

# 南半球减速膨胀的定量分析

金双根 朱文耀

中国科学院上海天文台, 上海 200030

**摘 要** 利用空间大地测量技术的长期观测资料, 得出南半球纬线圈纬线长变化率和全球活动板块边缘扩张与汇聚运动速率, 并与 3Ma 平均地质地磁模型 NUVELIA 的估算结果进行比较: (1) 空间大地测量技术测得南半球纬线圈纬线变化率均为正值; (2) 南半球测站的垂向运动除了赤道附近几个测站下沉, 其余 91% 的台站全上升; (3) 南半球相邻板块的现今汇聚和扩张运动速率均比 3Ma 平均地质模型 NUVELIA 估值小, 而北半球相邻板块的汇聚和扩张运动速率没有系统性的变化. 这些实测结果反映了南半球纬线圈方向在减速伸展, 南北方向在减速拉伸, 即南半球在减速膨胀.

**关键词** 空间大地测量 南半球 膨胀 欧拉参数

文章编号 0001-5733(2003)06-0760-07 中图分类号 P312 收稿日期 2002-04-18, 2003-05-16 收修定稿

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE SLOWING EXPANSION IN THE SOUTHERN HEMISPHERE

JIN SHUANGGEN ZHU WENYAO

Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

**Abstract** The closed differences of the latitude length changing rates at the latitude-circle direction in the Southern Hemisphere and the convergent and spreading rates at global active plate boundaries are obtained from space geodetic data spanning 20 years. Comparing these results with NUVELIA predictions averaged the past 3Ma shows that: (1) the closed differences of the latitude length changing rates at the latitude-circle direction in the South Hemisphere are all positive; (2) 91 percent of sites in the Southern Hemisphere move up vertically, except several sites near the equator region; (3) the present-day spreading and convergent rates at active plate boundaries in the Southern Hemisphere are systemically smaller than NUVELIA predictions averaged 3Ma, while the changes of relative motions in the North Hemisphere are disorderly and unsystematic. All these show the present-day motion characteristics of the Southern Hemisphere that is expanding with a slowing down trend.

**Key words** Space geodesy, Southern Hemisphere, Expansion, Euler parameter.

### 1 引 言

地球是一个处于转动状态的行星, 其内部具有细分层和非均匀“硬”“软”结构. 旋转状态变化引起的惯性力差异会在地球的各个部位产生运动效应,

特别是沿着转动方向引起上下层之间相对滑动、漂移和同层内的相对挤压或张裂<sup>[1]</sup>. 由于地球地幔出现分层结构, 下地幔内部以热对流形式在运动而转化为动力, 以及地球转动惯性力、离心力和大气层以及其他天体对地球的作用, 使地球产生形变. 国内外地质学家应用多种地球物理方法对地球内部热散

**基金项目** 国家重大基础研究项目(G1998040703)和地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目(030405).

**作者简介** 金双根, 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为空间大地测量与地球动力学. E-mail: sgjin@center.shao.ac.cn

失量、地震波速度分布、全球洋底磁条带图以及全球海陆构造和洋脊裂谷分布等研究,得出以下推论和假设:北半球是冷半球,南半球是热半球;北半球是挤压半球,南半球是引张半球<sup>[1-3]</sup>。然而这些是否可靠,值得怀疑,尚需实测资料进一步证实。即便如此,是否一直在膨胀或压缩呢?

随着近二十多年甚长基线干涉测量(VLBI)、激光测距(SLR)、全球定位系统(GPS)等空间大地测量技术迅猛发展,为毫米级高精度实测现今地壳升降和板块分离与汇聚运动提供了重要实测手段,可以监测地球较短时间尺度的地壳运动特征<sup>[4]</sup>。孙付平等<sup>[5]</sup>利用空间大地测量资料,计算出南北半球纬线长变化率,证明现今北半球中纬度带纬向运动在收缩,南半球纬度带纬向运动在拉伸;黄立仁等<sup>[6]</sup>利用空间大地测量资料,计算出南北半球所有测站构成的内接四面体总体积变化率,证明北半球在收缩,南半球在膨胀。本文以南半球为例,利用更多的现代空间大地测量实测资料,包括国际地球参考架 ITRF2000 和国际 IGS 速度场,进一步给出南半球膨胀的几种证据,并与 3Ma 平均地质模型 NUVEL1A 的估算结果进行比较和讨论,揭示南半球现今运动特征及其在 3Ma 内的运动趋势,以便更好地认识地球变动历史中的造山、造海、造陆和不同时间尺度的环境变迁以及各种形态的自然灾害变化。

## 2 全球活动板块的相对运动

### 2.1 板块相对运动欧拉矢量

根据以下标准<sup>[7,8]</sup>选择各板块台站:①去掉位于板块边界带和形变较大的台站;②去掉测站精度大于 5 mm/a 的台站;③去掉建站时间少于 3 年的台站。最后共选择 241 个测站分布于 10 大板块(见图 1)。

根据板块欧拉运动定律,即  $V_p = \Omega_i \times r$ , 其中  $\Omega_i$  为第  $i$  板块的欧拉运动矢量,  $V_p$  和  $r$  分别为该板块测站的位移速度矢量和位置矢量。通过最小二乘法可分别求出 10 大板块的运动欧拉矢量,对不足够多或没有测站的板块(如菲律宾、可可斯、纳兹卡和印度板块等),可通过板块相对欧拉矢量获得。最后利用相对欧拉定律:  $\Omega_{ij} = \Omega_i - \Omega_j$ <sup>[9,10]</sup>, 可求出全球相邻板块相对运动欧拉矢量  $\Omega_{ij}$ , 即 ITRF2000VEL 模型(见表 1)。该模型没有任何地质模型假设,完全基于近 20 年的空间技术实测资料,由高精度的速度场得到,尤其是国际地球自转服务(IERS)最新发布

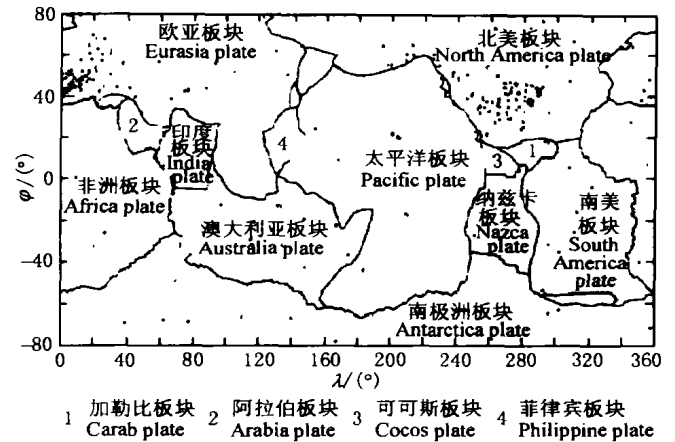


图 1 台站分布(黑点)和板块边界(黑实线)

Fig. 1 Distributions of sites (dark dots) and plate margins (real line)

的 ITRF2000 速度场,无论是测站的数目、分布还是监测精度都有了质的提高。因此,ITRF2000VEL 较好地反映较短时间尺度的现今全球板块构造运动特征。NUVEL1A 模型是基于 3Ma 平均地质和地磁资料建立的,是 3Ma 内的平均运动模型<sup>[11,12]</sup>,反映全球构造板块在 3Ma 内的平均运动特征。另外,从表 1 中可以看出,这些由空间技术实测资料所建立的板块相对运动模型,一些大的板块对(如欧亚-北美),其欧拉运动极的监测精度可达  $0.2^\circ$ ,欧拉角速度的监测精度为  $0.001^\circ/\text{Ma}$ ,与地质模型 NUVEL1A 相比,欧拉极两者之差达  $12^\circ$ ,旋转速度差达  $0.04^\circ/\text{Ma}$ ,这个差异比 ITRF2000VEL 本身精度大了一个量级,远远超出了空间技术解算欧拉矢量的误差范围。因此现今实测板块相对运动模型 ITRF2000VEL 具有相当高的精度。

### 2.2 全球板块边缘相对运动变化

通过板块相对欧拉运动定律:  $V_{ij} = \Omega_{ij} \times r$ , 其中  $r$  为全球活动构造板块边缘的位置矢量,  $\Omega_{ij}$  为基于空间大地测量资料得到的相邻板块相对欧拉矢量(见表 1),  $V_{ij}$  为全球相邻板块的相对运动速度。可以求出现今全球板块边缘扩张、滑动和汇聚运动速度,精度平均为  $0.5\text{mm/a}$ ,结果见表 2。

现今空间技术测得的全球板块相对运动速度反映最近数十年的相对运动,NUVEL1A 模型估算的结果代表 3Ma 内的平均相对运动。金双根等<sup>[14]</sup>利用现今空间技术实测资料得出大西洋中脊现今扩张运动速度,与 NNR-NUVEL1A 模型的估值比较,揭示了大西洋中脊现今扩张运动变化;Norabuena 等人<sup>[15]</sup>利

表 1 板块相对运动欧拉矢量比较

Table 1 Comparisons of the relative Euler vectors

| 板块对        | 模型 | $\Omega$ ( $^{\circ}$ /Ma) | $\lambda$ ( $^{\circ}$ ) | $\varphi$ ( $^{\circ}$ ) | $\sigma_{\Omega}$ ( $^{\circ}$ /Ma) | $\sigma_{\lambda}$ ( $^{\circ}$ ) | $\sigma_{\varphi}$ ( $^{\circ}$ ) |
|------------|----|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 北美 - 欧亚    | 1  | 0.253                      | -51.3                    | -73.5                    | 0.001                               | 0.2                               | 0.3                               |
|            | 2  | 0.21                       | -44.2                    | -62.4                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 可可斯 - 北美   | 1  | 1.401                      | -120.4                   | 27.7                     | 0.022                               | 1.0                               | 0.9                               |
|            | 2  | 1.36                       | -120.7                   | 27.9                     | 0.010                               |                                   |                                   |
| 北美 - 非洲    | 1  | 0.234                      | -108.7                   | -83.9                    | 0.003                               | 0.6                               | 2.1                               |
|            | 2  | 0.24                       | -128.3                   | -78.8                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 加勒比 - 非洲   | 1  | 0.114                      | -143.0                   | -63.8                    | 0.050                               | 6.2                               | 6.2                               |
|            | 2  | 0.11                       | -141.2                   | -59.4                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 非洲 - 印度    | 1  | 0.433                      | -147.5                   | -33.2                    | 0.002                               | 1.2                               | 0.5                               |
|            | 2  | 0.41                       | -151.5                   | -23.6                    | 0.060                               |                                   |                                   |
| 非洲 - 南极洲   | 1  | 0.116                      | -49.2                    | 2.4                      | 0.002                               | 0.2                               | 1.9                               |
|            | 2  | 0.12                       | -39.2                    | 5.6                      | 0.010                               |                                   |                                   |
| 南美 - 非洲    | 1  | 0.280                      | 136.6                    | -60.5                    | 0.012                               | 3.1                               | 1.4                               |
|            | 2  | 0.31                       | 140.6                    | -62.5                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 太平洋 - 南极洲  | 1  | 0.844                      | 103.4                    | -66.1                    | 0.001                               | 0.2                               | 0.3                               |
|            | 2  | 0.87                       | 96.0                     | -64.3                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 非洲 - 欧亚    | 1  | 0.064                      | -31.9                    | -8.9                     | 0.002                               | 0.4                               | 0.2                               |
|            | 2  | 0.12                       | -20.6                    | 21.0                     | 0.020                               |                                   |                                   |
| 可可斯 - 太平洋  | 1  | 2.048                      | -110.0                   | 36.3                     | 0.010                               | 2.1                               | 1.5                               |
|            | 2  | 2.00                       | -108.6                   | 36.8                     | 0.050                               |                                   |                                   |
| 印度 - 欧亚    | 1  | 0.450                      | 31.0                     | 24.3                     | 0.020                               | 0.9                               | 1.1                               |
|            | 2  | 0.51                       | 17.7                     | 24.4                     | 0.050                               |                                   |                                   |
| 纳兹卡 - 可可斯  | 1  | 0.931                      | 54.6                     | -7.3                     | 0.030                               | 1.2                               | 3.2                               |
|            | 2  | 0.91                       | 55.7                     | -4.8                     | 0.050                               |                                   |                                   |
| 北美 - 太平洋   | 1  | 0.743                      | -82.8                    | 49.1                     | 0.020                               | 0.1                               | 0.7                               |
|            | 2  | 0.75                       | -78.2                    | 48.7                     | 0.010                               |                                   |                                   |
| 澳大利亚 - 欧亚  | 1  | 0.660                      | 46.1                     | 9.5                      | 0.001                               | 0.1                               | 0.4                               |
|            | 2  | 0.69                       | 40.5                     | 15.1                     | 0.010                               |                                   |                                   |
| 阿拉伯 - 非洲   | 1  | 0.506                      | 30.1                     | 27.7                     | 0.020                               | 3.1                               | 2.7                               |
|            | 2  | 0.40                       | 24.0                     | 24.1                     | 0.050                               |                                   |                                   |
| 南美 - 南极洲   | 1  | 0.290                      | 8.9                      | -60.9                    | 0.001                               | 1.6                               | 0.8                               |
|            | 2  | 0.26                       | 139.3                    | -86.4                    | 0.010                               |                                   |                                   |
| 菲律宾 - 欧亚   | 1  | 0.991                      | -23.5                    | -48.5                    | 0.010                               | 3.2                               | 1.7                               |
|            | 2  | 1.012                      | -23.1                    | -47.2                    | 0.030                               |                                   |                                   |
| 非洲 - 澳大利亚  | 1  | 0.612                      | -128.4                   | -11.2                    | 0.002                               | 0.5                               | 0.6                               |
|            | 2  | 0.63                       | -130.2                   | -12.4                    | 0.020                               |                                   |                                   |
| 纳兹卡 - 南美   | 1  | 0.695                      | -89.8                    | 51.4                     | 0.010                               | 1.0                               | 0.9                               |
|            | 2  | 0.72                       | -94.0                    | 56.0                     | 0.020                               |                                   |                                   |
| 澳大利亚 - 太平洋 | 1  | 1.063                      | 7.7                      | 58.0                     | 0.001                               | 0.6                               | 0.3                               |
|            | 2  | 1.07                       | 1.7                      | 60.1                     | 0.020                               |                                   |                                   |
| 菲律宾 - 太平洋  | 1  | 0.927                      | -48.1                    | 3.8                      | 0.011                               | 2.7                               | 0.2                               |
|            | 2  | 0.951                      | -44.4                    | 2.7                      | 0.020                               |                                   |                                   |
| 澳大利亚 - 南极洲 | 1  | 0.641                      | 40.1                     | 11.7                     | 0.014                               | 0.6                               | 1.3                               |
|            | 2  | 0.65                       | 38.2                     | 13.2                     | 0.010                               |                                   |                                   |
| 纳兹卡 - 南极洲  | 1  | 0.503                      | -89.9                    | 35.1                     | 0.013                               | 0.6                               | 1.4                               |
|            | 2  | 0.52                       | -95.9                    | 40.5                     | 0.020                               |                                   |                                   |

注: 1 为 ITRF2000VEL, 2 为 NUVEL1A;  $\Omega$  为欧拉旋转速率,  $\lambda$  和  $\varphi$  分别为旋转极经度和纬度;  $\sigma_{\Omega}$ 、 $\sigma_{\lambda}$  和  $\sigma_{\varphi}$  分别是各自精度; NUVEL1A 模型中菲律宾板块相对于欧亚和太平洋板块的欧拉矢量来自文献[13].

表 2 板块边缘相对运动速度比较  
Table 2 Comparisons of the relative rates at active plate boundaries

| 相邻板块       | $\lambda/(\circ)$ | $\phi/(\circ)$ | $V_a/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$ | $Z_1/(\circ)$ | $V_b/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$ | $Z_2/(\circ)$ | $V_a - V_b/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$ |
|------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|---|
| 非洲 - 欧亚    | 30.3              | 35.8           | 7.2 ± 0.2                           | 335.7         | 9.7 ± 1.6                           | 355.9         | - 2.7                                     |
| 阿拉伯 - 非洲   | 37.2              | 22.0           | 15.7 ± 1.4                          | 9.4           | 9.5 ± 1.2                           | 12.1          | 6.2                                       |
| 印度 - 欧亚    | 75.0              | 33.1           | 33.6 ± 1.5                          | 10.3          | 43.7 ± 4.2                          | 5.8           | - 10.1                                    |
| 澳大利亚 - 欧亚  | 119.9             | - 10.3         | 71.2 ± 0.1                          | 12.7          | 76.2 ± 1.1                          | 16.9          | - 5.0                                     |
| 纳兹卡 - 南美   | 279.0             | - 7.8          | 66.8 ± 0.9                          | 83.6          | 71.7 ± 1.3                          | 81.9          | - 4.9                                     |
|            | 287.9             | - 30.2         | 76.8 ± 1.1                          | 79.0          | 79.8 ± 1.5                          | 77.9          | - 3.0                                     |
| 纳兹卡 - 太平洋  | 246.6             | - 27.2         | 149.6 ± 3.6                         | 102.4         | 150.8 ± 4.2                         | 102.9         | - 1.2                                     |
|            | 250.1             | - 9.4          | 136.6 ± 3.3                         | 101.4         | 139.1 ± 3.9                         | 99.6          | - 2.5                                     |
| 纳兹卡 - 可可斯  | 277.6             | 4.6            | 70.5 ± 2.3                          | 185.8         | 68.9 ± 3.8                          | 192.1         | 1.6                                       |
| 纳兹卡 - 南极洲  | 268.3             | - 40.3         | 54.2 ± 1.4                          | 91.5          | 57.1 ± 2.2                          | 86.8          | - 2.9                                     |
| 可可斯 - 太平洋  | 256.3             | 9.5            | 104.9 ± 0.5                         | 78.8          | 103.1 ± 2.5                         | 81.5          | 1.8                                       |
| 可可斯 - 北美   | 260.6             | 16.1           | 59.9 ± 0.9                          | 34.5          | 58.8 ± 0.6                          | 34.1          | 1.1                                       |
| 北美 - 太平洋   | 238.3             | 37.0           | 41.9 ± 1.1                          | 144.2         | 45.2 ± 0.6                          | 144.9         | - 3.3                                     |
|            | 230.1             | 51.0           | 41.1 ± 1.1                          | 165.1         | 44.9 ± 0.6                          | 163.3         | - 3.8                                     |
|            | 204.0             | 54.7           | 56.9 ± 1.5                          | 155.8         | 59.3 ± 0.7                          | 153.3         | - 2.4                                     |
|            | 190.0             | 51.3           | 65.5 ± 1.7                          | 145.6         | 68.4 ± 0.7                          | 143.6         | - 2.9                                     |
|            | 170.0             | 52.6           | 72.4 ± 1.9                          | 135.7         | 74.5 ± 0.8                          | 133.2         | - 2.1                                     |
|            | 155.0             | 47.0           | 78.5 ± 1.9                          | 125.8         | 80.1 ± 0.8                          | 123.3         | - 1.6                                     |
| 菲律宾 - 欧亚   | 129.9             | 28.2           | 53.2 ± 0.5                          | 308.1         | 53.8 ± 1.5                          | 306.6         | - 0.6                                     |
| 菲律宾 - 太平洋  | 140.6             | 10.7           | 30.1 ± 0.4                          | 121.1         | 30.4 ± 0.8                          | 123.3         | - 0.3                                     |
| 非洲 - 澳大利亚  | 66.7              | - 14.9         | 35.7 ± 0.1                          | 138.6         | 36.8 ± 1.2                          | 237.3         | - 1.1                                     |
| 非洲 - 印度    | 65.9              | 3.0            | 33.1 ± 0.2                          | 227.9         | 30.0 ± 4.4                          | 212.2         | 3.1                                       |
| 非洲 - 南极洲   | 20.0              | - 52.8         | 12.6 ± 0.2                          | 18.4          | 12.9 ± 1.0                          | 28.5          | - 0.3                                     |
|            | 42.4              | - 42.8         | 12.9 ± 0.2                          | 0.4           | 13.3 ± 1.0                          | 10.0          | - 0.4                                     |
|            | 60.8              | - 30.7         | 12.2 ± 0.2                          | 351.5         | 13.1 ± 1.0                          | 359.6         | - 0.9                                     |
| 澳大利亚 - 南极洲 | 137.7             | - 50.6         | 69.4 ± 1.5                          | 2.0           | 69.5 ± 1.5                          | 1.2           | - 0.1                                     |
|            | 114.8             | - 50.4         | 71.5 ± 1.7                          | 19.4          | 72.3 ± 1.7                          | 18.6          | - 0.8                                     |
|            | 163.2             | - 61.8         | 63.9 ± 1.4                          | 335.5         | 64.0 ± 1.4                          | 334.3         | - 0.1                                     |
| 澳大利亚 - 太平洋 | 159.5             | - 10.4         | 93.5 ± 0.1                          | 71.5          | 94.3 ± 0.5                          | 76.3          | - 0.8                                     |
|            | 160.5             | - 11.0         | 92.2 ± 0.1                          | 75.0          | 92.6 ± 1.7                          | 76.5          | - 0.4                                     |
|            | 183.1             | - 31.1         | 53.9 ± 0.1                          | 84.6          | 57.8 ± 0.5                          | 91.5          | - 3.9                                     |
|            | 187.9             | - 19.7         | 73.4 ± 0.1                          | 90.2          | 77.6 ± 0.5                          | 94.7          | - 4.2                                     |
| 太平洋 - 南极洲  | 245.9             | - 48.3         | 83.0 ± 0.1                          | 286.3         | 87.6 ± 1.1                          | 283.9         | - 4.6                                     |
|            | 233.0             | - 55.3         | 74.6 ± 0.1                          | 293.1         | 79.4 ± 1.1                          | 291.3         | - 4.8                                     |
|            | 202.5             | - 63.1         | 58.0 ± 0.1                          | 310.3         | 64.2 ± 1.1                          | 308.9         | - 6.2                                     |
| 加勒比 - 非洲   | 294.0             | 19.8           | 12.3 ± 5.4                          | 295.9         | 12.1 ± 1.0                          | 293.1         | 0.2                                       |
| 北美 - 欧亚    | 330.5             | 60.0           | 19.4 ± 0.1                          | 280.4         | 19.2 ± 1.0                          | 278.1         | 0.2                                       |
|            | 330.0             | 51.2           | 22.0 ± 0.1                          | 279.2         | 21.2 ± 0.9                          | 277.3         | 0.8                                       |
|            | 330.2             | 39.5           | 24.6 ± 0.1                          | 278.2         | 22.2 ± 0.9                          | 277.0         | 2.4                                       |
| 北美 - 非洲    | 318.3             | 30.9           | 23.5 ± 0.3                          | 273.4         | 20.0 ± 0.8                          | 279.5         | 3.5                                       |
| 南美 - 非洲    | 316.3             | 10.8           | 25.1 ± 1.1                          | 267.5         | 27.1 ± 0.9                          | 272.5         | - 2.0                                     |
|            | 347.0             | - 10.5         | 31.3 ± 1.3                          | 253.9         | 33.5 ± 1.1                          | 257.7         | - 2.2                                     |
|            | 346.6             | - 31.1         | 31.9 ± 1.3                          | 254.4         | 34.3 ± 1.1                          | 258.2         | - 2.4                                     |
|            | 355.2             | - 52.2         | 28.1 ± 1.2                          | 248.5         | 30.5 ± 1.0                          | 252.8         | - 2.4                                     |

注:  $\lambda$  和  $\phi$  分别为板块边界位置的经度和纬度;  $V_a$  和  $Z_1$  分别为空间技术实测得到的速率和方位角;  $V_b$  和  $Z_2$  分别为 NUVELIA 模型估算的速率和方位角。

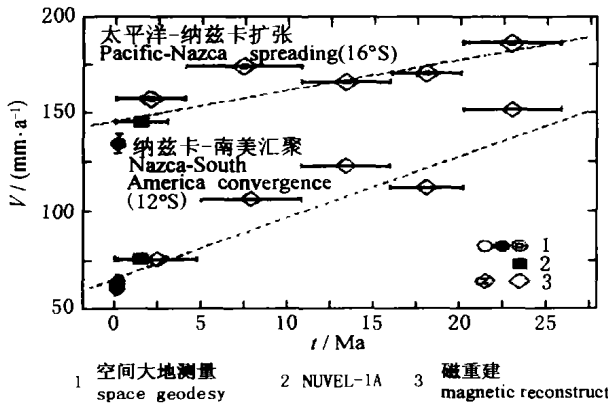


图 2 25 Ma 内板块相对运动速率

Fig.2 Relative motion rates of plates in 25 Ma

用空间大地测量资料、地质模型和地磁资料估算得到东太平洋中脊扩张运动速度和南美-纳兹卡板块汇聚运动速度(见图2)。由图2可见,从25Ma至今,古地磁资料记录东太平洋中脊在16°S处扩张运动速度和纳兹卡-南美板块在12°S处汇聚运动速度均在不断减小,表明东太平洋中脊和纳兹卡-南美

板块在最近25Ma内的整体运动趋势为减速扩张和汇聚。而3Ma平均地质模型NUVEL1A估算东太平洋中脊在16°S处平均扩张速度大于空间大地测量技术实测速度,NUVEL1A模型估算纳兹卡-南美板块在12°S处汇聚速度大于空间大地测量技术实测速度,即东太平洋中脊和纳兹卡-南美板块在最近3Ma内的扩张和汇聚运动趋势与整个25Ma内的运动趋势一致,表明在最近3Ma内,东太平洋中脊和纳兹卡-南美板块的确在作减速运动。

空间技术测得全球板块边缘的相对运动速度与百万年平均地质模型NUVEL1A估算结果的比较见表2,其中相对运动方位角基本一致,相对运动速率之差见表2和图3,平均偏差约为3mm/a。在3Ma内,北半球相邻板块相对运动速率没有系统性的变化,而南半球各相邻板块相对运动速率变化均减小,如经度方向,太平洋与纳兹卡板块、南大西洋中脊以及印度洋中脊均在减速扩张,纳兹卡与南美和太平洋与澳大利亚板块减速汇聚;纬度方向,环南极洲洋脊均在减速扩张,反映南半球南北方向在减速拉伸,东西方向在减速伸展,即南半球在减速运动。

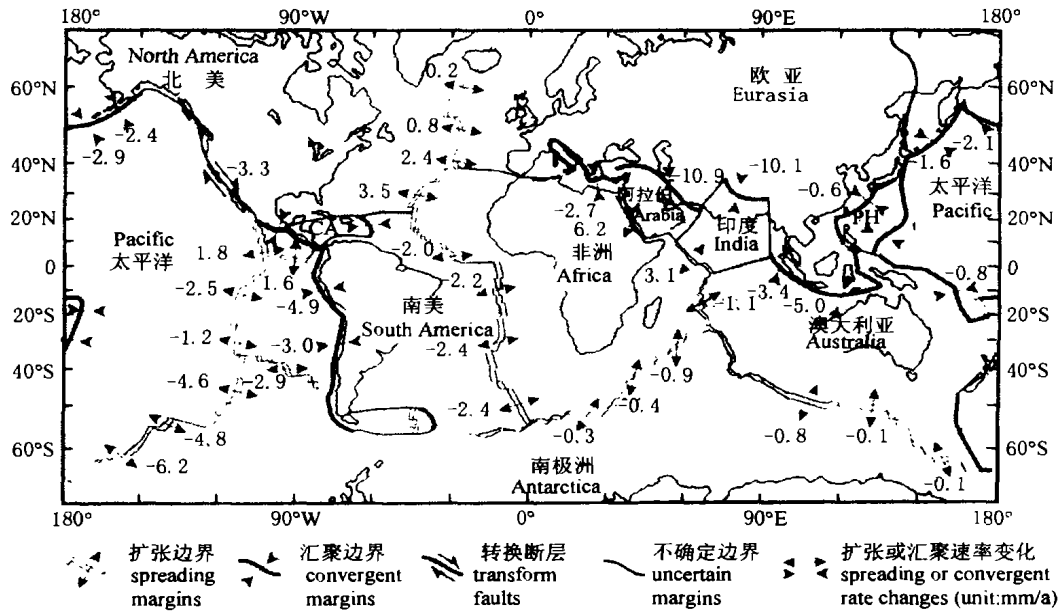


图 3 全球板块边缘相对运动速率变化

Fig.3 Variations of relative motion rates at global plate boundaries

### 3 南半球地壳垂直运动

从 ITRF2000 速度场和全球 IGS 速度场统计出

南半球台站的垂向运动(见表3),明显看出南半球除在赤道附近7个台站是下降,其他91%的台站几乎全为上升,反映南半球处于隆升状态。

表 3 南半球上升与下降台站分布

Table 3 The distributions of up and down stations

| 纬度          | GPS  |    |    | VLBI |    |    | SLR  |    |    |
|-------------|------|----|----|------|----|----|------|----|----|
|             | 总的台站 | 上升 | 下降 | 总的台站 | 上升 | 下降 | 总的台站 | 上升 | 下降 |
| 0°S ~ 10°S  | 11   | 4  | 7  | 1    | 1  | 0  | 1    | 0  | 1  |
| 10°S ~ 20°S | 11   | 9  | 2  | 0    | 0  | 0  | 4    | 3  | 1  |
| 20°S ~ 30°S | 12   | 11 | 1  | 2    | 2  | 0  | 3    | 3  | 0  |
| 30°S ~ 40°S | 10   | 8  | 2  | 3    | 2  | 1  | 6    | 5  | 1  |
| 40°S ~ 50°S | 5    | 4  | 1  | 1    | 0  | 1  |      |    |    |
| 50°S ~ 60°S | 2    | 2  | 0  |      |    |    |      |    |    |
| 60°S ~ 70°S | 7    | 6  | 1  | 2    | 2  | 0  |      |    |    |
| 70°S ~ 80°S | 3    | 2  | 1  |      |    |    |      |    |    |

#### 4 南半球纬线圈方向测站纬线变化率

$\Phi = \Phi_i = \Phi_j$  为测站近似相同纬度,  $\alpha_{ij} = \lambda_j - \lambda_i$  为测站经度之差,  $v_i^e, v_i^r, v_j^e, v_j^r$  分别为  $i$  和  $j$  测站东向和径向速度,  $B_{ij}$  和  $S_{ij}$  分别为站间基线长和纬线长, 基线变化率关系式为<sup>[5]</sup>

$$V(B_{ij}) = v_j^e \cos\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right) + v_j^r \cos\Phi \sin\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right) - \left[ v_i^e \cos\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right) - v_i^r \cos\Phi \sin\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right) \right], \quad (1)$$

又因为

$$V(S_{ij}) = \frac{V(B_{ij})}{\cos(\alpha_{ij}/2)}, \quad (2)$$

由此可得

$$V(S_{ij}) = v_j^e - v_i^e + (v_j^r + v_i^r) \cos\Phi \tan\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right), \quad (3)$$

式中  $V(B_{ij})$  和  $V(S_{ij})$  分别为站间基线长变化率和纬线长变化率. 针对同一纬度闭合环纬线长变化率闭合差为

$$W = V(S_{ij}) + V(S_{jk}) + V(S_{ki}) = \left[ (v_j^r + v_i^r) \tan\left(\frac{\alpha_{ij}}{2}\right) + (v_k^r + v_j^r) \tan\left(\frac{\alpha_{jk}}{2}\right) + (v_i^r + v_k^r) \tan\left(\frac{\alpha_{ki}}{2}\right) \right] \cos\Phi. \quad (4)$$

同一纬度闭合环纬线变化率的闭合差反映纬线圈闭合环膨胀与压缩. 利用 ITRF2000 速度场由上式可分别求出南半球同一纬度闭合环纬线变化率的闭合差: 平均纬度为  $-15.7^\circ$  的闭合环 DARW-TAHAREQ-CUIB-BRAZ-DARW 纬线变化率为  $16.2\text{mm/a}$ , 平均纬度为  $-25.5^\circ$  的闭合环 HART-ALIC-EISL-PARA-HART 纬线变化率为  $23.1\text{mm/a}$ , 平均纬度为  $-34.7^\circ$  的闭合环 SUTH-TIDB-AUCK-IGMO-SUTH 纬

线变化率为  $19.3\text{mm/a}$ , 平均纬度为  $-67.6^\circ$  的闭合环 SYOG-MAW1-DAV1-CAS1-DUM1-SYOG 纬线变化率为  $2.0\text{mm/a}$ . 由此可知: 南半球纬线变化率均为正值, 即南半球纬线在拉长, 说明南半球纬线圈处于拉伸状态.

#### 5 结 论

空间大地测量技术测得南半球纬线圈纬线变化率均为正值, 91% 的台站为上升以及南北方向板块边缘在扩张与分离, 反映南半球纬线圈方向在伸展, 南北向在拉伸, 即南半球在膨胀. 现代空间技术测得全球板块边缘现今扩张、汇聚和滑动运动速率和方向, 具有相当高的精度, 绝大部分精度相比地质模型 NUVEL1A 估算结果提高一个量级. 另外, 南半球: 纬线圈方向, 太平洋与纳兹卡板块、南大西洋中脊、澳大利亚与非洲间的印度洋中脊扩张速度以及纳兹卡与南美和太平洋与澳大利亚板块汇聚速度均在减小, 反映南半球在纬线圈方向伸展速度在减慢; 南北向, 环南极洲大洋中脊现今扩张速度均比百万年平均速度小, 即南极洲与太平洋、非洲和澳大利亚板块分离和拉伸在减慢, 反映南半球在南北向减速拉伸运动. 南半球板块边缘现今相对运动速度均比百万年平均值小不是系统偏差, 而是反映南半球现今引张运动趋势和特征: 南半球在最近 3 Ma 内减速膨胀, 而北半球板块边缘相对运动比较复杂, 扩张和汇聚速度没有系统性的变化. 由于地球是在不断的运动和演化, 其过程相当复杂, 更准确地了解地球构造现今演化趋势和历史, 分析构造运动特征, 有必要借助 3Ma 内更高分辨率的地磁异常资料做进一步分析, 进而更好地认识地球演化历史和自然灾害的构造活动规律.

## 参考文献

- [1] 马宗晋, 高祥林, 任金卫. 现今全球构造运动特征及其动力学解释. 第四纪研究, 1992, 92(4): 293 ~ 306  
MA Zongjin, GAO Xianglin, REN Jinwei. Present-day explain of tectonic character and dynamics. *A Study of 4th Century*, 1992, 92(4): 293 ~ 306
- [2] 傅承义. 地球十讲. 北京: 科学出版社, 1976. 102  
FU Chengyi. 10th Lecture of Earth. Beijing: Science Press, 1976. 102
- [3] 叶叔华, 黄 城. 天文地球动力学. 山东: 山东科学技术出版社, 2000  
YE Shuhua, HUANG Cheng. Astro-geodynamics. Shangdong: Shandong Science and Technology Press, 2000
- [4] JIN Shuanggen, ZHU Wenyao. Active motion of tectonic blocks in East Asia: Evidence from GPS measurement. *Acta Geological Sinica (English Edition)*, 2003, 77(1): 59 ~ 63
- [5] 孙付平, 赵 铭, 宁津生等. 空间大地测量数据检测地球的非对称性全球构造变化. 科学通报, 1999, 44(20): 2225 ~ 2229  
SUN Fuping, ZHAO Ming, NING Jinsheng, et al. Asymmetrical global tectonic changes based on the space geodetic measurements. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 2225 ~ 2229
- [6] 黄立仁, 马宗晋, 朱建新. 地球非对称性的最新观测证据. 地震学报, 2002, 24(2): 196 ~ 199  
HUANG Liren, MA Zongjin, ZHU Jianxin. New measuring evidence for the Earth asymmetry. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(2): 196 ~ 199
- [7] 朱文耀, 韩继龙, 马文章. 基于 ITRF96 和 ITRF97 板块运动模型. 天文学报, 2000, 41(3): 312 ~ 319  
ZHU Wenyao, HAN Jilong, MA Wenzhang. Global plate motion model based on ITRF96 and ITRF97. *Acta Astronomica Sinica*, 2000, 41(3): 312 ~ 319
- [8] 张 强, 朱文耀, 熊永清. 关于 ITRF96 参考架无整体旋转的探讨. 地球物理学报, 2000, 43(5): 598 ~ 606  
ZHANG Qiang, ZHU Wenyao, XIONG Yongqin. Net Rotation of the ITRF96. *Chinese J. Geophys.*, 2000, 43(5): 598 ~ 606
- [9] Solomon S C, Sleep N H. Some simple physical models for absolute plate motions. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(17): 2557 ~ 2567
- [10] Pinstor J B, Jordan T H. Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83: 5331 ~ 5354
- [11] DeMets C, Gordon R, Argus D. Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 1990, 101: 425 ~ 478
- [12] DeMets, C, Gordon R, Argus D, 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
- [13] 臧绍先, 陈起永, 宁杰远等. 菲律宾板块运动欧拉参数的确定及其推论. 中国科学(D辑), 2001, 31(6): 441 ~ 448  
ZANG Shaoxian, CHEN Qiyong, NING Jieyuan, et al. Euler parameter of the Philippine plate and its conclusion. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(6): 441 ~ 448
- [14] JIN Shuanggen, ZHU Wenyao. Present-day spreading motion of mid-Atlantic ridge. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(18): 1551 ~ 1555
- [15] Norabuena E O, Dixon T H, Stein S, et al. Decelerating Nazca-South and Nazca-Pacific plate motion. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(22): 3405 ~ 3408