

# 现代板块运动的测量和研究： 空间大地测量方法

孙付平

赵铭

(郑州测绘学院大地测量系 郑州 450052) (中国科学院上海天文台 上海 200030)

## 摘 要

简要阐述了用空间大地测量方法测量和研究现代板块运动的理论、方法和进展。简单介绍了测定原理和实测现状，以及用实测资料建立板块运动模型的理论和方法；重点讨论了板块运动在最近十几年的研究进展；对目前存在的问题及未来的发展作了简要评述。

**关键词** 板块运动 — 大地测量

## 1 引 言

空间大地测量技术是本世纪 70 年代发展起来的新技术，它主要包括 VLBI、SLR、LLR 和 GPS 等。这些技术能够以极高的精度确定地面点的位置和两点之间的基线长度。发展至今，点位确定精度已达亚厘米级；对于几千公里的基线，测量精度也已达亚厘米级。90 年代的目标是毫米级精度。可见，对于正在发生的每年几个厘米量级的板块运动，用空间大地测量技术完全可以精确测定。未来板块运动研究的主要进展将来自空间大地测量技术的贡献。

自 1979 年开始并由美国宇航局组织实施的地壳动力学计划 (CDP)，至今在全球范围内已测定了约 300 条基线的长度变化率。如果基线两端测站位于不同板块的刚性部分，则基线长度变化率就反映了板块间的运动；如果基线两端测站位于同一板块上，则基线长度变化率就反映了板块内部及边界的形变。空间大地测量实测结果的获得，大大改进了人类对地球表面动力学和运动学特征的认识，进一步验证了板块构造学说。几年或几十年内实测的平均板块运动与几百万年内由地学资料导出的平均板块运动的相互比较研究，为解决现代板块运动研究中的许多基本问题提供了可能，具有十分重要的意义。

1994 年 4 月 25 日收到

国家科委攀登计划课题

## 2 空间大地测量技术对板块运动的监测

### 2.1 基长基线干涉测量 (VLBI) 技术

VLBI 技术通过测量河外射电源到达两个测站的时间延迟和延迟率来求解两测站间的基线矢量。不同测量时段得到的同一基线的各基线矢量，投影到一个先验基本参考架中，可得到该基线沿长度、横向和垂向的三个基线变化率分量<sup>[1,2]</sup>。显然，基线变化的横向分量受到由 EOP 序列定义的地球参考架定向的较强影响，而长度分量与定向无关。因受大气的影响，确定基线变化垂向分量的精度最差。

为了更直观地分析各测站的运动，VLBI 数据分析中心还提供各台站的地心坐标速度和站心坐标速度。通常是先给定某个测站（如 Westford 站）一个初始站速度（常用绝对板块运动模型 AMO-2 或 NNR-NUVEL1 估计值），进而由各时段基线矢量解算出各站的地心和站心坐标速度。当然，也可由基线变化率各分量导出站速度<sup>[3]</sup>。

目前全球共有 80 多个 VLBI 站，但观测历史较长，能解算站速度的测站仅有 50 多个，它们在全球各主要板块上的分布见图 1。VLBI 板块运动数据由全球各 VLBI 数据分析中心完成。目前最权威的分析中心是美国宇航局 (NASA) 所属的哥达德航空飞行中心 (GSFC)，它每年提供一套最新 VLBI 数据处理结果。最近的 VLBI 板块运动结果是对 1979 年 6 月至 1991 年约 12 年间获得的 VLBI 数据处理后，得到 54 个测站的站速度和 175 条基线矢量沿各方向的变化率，精度大都在  $5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  以内<sup>[2]</sup>。

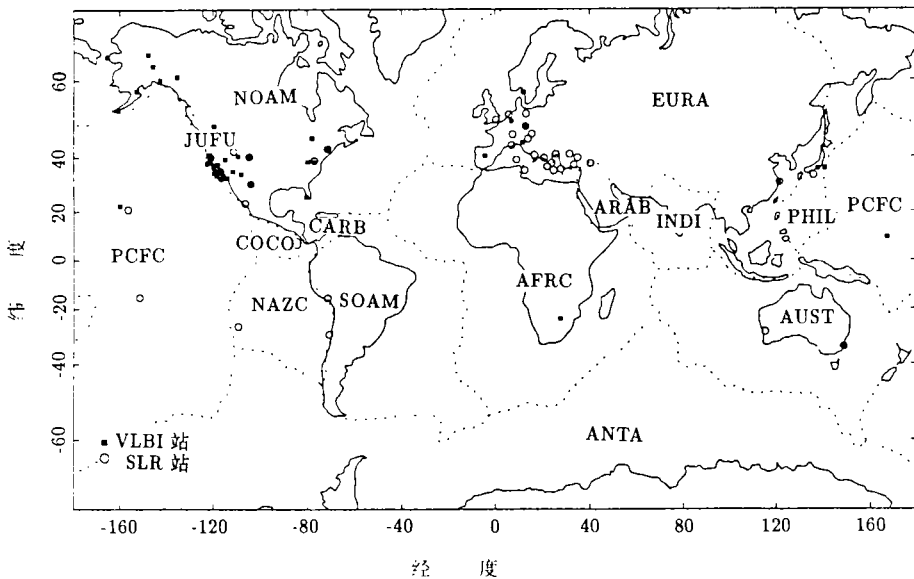


图 1 具有实测站速度的 VLBI 和 SLR 站的全球分布

### 2.2 激光测卫 (SLR) 技术

SLR 技术通过测定卫星至地面测站的距离和精密卫星定轨来反解地面站地心位置矢

量。不同时段内同一测站的各位置矢量投影到同一个参考架内, 通过给定 1—2 个或多个测站速度以某种约束, 例如给定某站初始站速度和另一站的纬向站速度 (常用绝对板块运动模型 AMO-2<sup>[4]</sup> 或 NNR-NUVEL1<sup>[5]</sup> 的估计值), 即可解算出所有 SLR 站的站速度。或者把同一时段内两个 SLR 站的位置矢量反算为站间大地线距离, 不同时段站间大地线距离的拟合即得出距离变化率<sup>[6]</sup>。

目前全球共有近百个 SLR 站, 其中 40 多个观测历史较长, 已可解出其站速度, 它们在全球各主要板块上的分布见图 1。SLR 板块运动数据处理由全球各 SLR 数据分析中心完成。目前最权威的分析中心是美国德克萨斯大学空间研究中心 (CSR), 它每年提供一套 SLR 站速度结果。SLR 站速度和站间基线变化率的精度也大多在  $5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  之内<sup>[6,7]</sup>。

### 2.3 全球定位系统 (GPS)

GPS 技术通过载波相位测量测定站间的基线矢量。同 VLBI 一样, 不同时段内各基线矢量的组合处理可得到 GPS 站的站速度和基线变化率。因高精度 GPS 观测 90 年代初才获得成功, 观测时间尚短, 目前还未得到全球各板块上测站间的基线变化率。但对一些局部地区 (地震活动区域) 的连续观测, 已能以较高精度测定站间基线变率, 加之具有机动性好价格便宜等优点, 必将在全球板块运动的测量和研究中发挥巨大作用。

### 2.4 其他技术

从原理上讲, 激光测月 (LLR) 类似于 SLR 技术, 也可用于测量板块运动。但因其台站很少且精度较低, 所以贡献不大。目前, 一些学者正在研究通过脉冲星观测来检测板块运动的可能性。这种方法在原理上是可行的, 但还未得到实测证明, 有关学者正致力于这方面的研究。

## 3 现时板块运动模型的建立和发展

### 3.1 板块运动模型的建立

在用空间大地测量数据建立板块运动模型时, 我们仍假设地球是绕其自转轴旋转的刚体, 其表面被一组刚性板块所覆盖, 这组板块的特征是一样的, 但它们相互运动。我们的任务是用空间大地测量数据求定板块运动参数。

因为板块运动的量级相对地球半径来说很小, 为研究的方便, 地球常被近似为球体。这种近似引起的误差极小, 完全可以忽略不计。

实测的板块运动数据主要有两类, 一是站速度; 二是站间基线变化率。其中站间基线变化率又可分为球基线 (弧长或大地线) 变化率和基线矢量变化率 (主要采用长度和横向分量)。下面分别介绍由这些数据求解板块欧拉矢量的原理。

#### (1) 由站速度求解板块运动欧拉矢量

设  $v_i^a, v_i^e$  是  $k$  板块上第  $i$  站的北向和东向站速度;  $\phi_i, \lambda_i$  为第  $i$  站的经纬度;  $R$  为地球平均半径;  $\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k$  为  $k$  板块的欧拉矢量  $\vec{\Omega}_k$  在地心参考架中的三个分量; 则由

下式即可求解  $k$  板块的“绝对”欧拉矢量  $\vec{\Omega}_k$

$$\begin{bmatrix} v_i^n \\ v_i^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\sin\lambda_i & -R\cos\lambda_i & 0 \\ -R\sin\phi_i\cos\lambda_i & -R\sin\phi_i\sin\lambda_i & R\cos\phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^k \\ \omega_y^k \\ \omega_z^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里所谓的“绝对”欧拉矢量，是相对站速度所基于的运动学参考架而言的，并不是物理意义上的绝对欧拉矢量。由 (1) 式可见，一个板块上至少应有 2 个测站，才能解出其“绝对”欧拉矢量。测站越多，分布越合理，求得的欧拉矢量越准确。

为研究板块间的相对运动并便于与地学模型比较，通过矢量加减可把“绝对”欧拉矢量换算为相对欧拉矢量。各板块对的相对欧拉矢量组合起来就构成了板块运动模型。当然，也可用扩展的 (1) 式同时求出各板块对的相对欧拉矢量。

(2) 由站间球基线变化率求解板块相对运动欧拉矢量

设  $P_i(\phi_i, \lambda_i)$  为  $k$  板块上测站， $P_j(\phi_j, \lambda_j)$  为  $l$  板块上测站，其相对运动欧拉矢量为  $\vec{\Omega}_{kl}(\Phi, \Lambda, \omega)$ ，则图 2 给出了在时间段  $\Delta t$  内弧长变化  $\Delta S_{ij}$  与  $\vec{\Omega}_{kl}$  的关系式：

$$\Delta S_{ij} \approx R\omega\Delta t\sin\alpha\sin\sigma$$

其中， $\sigma$  是旋转极  $\vec{\Omega}_{kl}$  到  $P_j$  点的弧长， $\alpha$  是  $P_j$  至  $P_i$  弧段与  $P_j$  至极点弧段的夹角。或者表示为：

$$S_{ij} = \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t} = \frac{\omega R}{\sin S_{ij}} [\sin\Phi\cos\phi_i\cos\phi_j\sin(\lambda_j - \lambda_i) + \cos\Phi\cos\phi_i\sin\phi_j\sin(\lambda_j - \Lambda) - \cos\Phi\sin\phi_i\cos\phi_j\sin(\lambda_j - \Lambda)] \quad (2)$$

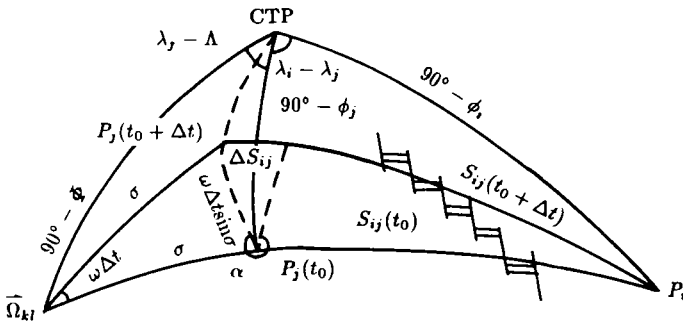


图 2 板块运动与弧长变化

已知两板块各站间球基线变化率，不难由 (2) 式导出板块运动欧拉矢量  $\vec{\Omega}_{kl}$ 。

(3) 由基线矢量变化率求解板块欧拉矢量

设  $B_{ij}$  和  $T_{ij}$  分别为  $k$  板块上  $i$  站到  $l$  板块上  $j$  站间的基线长度变化率和横向变化率, 则其相对欧拉矢量  $\vec{\Omega}_{kl}$  可由下式导出:

$$\begin{aligned} B_{ij} &= \frac{(n \times r_i)}{|r_j - r_i|} \cdot \vec{\Omega}_{kl} \\ T_{ij} &= (\vec{\Omega}_{kl} \times r_j + \vec{\Omega}_k \times (r_j - r_i)) \cdot t_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $r_i, r_j$  为  $i$  站和  $j$  站的地心位置矢量:  $t_{ij} = (r_j \times r_i) / |r_j \times r_i|$  为沿横向的单位矢量。

可见  $T_{ij}$  与运动学参考架有关, 而  $B_{ij}$  与之无关。由上式可解出一个板块的“绝对”和其他板块对的相对欧拉矢量。

### 3.2 板块运动模型的发展

早在 80 年代初, 人们就开始了用实测板块运动观测量求解板块运动参数的研究工作。Drewes<sup>[10]</sup> 导出了一套由站坐标漂移和弧长变化求解板块运动参数的数学模型。80 年代中期, Drewes<sup>[11]</sup> 曾利用当时有限的实测资料估计了北美与澳大利亚板块的相对运动参数。但限于当时观测台站尚少, 观测时间太短, 未能得到可靠的结果。直到 80 年代末, 较长时间的观测积累才得到了可靠的板块运动观测资料。Watkins 等人<sup>[12]</sup>, Reigber 等人<sup>[13]</sup>, Dietrich 等人<sup>[14]</sup>, Smith 等人<sup>[6]</sup>, 朱文耀等人<sup>[15]</sup>, Gegout 等人<sup>[16]</sup>, Reigber 等人<sup>[17]</sup>, Caprett 等人<sup>[1]</sup>, Ma 等人<sup>[2]</sup> 分别发表了用 SLR 和 VLBI 实测板块运动的结果。Drewes<sup>[18]</sup> 分别用 VLBI 和 SLR 解算的站坐标漂移和基线变化率, 解算了北美、欧亚、太平洋和澳大利亚板块的绝对欧拉矢量。与地学模型 AMO-2 的比较说明, 他的结果已接近地学模型, 但仍有较大差距。Argus 和 Gordon<sup>[19]</sup> 利用 1984—1987 年观测得到的太平洋和北美板块内部各站间的基线长度和横向变化率, 得到了精度较高的运动参数, 同时, Ward<sup>[3]</sup> 利用更多的 VLBI 基线矢量变化率详细分析了太平洋与北美板块边界的形变情况, 并得出了与 Argus 和 Gordon 基本一致的太平洋与北美相对运动参数。他们的结果已很接近于地学模型 NUVEL-1<sup>[20]</sup> 的给出值。随后, Ward<sup>[21]</sup>, 毛爱林和钱志翰<sup>[22]</sup>, 孙付平和赵铭<sup>[23]</sup> 利用最新的 VLBI 资料导出了包括北美、欧亚和太平洋三个板块的运动模型, 其中太平洋与北美的相对运动参数与地学资料估计值 (NUVEL-1) 非常一致, 但欧亚与北美的相对运动参数与 NUVEL-1 模型差得较大。孙付平和赵铭<sup>[24]</sup> 还采用由近 12 年的 SLR 资料导出的 41 个 SLR 站的站速度, 解算了北美、欧亚、太平洋、澳大利亚和南美五个板块间的相对运动欧拉矢量, 所得结果很接近于地学板块模型 NUVEL-1。由于大多数台站都位于北美、欧亚和太平洋三个板块上, 澳大利亚和南美只有很少的台站, 所以有关这两个板块的估计结果还不够可靠。欧亚板块上台站大都位于西欧地区, 这是导致欧亚与北美相对运动参数估计误差较大的主要原因。为加强对估计参数的约束, 孙付平和赵铭<sup>[25]</sup> 组合应用 VLBI 和 SLR 站速度, 重新解算上述 5 个板块间的相对运动欧拉矢量 (见表 1)。观测量的增加明显改善了对欧拉极的约束, 除南美板块外, 其余 4 个板块之间的相对运动已非常接近于地学模型 NUVEL-1。表 1 列出了最近几年用 VLBI 和 SLR 资料建立的一些主要板块运动模型。

表 1 实测板块运动模型及其与地学模型比较

板 块 对	运 动 模 型	欧 拉 矢 量			误 差 椭 圆			
		$\phi$ °N	$\lambda$ °E	$\omega$ deg./m.y.	$\sigma_{\max}$ deg.	$\sigma_{\min}$ deg.	$S_{\max}$ deg.	$\sigma_{\omega}$ deg./m.y.
EUROPE	RM2	65.8	132.5	0.231	6.4	1.4	166	0.015
	NUVEL-1	62.4	135.8	0.223	4.1	1.3	169	0.010
	VM4	51.5	132.4	0.176				0.014
	VPM1	67.5	114.3	0.223	9.5	3.1	20	0.017
	VPMM1	67.6	114.8	0.226	14.6	3.4	103	0.023
	SPMM1	56.8	136.5	0.196	11.4	9.7	144	0.017
NOAM	SGPMM1	66.4	125.8	0.215	11.2	4.0	105	0.015
NOAM	RM2	48.8	-73.9	0.852	1.3	1.1	109	0.025
	NUVEL-1	48.7	-78.2	0.783	1.3	1.2	119	0.010
	AG1	47.5	-79.9	0.806				
	VM2	49.0	-75.2	0.729				0.035
	VM4	49.6	-79.1	0.774				0.024
	VPM1	50.0	-79.8	0.749	1.0	0.2	6	0.013
	VPMM1	49.7	-79.7	0.784	1.4	0.5	91	0.015
	SPMM1	50.1	-91.1	0.885	10.8	0.7	93	0.071
PCFC	SGPMM1	50.1	-80.3	0.790	2.0	0.7	90	0.019
PCFC	RM2	-60.6	101.1	0.977	1.5	1.0	102	0.027
	NUVEL-1	-61.1	94.2	0.899	1.3	1.1	90	0.020
	VPM1	-62.9	97.2	0.877	2.4	0.4	13	0.025
	VPMM1	-62.3	97.3	0.911	3.3	0.5	77	0.025
	SPMM1	-59.2	79.8	0.981	11.7	0.7	79	0.075
EUROPE	SGPMM1	-61.8	94.7	0.912	3.2	0.6	100	0.022
AUST	RM2	34.1	66.7	0.794				
	NUVEL-1	29.1	49.0	0.793	1.6	1.0	127	0.010
	SPMM1	39.8	27.0	0.770	2.4	0.6	122	0.010
NOAM	SGPMM1	28.7	50.0	0.737	11.4	1.2	123	0.016
AUST	RM2	19.7	38.5	0.698	2.7	0.9	115	0.024
	NUVEL-1	15.1	40.5	0.719	2.1	1.1	135	0.010
	SPMM1	27.3	17.9	0.716	1.3	0.1	172	0.030
EUROPE	SGPMM1	14.0	42.3	0.650	12.0	1.4	122	0.027
AUST	RM2	60.7	-5.8	1.246	0.9	0.8	98	0.023
	NUVEL-1	60.1	1.7	1.124	1.0	0.9	122	0.020
	SPMM1	63.0	-30.0	1.314	9.8	0.3	111	0.010
PCFC	SGPMM1	62.4	-0.5	1.048	12.0	1.3	86	0.084
AUST	RM2	38.7	33.5	0.829				
	NUVEL-1	32.8	36.8	0.790	1.3	1.2	18	0.010
	SPMM1	32.7	16.9	0.754	5.7	0.4	104	0.011
SOAM	SGPMM1	22.3	40.0	0.701	12.2	3.2	115	0.030

(续表)

板块对	运动模型	欧拉矢量			误差椭圆			
		$\phi$ °N	$\lambda$ °E	$\omega$ deg./m.y.	$\sigma_{\max}$ deg.	$\sigma_{\min}$ deg.	$\zeta_{\max}$ deg.	$\sigma_{\omega}$ deg./m.y.
SOAM	RM2	-25.6	126.2	0.167	7.2	5.5	166	0.029
-	NUVEL-1	-16.3	121.9	0.153	5.9	3.7	171	0.010
-	SPMM1	35.8	133.2	0.143	17.5	6.2	50	0.050
NOAM	SGPMM1	38.1	136.1	0.143	16.1	3.2	62	0.053
SOAM	RM2	-78.4	116.0	0.288				
-	NUVEL-1	-77.6	93.7	0.247	4.8	1.4	114	0.020
-	SPMM1	-82.3	96.3	0.081	135.6	37.9	80	0.030
EURA	SGPMM1	-73.8	165.1	0.114	90.3	7.6	101	0.025
SOAM	RM2	53.3	-80.9	0.709				
-	NUVEL-1	55.0	-85.8	0.666	1.8	1.6	116	0.010
-	SPMM1	57.2	-100.6	0.908	12.0	4.0	85	0.075
PCFC	SGPMM1	58.8	-89.4	0.812	4.9	2.1	143	0.021

注: AG1—Argus and Gordon(1990), VM2—Ward(1990), VM4—Ward(1992), VPM1—Mao and Qian(1992), VPMM1—Sun and Zhao(1993), SPMM1—孙付平和赵 铭 (1994), SGPMM1—Sun and Zhao(1994)

## 4 板块运动的测量与研究进展

### 4.1 观测的增加与观测精度的提高

对板块运动的观测精度不仅取决于观测技术的精度,也取决于观测的连续积累。要检测  $1\text{cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  的板块运动,测量基线变化率的精度应在  $3\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  以内。以 VLBI 基线为例,其变化率估计误差 ( $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) 为

$$m = \frac{\mu}{T} \sqrt{\frac{12(n-1)}{n(n+1)}} \approx \frac{\mu}{T} \sqrt{\frac{12}{n}} \quad (4)$$

其中,  $T$  是观测时间(年),  $\mu$  是基线分量一次观测误差(mm),  $n$  是观测次数,可见,只有当观测技术达到一定精度,并且具有相当长(3年以上)的时间跨度和相当多的观测次数之后,才能得到可靠的板块运动观测结果。

最近十几年,板块运动的测量取得了巨大进展。70年代末至80年代初观测技术从分米级到厘米级的改进,使实测板块运动成为可能。从80年代中期到80年代末4年以上的观测积累,人们已能从观测资料中分离出可靠的板块运动信息<sup>[6-17]</sup>。发展至今,已测定了全球范围内约300条基线的变化率和90多个VLBI和SLR观测站的站速度,其中绝大部分精度在  $5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  以内。在目前亚厘米级观测精度水平上,板块运动的测量将主要取决于观测的积累。

## 4.2 实测板块运动与地学资料估计值的比较

地学资料估计的是最近几百万年内平均的板块运动, 而空间大地测量实测的是瞬时板块运动, 两者的比较将为板块构造学中一些重要问题(例如板块运动的稳定性, 板块的刚性等)的解决提供帮助。为保证实测板块运动的可靠性, 比较时必须剔除那些受局部形变影响的基线。Smith 等人<sup>[6]</sup>采用 1978—1988 年(约 10 年)的 SLR 资料解算了位于 7 个主要板块上的 22 个激光跟踪站间约 177 条基线的弧长变化率, 并选择其中位于 5 个板块内部稳定地区的 12 个站之间 54 个球基线变化率, 与地学板块运动模型 RM2<sup>[4]</sup>和 NUVEL-1<sup>[20]</sup>的估计值进行了比较。得到的相关系数分别是 0.990(RM2)和 0.989(NUVEL-1), 得到的回归斜率分别是  $0.914 \pm 0.017$  (RM2) 和  $0.949 \pm 0.019$  (NUVEL-1)。最近, 我们从美国宇航局哥达德航空飞行中心提供的 GLB754 基线解中, 选择了 20 条两端位于板块内稳定的 VLBI 基线与 RM2 和 NUVEL-1 作了比较, 得到的相关系数分别为 0.984(RM2)和 0.984(NUVEL-1), 斜率分别为  $0.858 \pm 0.015$  (RM2) 和  $0.946 \pm 0.014$  (NUVEL-1); 而组合 86 条 VLBI 和 SLR 基线的比较结果为: 相关系数分别为 0.916(RM2)和 0.917(NUVEL-1), 斜率分别为  $0.877 \pm 0.010$  (RM2) 和  $0.938 \pm 0.010$  (NUVEL-1)。Gordon<sup>[26]</sup>采用全球范围内更多(149 条)VLBI 和 SLR 基线与 NUVEL-1 估计值的比较结果为: 相关系数 0.994, 斜率  $0.94 \pm 0.01$ 。由以上的比较结果可见, 实测的基线变化率与地学资料估计值有着极强的正相关性, 说明实测基线变化率完全代表了正在发生的板块运动, 在最近 3 百万年内板块运动基本上是稳定的。但结果也反映出实测结果比地学估计值(NUVEL-1)总体上慢约 6%, 并且证明新模型 NUVEL-1 比 RM2 更符合实际的板块运动。

实测结果与 NUVEL-1 估计值之间的系统差可能有以下三方面的原因: (1) 在最近 3 百万年内板块运动发生了变化, 即板块运动存在加速度; (2) 建立地学模型时所采用的地磁倒转尺度有误差; (3) 基线的非均匀全球分布。Hilgen<sup>[27]</sup>建立的新时间尺度指出, 用于建立 NUVEL-1 模型的时间尺度使得估计的 NUVEL-1 速度快了约 4.5%。去掉这 4.5% 的系统差后, 实测结果与地学资料估计值之间只剩下极小的(1.5%)的系统差, 据此 Gordon<sup>[26]</sup>认为, 在百万年时间尺度上全球板块运动是非常稳定的。但我们认为不应笼统地这样说, 应对不同的板块对进行具体分析。Smith 等人和 Ward 先后发现并证实, 实测的欧亚与北美的相对运动慢于 NUVEL-1 估计值约 15%, 最近的一些研究结果认为, 北美和欧洲地区冰后回弹效应可能会对这种减慢负有责任<sup>[28-30]</sup>, 但即使考虑冰后回弹产生最大限度(约 5%)的影响, 再去掉 4.5% 的时间尺度影响, 实测结果与地学估计值之间仍有约 6% 的系统差, 即欧亚与北美的相对运动仍有可能是变慢了。澳大利亚板块相对北美、欧亚和南美的运动速度比 NUVEL-1 模型慢约 6%—11%(见表 1), 剔除 4.5% 的地磁倒转时间影响后, 仍有一些差距, 但因澳大利亚板块上台站尚少, 难以据此得出明确的结论。太平洋与北美板块运动的实测结果与 NUVEL-1 模型有极好的一致(见表 1), 说明近 3 百万年内太平洋与北美相对运动是稳定的。

## 4.3 板块内及边界地区的形变测量

板块内部及边界的形变早已被地球物理和大地测量资料所证实, 空间大地测量则是定量研究这些形变的理想工具。Ward<sup>[3]</sup>利用密布于 San Andreas 断层附近的 VLBI 站观测资料, 详细分析了该地区的形变情况。Smith 等人<sup>[6]</sup>用 SLR 基线变化率分析了各



板块内 SLR 站的形变, 指出太平洋板块内 Huabine 站正经历着向南的形变, 这与地球物理研究结果<sup>[34]</sup>相符。Ward<sup>[21]</sup>、孙付平和赵铭<sup>[23]</sup>都指出, 位于欧亚东部的上海站正以  $10-20\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  速度相对于西欧地区向东偏南方向运动, 最近的实测结果<sup>[31]</sup>也证明这一点。巨大的欧亚板块很可能不是一个块体, 而是由几个块体构成。该问题的解决将主要取决于在欧亚板块内进行的空间大地测量。南美板块上两个具有站速度的 SLR 测站都位于纳兹卡与南美板块交界处, 因受到纳兹卡板块的东向挤压作用, 存在一个向东的形变分量, 这也是由此导出的南美与其他板块的相对运动欧拉极明显偏离 NUVEL-1 模型的主要原因(见表 1)<sup>[24,25]</sup>。印度与欧亚板块交界的青藏高原地区, 被认为是现今地壳运动最活跃的地区, 这个地区正在布设的 GPS 监测网, 将为该地区形变的研究提供主要的信息源。GPS 技术因其机动灵活的特点, 将在全球形变测量中占主导地位。

#### 4.4 对冰期后地壳回弹的测量

James 和 Morgan<sup>[28]</sup>、Tushingham<sup>[29]</sup>指出, 发生在欧洲和北美的冰期后地壳回弹可达几个  $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ , 并可能导致  $1-2\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  的水平点位位移, 必然会对 VLBI 观测产生影响, 而目前的 VLBI 观测精度已能够监测冰后回弹运动。James 和 Lambart<sup>[30]</sup>进一步把 VLBI 观测结果与 ICE-3G 冰后回弹模型估计值作了比较(见表 2)。可见 VLBI 基线变化观测结果已能反映出因冰后回弹引起的水平运动。目前已在欧洲和北美冰后回弹剧烈区域布设了 VLBI 监测网, 不久将会得到更可靠的观测结果。

表 2 观测和估计的 VLBI 基线长度变化率 ( $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) 的比较

基线名称	观测时段	GLB754 解 ( $\pm 2\sigma$ )	ICE-3G 估计值
ALGO-GILC	1984—1991	$3.6 \pm 2.0$	1.8
ONSA-WETT	1984—1991	$-0.6 \pm 0.6$	-1.0
RICH WEST	1984—1991	$0.1 \pm 0.4$	-0.6

## 5 问题和展望

目前全球 VLBI 和 SLR 观测台站还很不合理, 北美、欧亚板块上台站较多, 但欧亚板块上主要台站都分布于西欧地区, 中亚和东亚台站很少。澳大利亚、南美、非洲这几个大板块上台站很少, 其他一些板块上几乎没有。这使我们建立全球实测板块运动模型的努力变得十分困难, 因 VLBI 和 SLR 测站建设和维持费用昂贵, 未来的改进将取决于 GPS 技术。

现有许多台站观测量少, 观测时间短, 还无法解算出相应的板块运动, 一些基线变化率因观测次数少精度还不够高 ( $> 5\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ )。已有实测运动的台站大部分位于形变地区, 不利于板块间相对运动的研究。VLBI 和 SLR 并置台站太少, 不利于进行两种技术实测板块运动的对比研究。

板块内部的形变研究还不深入, 特别是欧亚板块, 应进行更深入细致的观测研究。目前虽对 San Andreas 断层, 地中海形变区等著名地壳活动区研究得比较深入, 但对其他地区, 特别是我国青藏高原地区, 测量和研究还远不深入。

由于 GPS 技术观测精度的突破, 加上它具有机动灵活、造价低等优点, 目前被大量应用于监测区域性地壳形变。国际上地壳运动研究热点正逐步转向区域性地壳形变 (包括冰后回弹) 观测和研究。

80 年代美国宇航局组织的地壳动力学计划 (CDP) 已获得了巨大成功, 作为 CDP 计划的延续, 90 年代 NASA 又组织了规模浩大的固体地球动力学计划, 其中一项主要内容就是建立国际自然科学基准实验网 (FLINN)<sup>[32]</sup>。FLINN 的目的是综合利用 VLBI、SLR、LLR、GPS 等技术, 建立一个永久性大地测量基准网, 以监测板块运动和地壳形变, 提供地球定向并建立和维持地球参考架。该网将有约 200 个位置精度为几个 mm 的测站构成, 站间平均距离约为 1000km, 每个板块上至少有 3 个测站。随着 FLINN 网的建立和运行, 必将获得大量实测数据, 对现代板块运动的研究也必将获得重要成果。上述问题的解决将只是时间问题。

90 年代我国也组织了自己的 CDP 计划“现代地壳运动及地球动力学研究”。该计划要在我国建立 VLBI、SLR、GPS 综合观测网, 将对我国及邻区的地壳运动及地球动力学研究产生极其重要的推动作用。

### 参 考 文 献

- [1] Caprette D et al. VLBI Geodetic Result 1979-1989. NASA Technical Memorandum 104012, 1991
- [2] Ma C et al. VLBI Geodetic Result 1979-1990. NASA Technical Memorandum 104552, 1992
- [3] Ward S N. J. Geophys. Res., 1990, 95: 21965
- [4] Minster J B, Jordan T H. J. Geophys. Res., 1978, 83: 5331
- [5] Argus D F, Gordon R G. Geophys. Res. Lett., 1991, 18: 2039
- [6] Smith D E et al. J. Geophys. Res., 1990, 95: 22013
- [7] Gendt G et al. In: Mader G L ed. IAG symposium No.109, Austria, 1991, Berlin: Springer-Verlag, 1992: 121
- [8] Bock Y. Paper presented at IAU symposium No. 156, Shanghai, 1992
- [9] Anderson P H et al. In: Kumar M, Fell P J eds. Sixth international geodetic symposium on satellite positioning, Columbus, Ohio, USA, 1992, Columbus, Ohio, USA: Ohio State University, 1992: 418
- [10] Drewes H. Bull. Geod., 1982, 56: 70
- [11] Drewes H. Adv. Space Res., 1986, 6: 67
- [12] Watkins M M et al. In: Vyskocil P, Reigber C S, Cros P A eds. Global and regional geodynamics, IAG symposium No. 101, Edinburgh, 1989, New York: Springer-Verlag, 1990: 1
- [13] Reigber C et al. IAG symposium No.101, Edinburgh, 1989, New York: Springer-Verlag, 1990: 11
- [14] Dietrich R. In: Vyskocil P, Reigber C S, Cros P A eds. Global and regional geodynamics, IAG symposium No. 101, Edinburgh, 1989, New York: Springer-Verlag, 1990: 46
- [15] 朱文耀等. 中国科学 (A 辑), 1990, (6): 33
- [16] Gegout P, Cazenave A. Geophys. Res. Lett., 1991, 18: 1739
- [17] Reigber C et al. Paper presented at crustal dynamics project P. I. meeting, Greenbelt, 1991
- [18] Drewes H et al. In: Vyskocil P, Reigber C S, Cros P A eds. Global and regional geodynamics, IAG Symposium No.101, Edinburgh, 1989, New York: Springer-Verlag, 1990: 30
- [19] Argus D F, Gordon R G. J. Geophys. Res., 1990, 95: 17315
- [20] DeMets C et al. Geophys. J. Int., 1990, 101: 425
- [21] Ward S N. Submitted to J. Geophys. Res., 1992, in press.
- [22] Mao Ailing, Qian Zhihan. Paper presented at IAU symposium No. 156, Shanghai, 1992

- [23] Sun Fuping, Zhao Ming. Paper presented at IAG General Meeting, Beijing, 1993a
- [24] 孙付平, 赵 铭. 地球物理学报, 1994, (37): 547
- [25] Sun Fuping, Zhao Ming. In: Shichi R ed. Proceedings of the 8th international symp. on recent crustal movements, Kobe, Japan, 1994
- [26] Gordon R G. Nature, 1993, 364: 760
- [27] Hilgen F J. Earth Planet Sci. Lett., 1991, 104: 226
- [28] James T S, Morgan W J. Geophys. Res. Lett., 1990, 17: 957
- [29] Tushingham A M. Geophys. Res. Lett., 1991, 18: 1281
- [30] James S J, Lambert A. Geophys. Res. Lett., 1993, 20: 871
- [31] Ye Shuhua, Qian Zhihan. In: Proceedings of the international workshop for reference frame establishment and technical development in space geodesy, Tokyo, 1993. Tokyo: Communications Research Laboratory, 1993: 238
- [32] NASA Solid Earth Science: A Program for the 1990s, 1989
- [33] 钱志瀚. 中国 VLBI 网在测量地壳运动建立地面和天球参考系方面的作用, 1991
- [34] Winterer E L, Sandwell D T. Nature, 1987, 329: 534

(责任编辑 刘金铭)

## Measurement and Research of Current Plate Motions by Using Space Geodetic Techniques

Sun Fuping

(Zheng zhou Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052)

Zhao Ming

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

### Abstract

A brief introduction of the techniques and observational status for the study of the modern plate motion is given. The methods and theory for the establishment of the plate motion model by observational data is discussed with emphasis on the recent progress of the study of plate motion in more than ten years. The present problems and prospects are also mentioned.

**Key words** plate motion geodetic measurement