 845–852
- 阮爱国, 牛雄伟, 吴振利, 等. 潮汕坳陷中生代沉积的折射波 2D 速度结构和密度. *高校地质*, 2009, 15: 522–528
- 吴振利, 李家彪, 阮爱国, 等. 南海西北次海盆地壳结构: 海底广角地震试验结果. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2011, 41: 1463–1476
- 丘学林, 陈颙, 朱日祥, 等. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析. *科学通报*, 2007, 52: 553–560
- 李家彪, 金翔龙, 阮爱国, 等. 马尼拉海沟增生楔中段的挤入构造. *科学通报*, 2004, 49: 1000–1008
- Hess H H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under ocean. *Nature*, 1964, 203: 629–631
- Nicolas A, Christensen N I. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites — A review in composition, structure and dynamics of the lithosphere. In: Fuchs K, Froidevaux C, ed. *Asthenosphere System Vol.16*. Washington D C: Am Geophys Union, 1987. 111–123
- 阮爱国, 王椿镛. 上地幔各向异性研究综述及在川滇地区的研究思路. *国际地震动态*, 2001, 10: 1–7
- Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *J Geophys Res*, 1993, 98: 6299–6328
- Sun Z, Zhou D, Wu S M, et al. Patterns and dynamics of rifting of passive continental margin from self to slope of the northern South China Sea: Evidenced from 3D analogue modeling. *J Earth Sci*, 2009, 20: 137–146
- Yan P, Deng H, Liu H L. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region. *J Asian Earth Sci*, 2006, 27: 647–659
- 王叶剑, 韩喜球, 罗照华, 等. 晚中新世南海珍珠-黄岩海山岩浆活动及其演化: 岩石地球化学和年代学证据. 见: 金翔龙, 秦蕴珊, 朱日祥, 等, 编. 中国地质地球物理研究进展——庆贺刘光鼎院士八十华诞. 北京: 海洋出版社, 2008. 658–668
- Keith C M, Crampin S. Seismic body waves in anisotropic media: Synthetic seismograms. *J Geophys Res*, 1977, 49: 225–243
- Stuart C. A review of the effects of anisotropic layering on the propagation of seismic waves. *J Geophys Res*, 1977, 49: 9–27
- Bowman J R, Ando M. Shear-wave splitting in the upper mantle wedge above the Tonga subduction zone. *J Geophys Res*, 1987, 88: 25–41
- 王启玲, 刘祖惠, 黄慈流, 等. 南海及其围区壳下地幔流应力场和陆缘扩张. *热带海洋*, 1987, 6: 19–27
- 郑月军, 黄忠贤, 彭艳菊. 中国边缘海上地幔各向异性及其构造意义. 见: 李家彪, 高抒, 编. 中国边缘海海盆演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2004. 3–8