用空间大地测量数据检测地球的非对称性全球构造变化

孙付平 赵 铭④ 宁津生㈣ 晁定波㈣

(郑州测绘学院大地测量系, 郑州 450052; ④中国科学院上海天文台, 上海 200030;
㈣武汉测绘科技大学地测院, 武汉 430070)

摘要 用甚长基线干涉测量(VLBI)、全球定位系统(GPS)和卫星激光测距(SLR) 3 种空间大地测量技术测定的台站运动数据, 检测了可能存在的全球构造变化现象. 无论是采用大地线长度变化率检测, 或者是采用径向站速度检测, 3 种数据及其组合都给出了较为一致的检测结果. 即北半球中纬度带可能存在 8~ 10 mm/ a 量级的压缩变化; 南半球中纬度带可能存在 12~ 14 mm/ a 量级的膨胀变化. 这个结果不仅首次从实测的角度验证了南北半球反向的全球构造变化, 而且给出了较为准确的定量估计.

关键词 空间大地测量 实测站速度 全球构造变化

根据地球物理研究结果, 马宗晋等人[1,2]指出, 地球很可能存在南北半球反向的全球构造变化, 即北半球可能处于压缩状态, 南半球可能处于扩张状态. 这种推论的地球物理依据是: (1) 大地水准面呈梨形, 即北半球中纬度带(20~ 50°)凹进, 南半球中纬度带(- 20~ - 50°)凸出; (2) 地球表面 3/ 4 的压缩消亡边界位于北半球, 3/ 4 的扩张增生边界位于南半球; (3) 地震波观测表明, 地球南半球内部以 S 波负距平区(慢速区)为主, 属相对的热区(低密度区), 相反, 北半球则是正距平区(快速区)为主, 属相对的冷区(高密度区).

最近 15 年的 VLBI 和 SLR 观测、以及最近 5 年的 GPS 观测, 已测定了全球分布的 150 多个测站的运动速度, 精度大都好于 3~ 5 mm/ a. 上述的全球构造变化, 必然会在各站间的相对运动中反映出来, 因此用空间大地测量实测数据检测并验证上述全球构造变化已经成为能. 本文分别采用 VLBI, GPS 和 SLR 实测数据对上述全球构造变化进行了检测, 对检测结果进行了讨论.

1 数据

本文采用的 VLBI 站速度数据来自美国宇航局(NASA)哥达德空间飞行中心(GSFC)解算的 SSC(GSFC) 96R01 解. 这次解算采用了从 1979~ 1996 年的全球 VLBI 观测数据, 得到了 100 多个站的地心坐标和实测站速度, 其中近半数测站的站速度误差小于 3 mm/ a. 本文采用的 SLR 站速度数据来自美国得克萨斯大学空间研究中心(CSR)解算的 SSC(CSR) 96L01 解. 这次解算采用了从 1980~ 1996 年的全球 SLR 观测数据, 得到了近 100 个测站的地心坐标和 70 多个站的实测站速度, 其中 20 多个测站的站速度误差小于 5 mm/ a. 本文采用的 GPS 站速度数据来自美国加州技术研究院喷气推进实验室(JPL)解算的 SSC(JPL) 96P01 解. 这次解算采用了从 1991~ 1996 年的全球 GPS 观测数据, 得到了 100 多个站的地心坐标和实测站速度, 站速度误差大都小于 3 mm/ a.

因为全球构造变化是很微小的地球动力学活动, 参加检测的测站必须有很高的观测精度

和理想的地理分布. 据此我们在南北半球中纬度带(±20~ ±50°) 内选择了 83 个 VLBI, GPS 和 SLR 站(图 1) 参加检测, 除 少 数 SLR 站标准误差较大(2~ 5 mm/ a) 外, 其余测站标准误差均小于 2 mm/ a, 但因南半球测站太少, 我们不得不选用纬度在- 15~ - 20°之间的几个测站.

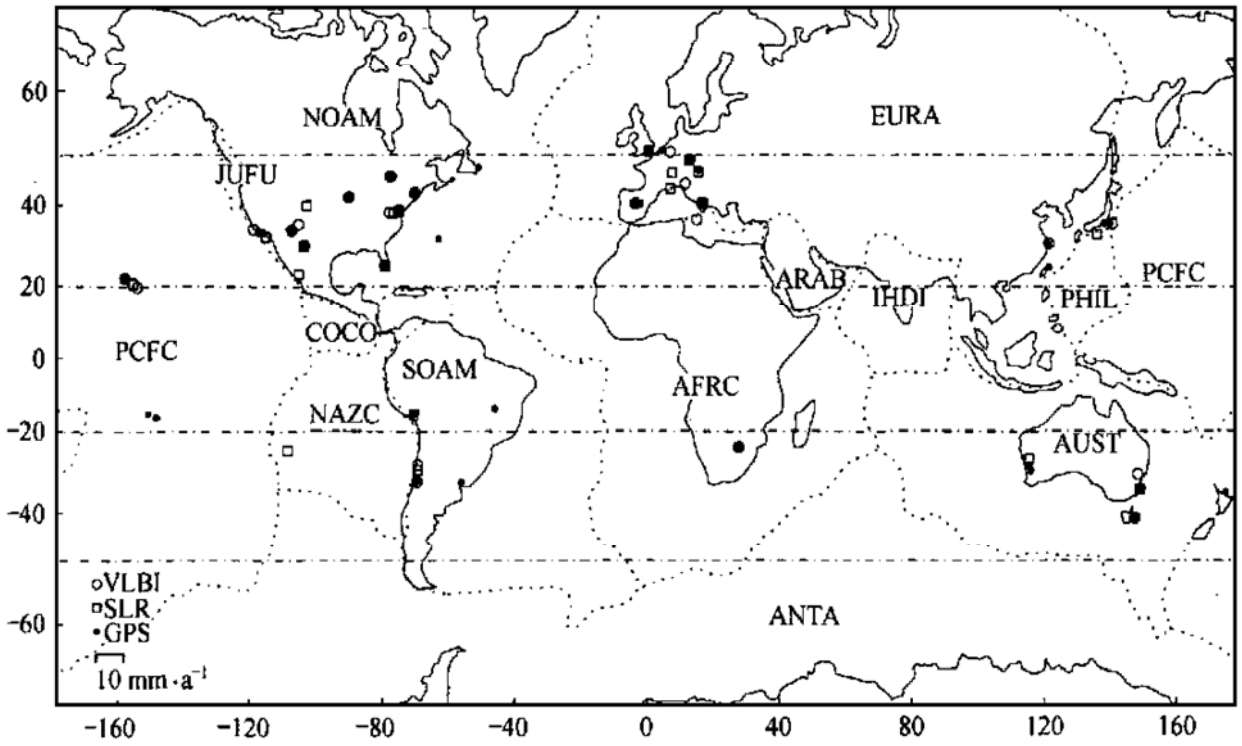

图 1 VLBI、SLR 和 GPS 测站的全球分布

图中实线表示大陆边界, 点线表示板块边界, 点虚线表示中纬度带. 板块名称缩写: EURA ——欧亚板块, PCFC ——太平洋板块, NOAM ——北美板块, SOAM ——南美板块, AFRC ——非洲板块, AUST ——澳大利亚板块, ANTA ——南极洲板块, NAZC ——纳兹卡板块, PHIL ——菲律宾板块, INDI ——印度板块, ARAB ——阿拉伯板块, COCO ——可可斯板块, CARB ——加勒比板块, JUFU ——吉安•德夫卡板块

2 检测方法

2.1 用大地线长度变化率检测

板块构造基本原理指出: 岩石圈板块横跨地球表面的大规模水平运动, 可用欧拉定律描绘为一种球面上的绕轴旋转运动. 在全球范围内, 板块沿分离型边界的扩张增生, 与沿汇聚型边界的压缩消亡相互补偿抵消, 从而使地球半径保持不变. 地学板块运动模型(如 NUVEL-1A)[3,4] 正是根据上述基本原理, 对估计模型施加板块回路闭合的约束而导出的, 因此它反映的是半径不变的地球表面上的平均板块运动. 而空间大地测量实测站速度, 反映的是实际发生的现时全球构造运动, 如果存在前述的全球构造变化, 则这种变化必然会在实测运动与地学模型估计值的差异中体现出来, 这就是该检测方法的理论依据. 地学板块运动模型采用的观测值(海底扩张速率、转换断层方位角等) 是最近几百万年内的平均结果, 因此它给出的是最近几百万年内的平均板块运动[3,4], 可认为是相对于长期静止(半径不变) 的地球估算的. 并且地学模型估计的板块运动精度好于 3 mm/ a[3,4], 是比较精确的. 可见, 基于上述检测方法的结果应是比较可靠的.

如果的确存在前述的地球南北半球反向全球构造变化, 则在南北半球中纬度带(±20~±50°) 内实测的纬圈变化率与地学模型估计值之闭合差 W 应不等于零. 如北半球处于压缩状态, W 应为负值, 如南半球处于扩张状态, W 应为正值. 基于上述思想, 我们采用如下方法对实测站速度进行了处理, 对可能存在的全球构造变化进行了检测.

首先, 由实测站速度计算中纬度带内不同板块上测站间的基线长度变化率, 再把基线变化率化为两站间的大地线长度变化率, 观测的和估计的大地线长度变化率之差为

$$X_{ij} = S_{ij}^{obs.} - S_{ij}^{pre.} = (B_{ij}^{obs.} - B_{ij}^{pre.}) / \sqrt{1 - (B_{ij}/2R)^2} - R\left| B_{ij} / \sqrt{(2R)^2 - (B_{ij})^2} - \arcsin(B_{ij}/2R) \right| , \quad (1)$$

式中, B_{ij}为基线长度, $S_{ij}^{obs.}$ 和 $S_{ij}^{pre.}$ 分别为空间技术观测的和板块模型估计的大地线长度变化率, $B_{ij}^{obs.}$ 和 $B_{ij}^{pre.}$ 分别为空间技术观测的和板块模型估计的基线长度变化度, R 和 $\dot{R}$ 分别为地球半径及其变化率.

计算中, 我们用($V_i^r + V_j^r$) / 2 代替 $\dot{R}$, V_i^r 和 V_j^r 分别为 i 和 j 站的径向站速度. 然后计算两板块上所有站间的大地线长度变化率与 NUVEL-1A 估计值之不符值的带权平均值, 称为弧段不符值 $\left| U_{ij} = \sum P_{ij} X_{ij} / \sum P_{ij} \right|$, 反映了该弧段的构造变化情况, 其中 P_{ij}由(1) 式按权倒数传播定律给出. 再计算这种构造变化在中纬度带平均纬圈上的总和(闭合差 $W1 = U_{ij} + U_{jk} + U_{kl} + U_{li}$) ; 或着直接计算单个环线闭合差 $W_{ij}^{kl} = X_{ij} + X_{jk} + X_{kl} + X_{li}$, 再计算总体环线闭合差 $W2 = \sum P_{ij}^{kl} W_{ij}^{kl} / \sum P_{ij}^{kl}$, 其中 P_{ij}^{kl}由单个环线闭合差计算公式按权倒数传播定律给出. 环线闭合差 W 如为负值, 则说明该半球处于压缩状态, 反之则处于扩张状态. 限于目前观测台站在全球板块上的分布, 环线闭合差只能取 4 个弧段来计算, 未来观测台站的增加, 可望能取更多的弧段来计算, 将得到更精确的检测结果.

2.2 由实测站心坐标速度来检测

为了更直观地反映测站的运动, 通常把测站地心坐标速度化算为站心坐标速度. 任一测站的站心坐标速度都有东、北和径向 3 个站速度分量, 假定两测站位于同一纬圈上, 取 $\varphi = \varphi_i = \varphi_j$ 为两站的纬度, $\alpha_{ij} = \lambda_j - \lambda_i$ 为两站的经度差, S_{ij}为站间纬线长, 则 $S_{ij} = R\cos\varphi \cdot \alpha_{ij}$, 而因地球半径变化引起的站间纬线长度变化率为 $\dot{S}_{ij} = \dot{R}\cos\varphi \cdot \alpha_{ij}$. 计算中我们用 $(V_i^r + V_j^r)/2$ 代替 $\dot{R}$, 因此有

$$\dot{S}_{ij} = (V_j^r + V_i^r)\cos\varphi(\alpha_{ij}/2), \quad (2)$$

然后, 把两板块上所有站间的纬线长度变化率的带权平均值作为中纬度带两板块间沿纬线方向上的构造变化, 称为弧段不符值 $\left| U_{ij} = \sum P_{ij} \dot{S}_{ij} / \sum P_{ij} \right|$, 其中 P_{ij}由(2) 式按权倒数传播定律给出. 再计算这种构造变化在中纬度带平均纬圈上的总和 (环线闭合差 $W1 = U_{ij} + U_{jk} + U_{kl} + U_{li}$) ; 或直接计算单个环线闭合差 $W_{ij}^{kl} = \dot{S}_{ij} + \dot{S}_{jk} + \dot{S}_{kl} + \dot{S}_{li}$, 再计算总体环线闭合差 $W2 = \sum P_{ij}^{kl} W_{ij}^{kl} / \sum P_{ij}^{kl}$, 其中 P_{ij}^{kl}由单个环线闭合差计算公式按权倒数传播定律给出. 原理上看, 当地球不存在压缩或膨胀时, 径向站速度为零, 闭合差应为零; 而当存在压缩和膨胀时, 径向站速度必不为零, 所以闭合差也不为零. 闭合差应与径向站速度有关, 当径向站速度均为负

值时, W 也为负值, 说明地球在该纬圈上处于压缩状态; 反之, 当径向速度均为正值时, W 也为正值, 说明地球在该纬圈上处于膨胀状态. 可见, 由测站的径向站速度就可计算地球的压缩和膨胀速度. 一般来说, 测站不可能严格位于同一纬圈上, 实用中我们用 φ_{ij}($\varphi_{ij} = (\varphi_i + \varphi_j)/2$) 近似代替 φ.

因为 VLBI, SLR, GPS 站速度是由不同国际空间数据分析中心解算的, 其各自运动学参考架的约定会有所不同. 要综合利用 3 种数据, 必须使其统一在一个特定的运动学参考架中. 采用 20 对 VLBI 和 SLR 并置站及 28 对 VLBI 和 GPS 并置站的地心站速度, SLR 和 GPS 数据被转换到 VLBI 参考架中.

理论上, 观测台站沿垂直方向的运动应定义为相对于地球质心的运动. 但在实际应用中, 各分析中心在定义其速度场的垂直运动参考架时具有一定任意性, 大都采用使一个或多个位于构造稳定区的测站的垂直站速度约束为零的方法来定义, 因此, 参考架统一后的各速度场之垂直运动在概念上仍不是相对于地球质心的. 为此, 我们假定冰期后地壳回弹的地球物理估计模型 ICE-4G 定义了相对于地球质心的运动, 实测速度场与 ICE-4G 速度场之间必然会存在系统差. 在实测速度场中消除这种系统差, 就实现了相对于地球质心的垂直运动参考架[5]. 在实用中, 因 VLBI 站速度垂直分量观测精度最高, 我们对 10 个 VLBI 站的实测站速度垂直分量进行了归算, 即通过在地心参考架中扣除系统差后使各站的实测垂直站速度与 ICE-4G 估计值之差在地心方向上投影的平方和为最小来解出系统差, 从而得到归算(扣除系统差) 后的各速度场. 数学模型为

$$\sum_{i=1}^{m}[(\boldsymbol{V}_i^{\text{obs.}} - \boldsymbol{S} - \boldsymbol{V}_i^{\text{pre.}}) \cdot \boldsymbol{X}_i]^2 = \min, \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{V}_i^{\text{obs.}}$ 和 $\boldsymbol{V}_i^{\text{pre.}}$ 分别为实测和 ICE-4G 估计的站速度垂直分量投影到地心参考架中的矢量, $\boldsymbol{S}$ 为最优平移矢量(系统差) , $\boldsymbol{X}_i$ 为第 i 站的单位地心矢量, m 是测站数.

3 检测结果

在北半球中纬度带内我们选择位于北美、欧洲、东亚、太平洋地区的测站构成 4 段纬线弧, 每一弧段两站间的经度差一般不超过 120°, 纬度差大都在 20° 内, 我们分别用 VLBI、GPS、SLR 和 3 种技术组合数据, 根据前述两种方法, 对北半球可能存在的全球构造变化进行了检测, 检测结果列于表 1. 在南半球中纬度带内, 因测站较少, 各种技术测站的分布也不一样, 构成的纬线弧也不一样. 如 GPS 测站可构成非洲、澳洲、南太平洋、南美 4 段纬线弧. VLBI 可构成非洲、澳洲、南美 3 段纬线弧. 只有澳洲-南美弧段站间经度差较大, 纬度差一般不超过 20°. 我们分别用 VLBI、GPS 和 3 种技术组合数据, 根据前述的两种方法, 对南半球可能存在的全球构造变化进行了检测, 结果列于表 2. 需要说明的是, 表中给出的各弧段不符值中误差, 是由弧段两端测站间所有大地线或纬线变化不符值中误差取均方根得到的, 如果按照取加权平均值的计算方法, 用误差传播定律计算弧段不符值中误差, 则所得中误差太小, 给出的精度指标可能过于乐观. 而闭合差 $W1$ 的中误差则由各弧段不符值中误差用误差传播定律算出. 同样, 闭合差 $W2$ 的中误差也是由所有 W_{ij}^{kl}的中误差取均方根得到的, 而 W_{ij}^{kl}的中误差则由 X_{ij}或 S_{ij} 的中误差用误差传播定律算出.

表 1 北半球检测结果[a] / mm·a^{-1}

技术	方法	太平洋-北美	北美-欧洲	欧洲-东亚	东亚-太平洋	闭合差 $W1$	闭合差 $W2$
VLBI	M2.1	1.8±1.0	−1.7±1.0	3.9±1.5	−14.5±1.6	−10.6±2.6	−10.9±2.7
	M2.2	−0.9±0.5	−1.4±0.6	−2.3±0.8	−3.3±0.8	−7.9±1.4	−10.1±1.5
GPS	M2.1	0.6±0.6	−1.1±0.5	5.0±1.0	−15.1±1.1	−10.6±1.7	−6.8±1.8
	M2.2	−0.2±0.2	−0.6±0.3	−3.5±0.6	−4.5±0.7	−8.8±1.0	−8.7±1.0
SLR	M2.1	−0.9±2.0	1.6±3.3	−25.1±3.0	15.5±2.1	−8.9±5.3	−7.9±5.3
	M2.2	−0.5±1.0	−1.5±2.0	−2.3±1.9	−3.7±1.1	−8.0±3.1	−7.7±3.2
组合	M2.1	1.0±1.2	−1.3±1.7	4.2±1.5	−15.0±1.8	−11.1±3.1	−8.6±3.2
	M2.2	−0.5±0.6	−0.9±1.1	−3.1±1.0	−4.0±1.0	−8.5±1.9	−9.4±1.8

a) M2.1 是指 2.1 节所述的大地线长度变化率检测结果, M2.2 是指 2.2 节所述的实测站心坐标速度检测结果

表 2 南半球检测结果[a] / mm·a^{-1}

技术	方法	非洲-澳洲	澳洲-太平洋	太平洋-南美	南美-非洲	闭合差 $W1$	闭合差 $W2$
GPS	M2.1	5.1±1.7	−0.8±0.9	18.9±1.6	−7.8±1.7	15.4±3.0	11.9±3.0
	M2.2	0.7±1.0	2.8±0.4	6.7±1.0	4.5±0.8	14.7±1.7	13.1±1.7
VLBI	M2.1	−0.2±1.9	15.4±3.6		−9.7±2.5	5.5±4.7	4.0±4.8
	M2.2	1.6±1.1	4.6±2.2		2.6±1.5	8.8±2.9	7.8±2.9
组合	M2.1	3.5±1.8	1.2±1.1	19.4±2.3	−7.9±3.0	16.2±4.3	12.7±4.3
	M2.2	1.1±1.0	3.1±0.5	6.6±1.4	4.1±1.6	14.9±2.4	13.4±2.5

a) M2.1 是指 2.1 节所述的大地线长度变化率检测结果, M2.2 是指 2.2 节所述的实测站心坐标速度检测结果

从表 1 和表 2 所列检测结果可以看出, 无论是采用不同技术的实测结果, 还是采用不同的检测方法, 最终都给出了比较一致的结果. 那就是, 在北半球中纬度带内, 纬圈长度变化闭合差均呈负值; 在南半球中纬度带内, 纬圈长度变化闭合差均呈正值. 如果检测方法没有问题, 则说明在南北半球的确存在着南胀北缩的全球构造变化. 因 VLBI 和 GPS 实测站速度的精度比较高, 测站也比较多, 故两者的检测结果精度较高. 综合 3 种数据及其组合给出的全球构造变化检测结果可以看出, 北半球的压缩变化量级在 8~ 10 mm/ a 左右, 南半球的膨胀变化量级在 12~ 14 mm/ a 左右. 因南半球测站较少, 该结果的误差可能较大.

参 考 文 献

1 马宗晋, 陈 强. 全球地震构造系统与地球的非对称性. 中国科学, B 辑, 1988, 18(10): 1092~ 1099

2 马宗晋, 高祥林, 任金卫. 现今全球构造特征及其动力学解释. 第四纪研究, 1992, (4): 293~ 305

3 DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current plate motions, Geophys J Int, 1990, (101): 425~ 478

4 DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res Lett, 1994, (21): 2191~ 2194

5 Argus D F. Post-glacial rebound from VLBI geodesy: on establishing vertical reference, geophys. Res Lett, 1996, (23): 973~ 976

(1998-10-08 收稿, 1999-04-20 收修改稿)