

菲律宾海板块运动欧拉参数的确定及其推论*

臧绍先^① 陈起永^{①**} 宁杰远^① 沈正康^② 刘永刚^①

(^①北京大学地球物理系, 北京 100871; ^②美国加利福尼亚大学洛杉矶分校地球科学系, Los Angeles, USA)

摘要 利用 NUVEL-1 全球板块模型的 1122 个数据、菲律宾海板块(PH)的地震滑动矢量以及由 GPS 测得的运动速率, 根据全球板块模型反演了包括菲律宾海板块在内的 12 个板块相对于太平洋板块(PA)的欧拉矢量. 推得了菲律宾海板块相对周围其他板块的运动矢量. 这一结果与观测值相当符合, 并能满足开罗林板块(CR)附近的 CR-PH, PA-CR 边界上的地质及其他地球物理约束. 最后利用板块运动参数讨论了菲律宾海板块的形变.

关键词 菲律宾海板块 地震滑动矢量 板内形变 板块相对运动 板块运动参数

板块运动的欧拉参数是表征板块运动的最基本参数. 菲律宾海板块是在板块构造学说提出的早期即提出的一个独立板块. 它在西太平洋及东亚大陆的构造演化过程中地位特殊, 倍受关注, 但它与周边其他板块的边界基本上是以俯冲为主的汇聚边界, 没有能确定相对运动速率的增生边界和能较准确确定相对运动方向的转换边界, 所以确定它的欧拉参数很困难, 是板块学说的一个难点, 因而也是一个研究热点.

在精确的空间测量技术提供可用资料之前, 俯冲边界上逆掩型地震的滑动矢量可以用来约束板块的相对运动, 对于菲律宾海板块至少有 3 个因素使得地震滑动矢量的应用有不确定性. 首先是弧后开裂和上掩板块的形变. 如玛里亚纳海槽的扩展, 类似的上掩板块内的走滑断层, 如菲律宾断层, 使滑动矢量也偏离了板块的运动方向. 其次, 菲律宾海板块周围的一些小型碰撞带, 也使地震机制的解释变得复杂. 另外菲律宾海板块北部边界是与欧亚板块还是北美板块相交尚有争议. 因此在利用板间地震的滑动矢量来确定菲律宾海板块的欧拉矢量时必须认真分析这些问题.

已有不少作者讨论或利用地震滑动矢量得到了菲律宾海板块的欧拉参数^[1-6]或讨论了它的约束条件^[7]. Seno 等人^[8]详述了这些工作中的缺陷, 并利用菲律宾海板块和欧亚板块(PH-EU)边界的 Nankai 海槽-琉球海沟处 11 个滑动矢量及菲律宾海板块和太平洋板块(PH-PA)边界的伊豆-小笠原海沟的 16 个滑动矢量, 结合 NUVEL-1 全球板块模型^[9]得到了菲律宾海板块的欧拉矢量. 这是目前存在的最好的结果. 但尽管如此, 资料数量仍嫌不足, 特别是缺乏运动速率的资料. 近期, 地震滑动矢量可以更可靠地从大量的 CMT 结果中得到, 而 GPS 观测网的建立也提供了精确的速率资料, 我国有人用来研究大陆地壳形变^[10, 11]. 使得更为准确地确定菲律宾海板块的欧拉参数成为可能. 本文将利用这些新资料, 使用全球反演的方法确定菲律宾海板

2000-08-21 收稿, 2000-11-20 收修改稿

* 国家“九五”攀登计划(95-专-05)和自然科学基金(批准号: 49874020)资助项目

** 现在美国西北大学地球科学系

块的欧拉矢量.

1 菲律宾海板块运动欧拉参数确定的方法

在 NUVEL-1 模型中, 因菲律宾海板块的观测资料不足, 特别是缺少运动速率资料, 所以没有确定它的欧拉参数, 只是借用了 Seno 等人^[12]的结果, 因此 NUVEL-1 实际只用 12 个板块进行反演, 得到 11 个板块相对太平洋板块的运动参数. 本文在 NUVEL-1 模型 12 个板块的基础上加上菲律宾海板块共 13 个板块进行全球反演.

设需研究的板块为 m 个, 固定其中一个, 则其余 $m-1$ 个板块相对于此板块运动的模型参数组成一个 $3m-3$ 维的模型向量 $M = (\theta_1, \dots, \theta_{m-1}, \phi_1, \dots, \phi_{m-1}, \omega_1, \dots, \omega_{m-1})$, $\theta_i, \phi_i, \omega_i$ 分别表示第 i 个板块欧拉矢量的欧拉极纬度、经度和欧拉矢量转速.

设有 N 个观测数据, 组成观测数据向量 d^0 ; 观测值 d_i^0 的标准误差为 σ_i , 相应的理论值为 $d_i(M)$. 设在以上 N 个观测数据中, 前 n 个是速率, 后 $N-n$ 个是方位角. 则总的拟合残差为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{d_i^0 - d_i(M)}{\sigma_i} \right]^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_i^0 - d_i(M)}{\sigma_i} \right]^2 + \sum_{i=n+1}^N \left[\frac{d_i^0 - d_i(M)}{\sigma_i} \right]^2. \quad (1)$$

对 $3m-3$ 个模型参量求偏导并令其为零, 并在方位数据的观测值与理论值之差不超过 20° 时, 将 $\sin[d_i^0 - d_i(M)]$ 以 $d_i^0 - d_i(M)$ 代替, 得到 $3m-3$ 个方程:

$$\sum_{i=1}^N \frac{d_i(M)}{\sigma_i^2} \frac{\partial d_i(M)}{\partial M_j} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^0}{\sigma_i^2} \frac{\partial d_i(M)}{\partial M_j}, \quad j=1, \dots, 3m-3. \quad (2)$$

然后构造一个足够好的近似模型 M^* , 使得 $M - M^*$ 足够小, 用 $\partial d_i(M^*) / \partial M_j$ 近似代替 (2) 式中的 $\partial d_i(M) / \partial M_j$, 再经过舍去二阶以上项, 经计算得到:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{3m-3} \frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\partial d_i}{\partial M_j} \frac{\partial d_i}{\partial M_k} (M_k - M_k^*) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\partial d_i}{\partial M_j} [d_i^0 - d_i(M^*)], \quad j=1, \dots, 3m-3. \quad (3)$$

(3) 式是模型 $M - M^*$ 的线形形式. 其矩阵形式为

$$A^T V^{-1} A \delta M = A^T V^{-1} \delta d^0, \quad (4)$$

其中

$$\delta M = M - M^*, \quad \delta d^0 = d^0 - d(M^*), \quad A_{ik} = \frac{\partial d_i}{\partial M_k}, \quad A_{ik}^T = A_{ki}, \quad V_{ik} = \sigma_i^2 \delta_{ik}. \quad (5)$$

只要有足够多的独立的观测数据, 可以得到一个唯一解:

$$\delta M = (A^T V^{-1} A)^{-1} A^T V^{-1} \delta d^0. \quad (6)$$

模型的新的估计量 $M = \delta M + M^*$, 利用迭代的方法把它作为新的 M^* 再次代入原方程组中, 直到得到使 χ^2 收敛的 M .

2 资料及处理

本文使用了 3 类资料:

- (1) NUVEL-1 模型的全部资料, 包括运动速率、转换断层走向及地震滑动矢量方向共 1122 个.
- (2) 菲律宾海板块周围地震滑动矢量. 为确保这些滑动矢量反映板间相对运动, 筛选原则是:

a) 震级要足够大, 在 CMT 中地震标量矩指数大于 24; b) 震中位于俯冲带上, 且位于 Benioff 带的上层; c) 深度在 15~60 km, 断层面解为逆掩地震, 且其倾角与俯冲带在该深度倾角相近。

在对 1977~1999 年之间的哈佛 CMT 资料选取中, 我们去掉了吕宋海槽-菲律宾海沟的资料。因为菲律宾群岛是一个复杂的变形带, 有巨大的近南北走向的左旋走滑断层穿过, 使两板块间的运动复杂; 同样也去掉了玛里亚纳海沟处的资料, 因为玛里亚纳的弧后有约 40 mm/a 的扩张, 改变了两板块之间的耦合情况。最后我们选定 Nankai 海槽-琉球海沟处的 32 个地震滑动矢量, 以及伊豆-小笠原海沟的 35 个地震滑动矢量, 其中包括 Seno 等人^[8]的 25 个。表 1 给出了这些地震滑动矢量。同时给出了利用反演计算出的该点的理论值。

(3) GPS 观测资料。使用了菲律宾海板块上的 4 个 GPS 台站相对于欧亚板块的运动速度观测资料。详见表 2, 其中关岛和帕劳两台站的数据没有用来反演。

表 1 本文所用菲律宾海板块周围地震滑动矢量数据^{a)}

PH-EU 边界(NanKai-琉球地区)											
编号	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*	9	10	
北纬/(°)	33.76	33.7	33.13	32.31	32.26	32.24	32.23	32.15	31.84	31.79	
东经/(°)	137.2	136.05	135.84	131.83	131.78	132.21	131.78	131.98	131.8	131.63	
观测值/(°)	-57	-54	-50	-48	-49	-54	-48	-48	-51.4	-53	
观测误差/(°)	10	10	10	15	10	15	10	15	20	20	
理论值/(°)	-44.6	-43.7	-44.5	-42.9	-42.9	-43.2	-43	-43.2	-43.5	-43.5	
11	12	13	14*	15	16	17	18	19	20	21	
31.79	31.73	31.29	31.14	30.59	30.59	29.78	29.77	29.48	29.28	29.26	
131.31	131.59	131.29	131.33	131.24	131.07	130.51	130.63	130.64	130.31	129.86	
-53.4	-41.2	-44.4	-61	-46.6	-59.8	-49.4	-41.7	-46.6	-44	-43.8	
15	20	15	10	20	15	20	20	20	20	20	
-43.3	-43.6	-44	-44.2	-44.9	-44.8	-45.5	-45.6	-46	-46	-45.8	
22	23	24	25	26	27*	28	29	30	31*	32	
29.24	29.2	28.51	27.99	27.52	27.48	27.42	26.61	24.88	24.3	24.24	
130.31	130.31	130	129.39	128.44	128.57	128.48	127.81	125.33	125.21	125.23	
-35	-45.8	-46.6	-41.1	-40	-48	-45.4	-51.4	-42.3	-43	-55.1	
20	20	20	20	20	15	20	20	20	10	20	
-46.1	-46.1	-46.8	-47	-47	-47.1	-47.1	-47.6	-47.9	-48.4	-48.5	
PA-PH 边界(伊豆-小笠原地区)											
编号	1*	2	3*	4	5	6*	7	8	9	10*	11
北纬/(°)	35.93	35.86	35.76	35.74	35.68	35.67	35.58	35.57	35.56	34.02	33.91
东经/(°)	140.08	141.35	140.7	141.08	140.65	140.64	140.61	140.65	140.54	141.63	141.35
观测值/(°)	-89	-64.6	-83	-75.5	-84.3	-80	-75.3	-68.6	-92.4	-86	-94.4
观测误差/(°)	15	20	15	20	20	15	20	20	20	10	20
理论值/(°)	-82.9	-80.9	-81.9	-81.3	-82	-82	-82	-82	-82.1	-80.1	-80.5
12*	13	14*	15	16	17	18	19*	20	21*	22	23
33.61	33.49	33.38	33.31	33.26	32.61	31.35	31.34	31.22	31.11	30.92	30.75
141.71	141.4	140.97	141.36	141.34	141.27	140.96	141.8	141.75	142.09	141.51	141.73
-78	-90.9	-80	-91.6	-75.6	-79.8	-82.3	-80	-89.2	-82	-93.8	-72
10	20	20	20	15	20	20	15	20	10	20	10
-79.8	-80.3	-81	-80.4	-80.4	-80.3	-80.6	-79.1	-79.2	-78.5	-79.5	-79.1
24*	25	26	27	28*	29	30	31	32	33*	34*	35*
30.71	30.69	30.63	30.61	29.34	29.31	29.3	28.97	28.12	27.84	27.72	23.71
141.82	141.62	141.63	141.62	142.23	141.98	142.02	142.05	142.41	142.76	142.08	143.2
-72	-86.3	-88.8	-90.2	-75	-90.4	-81.2	-87.5	-89.2	-78	-81	-70
15	15	20	20	10	20	20	20	20	15	15	10
-78.9	-79.2	-79.2	-79.2	-77.7	-78.2	-78.1	-77.9	-77	-76.2	-77.5	-73.4

a) 表中带*的数据来自 Seno 等人^[8]的地震滑动矢量数据

表 2 GPS 台站相对于欧亚板块(EU)的速度^{a)}

台站	北纬/(°)	东经/(°)	速率/mm · a ⁻¹		方向/(°)		备注
			观测值	理论值	观测值	理论值	
S063	22.67	121.47	68.60	71.51	315.4	312.02	①
S102	22.04	121.56	71.70	72.14	316.8	311.47	②
BTS3	20.44	121.96	80.70	73.58	298.6	310.05	②
Okin.	20.43	136.08	59.77	61.48	300.1	300.56	③
关岛	13.59	144.87	22.52	66.03	301.0	287.83	④
帕劳	7.34	134.48	100.42	80.22	277.9	294.45	④

a) 备注中①根据文献[13, 14]的数据由本文计算的结果; ②根据文献[13]的结果; ③根据文献[15]的结果; ④根据文献[16]的数据由本文计算的结果

3 结果

本文利用上节给出的数据, 根据全球模型反演得出了 13 个板块中其他 12 个板块相对于 PA 板块运动的欧拉矢量, 结果列于表 3 中, 并给出了 NUVEL-1 模型的结果以便比较. 同时在表 4 给出 EU-PH 和 PA-PH 的欧拉矢量. 图 1 显示了 PA-PH 和 EU-PH 欧拉极的位置, 其他研究者的结果也同时在图 1 中给出.

在以上的模型中, 只包括了 13 个较大的板块, 全球还有一些小的板块. 在菲律宾海板块周围就有一些小的板块, 它们均没有包括在上述 13 个板块的运动模型中. 对我们的研究来讲, 其中最重要的是开罗林板块(CR), 本文也讨论了 CR-PH 和 PA-CR 的欧拉矢量.

Weissel 和 Anderson^[7]根据海底地质资料指出, PA-CR 在 Sorol 海槽是拉伸(扩张)边界, 在马绍尔海沟是会聚边界, 这成为被广泛采用的 PA-CR 边界的约束条件. 我们利用全球反演直接得到了 PA-PH 欧拉矢量, 然后调整 CR-PH 欧拉矢量, 可以得到一系列满足 PA-CR 边界条件的 PA-CR 欧拉矢量. 计算结果表明 CR-PH 欧拉矢量转速超过 0.5°/ma 时不能得到满足 PA-CR 边条件的 PA-CR 欧拉矢量. 最终结果选取了一个使 Sorol 海槽扩张最明显的 PA-CR 欧拉矢量, 以及相应的 CR-PH 欧拉矢量. 表 4 是本文的 PA-PH, EU-PH, CR-PH 和 PA-CR 欧拉矢量的结果, 其中 PA-CR 欧拉矢量满足 CR-PA 边界条件. 同时还给出了 Seno 等人^[8]的结果.

图 1 不同研究者得到的 EU-PH 和 PA-PH 的欧拉极

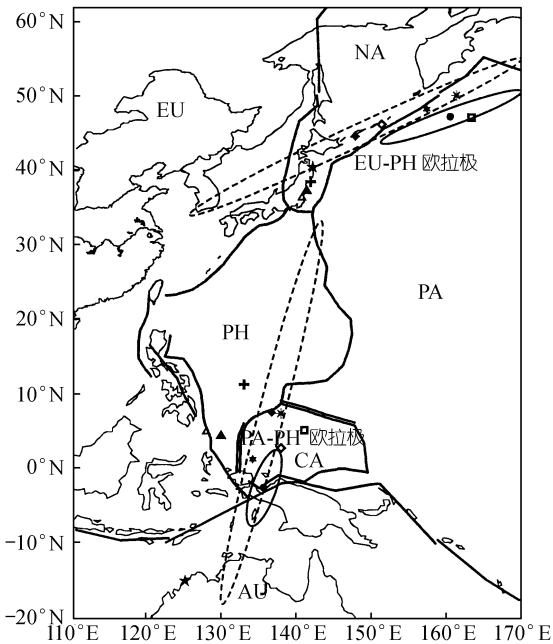


图 1 不同研究者得到的 EU-PH 和 PA-PH 的欧拉极
实线椭圆为本文全球反演所得欧拉极的 95%置信度的误差椭圆, 虚线椭圆为文献[8]最佳拟合欧拉极的 68%置信度的误差椭圆. ●为本文结果, ★为 Chase^[2], □为 Minster&Jordan^[3], ▲为 Karig^[4], ▲为 Ranken 等人^[5], ✦为 Huchon^[6], ◇为 Seno^[11], ◆为 Seno 等人^[8]的最佳拟合欧拉极; ✱为 Seno 等人^[8], ✱为本文只用地震滑动矢量的计算结果. 板块缩写: EU 为欧亚板块, PH 为菲律宾海板块, PA 为太平洋板块, NA 为北美板块, CR 为开罗林板块, AU 为澳大利亚板块

表 3 全球反演所得 12 个板块相对与太平洋板块运动的欧拉矢量及与 NUVEL-1 模型的比较

序号	板块名称	欧拉极纬度(N)/(°)		欧拉极经度(E)/(°)		欧拉矢量转速/(°) · ma ⁻¹	
		本文	NUVEL-1	本文	NUVEL-1	本文	NUVEL-1
01	N. America	48.88	48.71	-78.07	-78.17	0.781	0.783
02	Cocos	36.90	36.82	-108.55	-108.63	2.085	2.089
03	Nazca	55.65	55.58	-89.82	-90.10	1.422	1.422
04	Antarctica	64.41	64.32	-83.33	-83.98	0.910	0.909
05	S. America	55.37	55.00	-85.25	-85.75	0.668	0.666
06	Eurasia	61.22	61.07	-85.78	-85.82	0.897	0.899
07	Africa	59.24	59.16	-72.74	-73.17	0.971	0.970
08	Caribbean	55.24	54.19	-80.99	-80.80	0.860	0.853
09	Australia	59.95	60.08	1.91	1.74	1.127	1.123
10	Arabia	59.60	59.66	-33.21	-33.19	1.164	1.162
11	India	60.43	60.49	-30.46	-30.40	1.157	1.154
12*	Philippine	2.65	-1.24	-44.35	-45.81	0.951	1.000

* NUVEL-1 模型中菲律宾海板块的欧拉矢量采自文献[12], 此处给出的采自文献[8]

表 4 所得部分欧拉矢量结果及与 Seno 等人^[8]的比较

板块对	欧拉极纬度(N)/(°)		欧拉极经度(E)/(°)		欧拉矢量转速/(°) · ma ⁻¹	
	本文	文献[8]	本文	文献[8]	本文	文献[8]
PA-PH	-2.65	1.24	135.65	134.19	0.951	1.000
EU-PH	47.16	48.23	160.19	156.97	1.012	1.085
CR-PH	5.40	6.24	134.60	134.09	0.500	0.700
PA-CR	-11.39	-10.13	136.77	134.43	0.461	0.309

4 讨论和推论

下面对上节得到的结果进行讨论并作一些相应的推论.

4.1 反演结果与观测结果的比较

下面将讨论得到的菲律宾海板块的欧拉参数和观测结果的一致性. Seno 等人^[8]得到的菲律宾海板块的欧拉矢量被认为是目前最好的结果, 并被广泛采用, 所以在下面同时也将 Seno 等人^[8]的结果与观测结果进行比较.

首先我们比较滑动方向. 图 2 给出地震滑动矢量方向的观测值和理论值, 以及 Seno 等人^[8]的结果给出的理论值. 由图 2 可以看出本文的结果在误差范围内较好的符合观测资料, 且可以看出符合情况优于 Seno 等人^[8]的结果, 特别是在 PA-PH 边界. 这是由于 Seno 等人^[8]为满足 PA-CR 边界条件, 将 PA-PH 的欧拉极在其 68% 置信度的误差椭圆内进行调整而使符合程度降低的结果.

图 2(a)中, 位于右下角的 3 个观测值偏离本文理论值较远. 此 3 个数据中, 纬度最小的是本文所选来自哈佛 CMT 的地震滑动矢量, 经纬度为(30.59°N, 131.07°E), 深度为 33 km, 断层走向 208°, 倾角为 25°, 滑错角为 88°, 无法排除不用. 其余两个地震是 Seno 等人^[8]所选用, 纬度最大的位置为(33.76°N, 137.20°E), 该地震深度为 21 km, 断层走向为 267.5°, 与此处的海沟走向相差较大; 另一个位置为(31.14°N, 131.33°E), 该地震深度为 8 km, 深度太浅而可能不足以代表板间运动. 若去除此两个地震, 则在图 2(a)中, 本文理论值与观测值的符合程度更好.

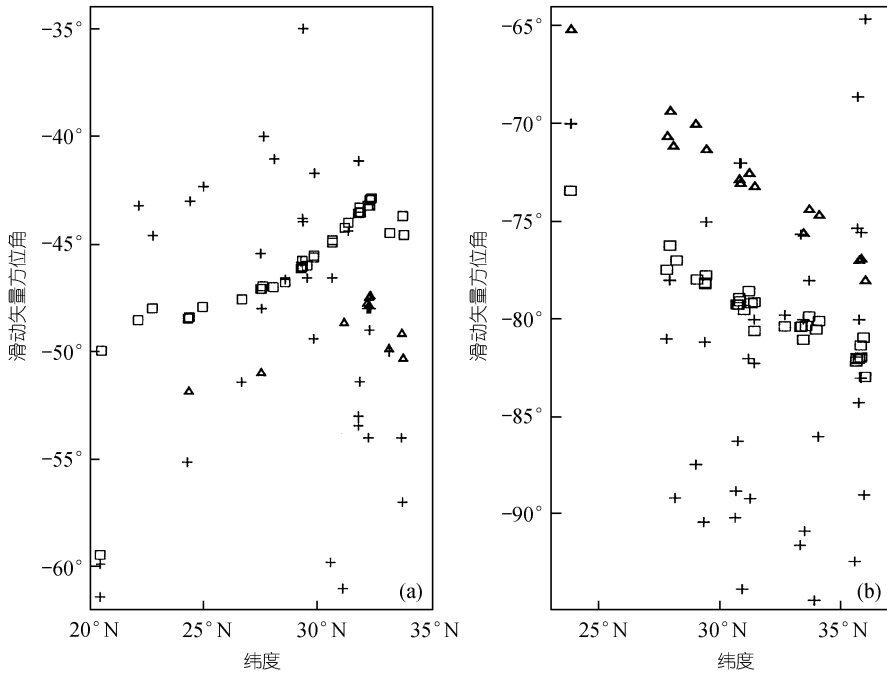


图 2 地震滑动矢量方向的理论结果和观测结果的对比

(a) PH-EU 边界的 NanKai 海槽和琉球海沟; (b) PA-PH 边界的伊豆-小笠原海沟. + 为观测值, □ 为理论值, △ 为 Seno 等人^[8]的结果

再看理论结果与 GPS 观测结果的比较. GPS 的结果在图 3 中用带箭头的实线或虚线段给出, 可以看出在所用的 4 个 GPS 台站中, 除 BTS3 的方向偏差略大之外(台站 BTS3 位于台湾和吕宋之间的左旋走滑变形带附近^[17], 可能存在轻微的变形), 理论值与观测值得到很好地符合, 尤其是冲鸟岛站, 实际观测值为速率 59.77 mm/a, 方位角 300.1°, 根据本文得到的理论值为速率 61.48 mm/a, 方位角为 300.56°(参见图 3 及表 2), 符合程度非常好, 而 Seno 等人^[8]的结果却有一定差异^[16]. 由图 1 的误差椭圆可以看出, 本文结果的欧拉极位置比 Seno 等人^[8]的结果要精确, 所以本文结果为 NUVEL-1 模型提供了一个在统一框架下含有 13 个板块的修正模型.

4.2 菲律宾海板块内部及边界形变

图 3 给出了本文得到的理论结果和实际观测结果的对比. 从图上可以看出在观测误差内, 琉球海沟-Nankai 海槽以及伊豆-小笠原海沟观测结果和理论结果一致性较好. 在 GPS 台站 S063, S102, 冲鸟岛观测结果和理论结果一致性也很好, 表明它们具有整体一致的运动性质. 在菲律宾海沟, 玛里亚纳海槽以及 Yap-帕劳海沟观测结果和理论结果有较大差异, 这也就是这些边界的地震滑动矢量不被用来反演板块欧拉极的原因.

GPS 台站关岛位于玛里亚纳海沟和玛里亚纳海槽之间, 从图 3 上可以看出它相对欧亚板块运动的理论值和观测值无论从速率和方向都有较大差异, 速率差矢量大小略大于 40 mm/a, 方向大致为 E-W 方向, 这与 Hussong 和 Uyeda^[18]给出的玛里亚纳海槽的扩张速率相当一致. 此差异很可能就是玛里亚纳海槽扩张引起的, 反应了这一带板内主要形变.

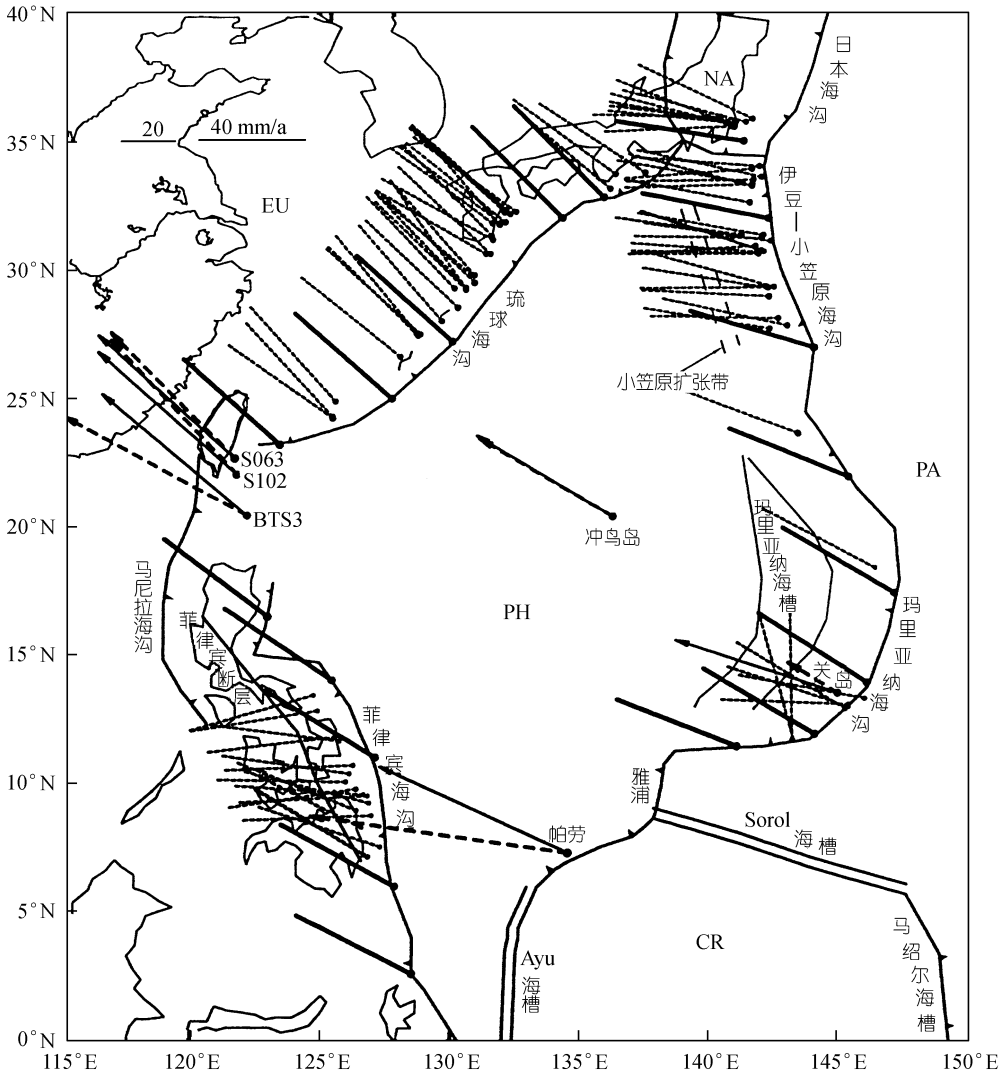


图 3 资料的观测值和理论值对比图

实心点为数据位置, 虚线段为 PH 相对于 EU, PA 相对于 PH 滑动矢量的方向. 板块边界上的实粗线为相对运动方向的理论值. 带箭头的线段为 GPS 站点相对于 EU 板块的速度矢量, 实线为理论值, 虚线为观测值. 左上角的标尺为速度矢量的标度

GPS 站点帕劳的观测值和理论值也存在着较大差异, 这可能是帕劳紧靠年轻的俯冲边界, 俯冲比较强烈, 使实测结果与板块的整体运动产生了较大差异.

在菲律宾海沟观测结果和理论结果的差异也表现得很明显, 推测这是由于菲律宾群岛中的左旋菲律宾断层的运动以及菲律宾海板块与菲律宾群岛的解耦作用有关^[1], 或者是与南中国海次板块的作用以及菲律宾群岛属于板间变形带的性质有关^[17]. 从 Nankai 海槽、琉球海沟处数据的观测值和理论值符合较好, 推测琉球海沟处冲绳海槽的拉伸还不很明显.

致谢 衷心感谢东京大学地震研究所的 T. Kato 博士和台湾地球科学研究所 Shui-Beih Yu

博士慷慨提供了他们最新的文章和 GPS 资料,使本文得以完成.

参 考 文 献

- 1 Seno T. The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea Plate relative to the Eurasia plate. *Tectonophysics*, 1977, 42: 209~226
- 2 Chase C G. Plate kinematics: The Americas, East Africa, and the rest of the world. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 37: 355~368
- 3 Minster J B, Jordan T H. Rotation vectors for the Philippine and Rivera plates. *Eos Trans AGU*, 1978, 60: 958
- 4 Karig D E. Basin genesis in the Philippine Sea. *Initial Rep Deep Sea Drill Proj*, 1975, 31: 857~879
- 5 Ranken B, Cardwell R K, Karig D E. Kinematics of the Philippine Sea plate. *Tectonics*, 1984, 3: 555~575
- 6 Huchon P. Comments on "Kinematics of the Philippine Sea plate" by B Ranken, R K Cardwell and D E Karig. *Tectonics*, 1986, 5: 165~168
- 7 Weissel J K, Anderson R N. Is there Caroline plate?. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 41: 143~158
- 8 Seno T, Seth S, Alice E G. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and Geological Data. *J Geophys Res*, 1993, 98: B10, 17941~17948
- 9 DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current plate motions. *Geophys J Intel*, 1990, 101: 425~478
- 10 Zhu W Y, Cheng Z Y, Xiong Y Q, et al. Preliminary results of measuring the crustal deformation in Qinghai-Xizang area using GPS technique. *Science in China, Series D*, 1998, 41(3): 314~318
- 11 Zhu W Y, Wang X Y, Cheng Z Y, et al. Crustal motion of Chinese mainland monitored by GPS. *Science in China, Series, D*, 2000, 43(4): 394~400
- 12 Seno T, Moriyama T, Stein S, et al. Redetermination of the Philippine Sea plate motion (abstract). *EOS Trans Am Geophysics Res*, 1987, 68: 1474
- 13 Yu S B, Kuo L C. GPS observation of crustal deformation in the Taiwan-Luzon region. *Geophysical Res Lett*, 1999, 26(7): 923~926
- 14 Yu S B, Chen H Y, Kuo L C. Velocity field of GPS station in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 1997, 274: 41~59
- 15 Kato T, Kotake Y, Chachin T, et al. An estimate of the Philippine Sea plate motion derived from the Global Positioning System observation at Okino Torishima, Japan. *J Geod Soc Japan*, 1996, 42: 233~243
- 16 Kato T, Kotake Y, Nakao S, et al. Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area. *Geophysical Res Lett*, 1998, 25(3): 369~372
- 17 臧绍先, 陈奇志, 黄金水. 台湾南部-菲律宾地区的地震分布、应力状态及板块的相互作用. *地震地质*, 1994, 16: 29~37
- 18 Hussong D M, Uyeda S. Tectonic processes and the history of the Mariana Arc: A synthesis of the results of deep sea drilling project Leg 60. *Initial Rep Deep Sea Drill Proj*, 1981, 60: 909~929