

依据 GPS 数据建立中国大陆板内块体现时运动模型的初步研究*

周硕愚¹⁾ 张跃刚¹⁾ 丁国瑜²⁾ 吴 云¹⁾
秦小军¹⁾ 施顺英¹⁾ 王 琪¹⁾ 游新兆¹⁾
乔学军¹⁾ 帅 平¹⁾ 邓千金¹⁾

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

摘要 中国大陆被认为是研究大陆地壳运动和动力学的最理想地区。过去基于地面观测技术,很难对时间尺度为数年的大空间范围的陆内块体运动作定量研究。本文根据国家攀登计划“现代地壳运动和地球动力学”1994~1996 年 GPS 全国复测数据,提出了一种完全基于实测资料,通过卡尔丹角计算块体间现时运动欧拉矢量的理论方法。尝试性地初步建立了刻划中国大陆西藏、川滇、甘青、新疆、华南、华北和黑龙江等 7 个主要块体现时运动模型 PBMC-1 (present-time blocks movement model on the Chinese continent),首次在数年时间尺度内给出了中国大陆块体相对运动的点位速度场及边界带运动。模型结果表明:各块体的运动速率由南向北、由西向东逐次减少;运动方向由北北东逐步转向东以致东南和东东南。印度板块的碰撞对中国大陆内部诸块体运动起主导作用;而诸块体运动又决定着块体边界带——断裂带的活动方式与速率。模型给出的数年时间尺度的现时运动,总体上与地质学给出的百万年以来的平均状态相似,与地球物理学和天文学观测结果也较符合。GPS 等空间测地结果已初步具备揭示正在进行中的地壳运动的能力。

关键词 GPS 中国大陆 构造块体 现时运动模型

引言

岩石圈是一个具有层次结构的多体动力学系统。全球构造板块是第 1 层次,板内构造块体是第 2 层次……。迄今为止,科学工作者对全球板块运动研究较多,如 DeMets 等 (1990) 提出了 NUVEL-1 模型, Gordon (1991) 和 Larson (1997) 证实了近几年某些 VLBI 和 GPS 的实测结果与 NUVEL-1 和 NUVEL-1A 模型值较符合;而对板块内部块体间的运动则研究不足。对板内及板缘现今地壳运动的观测和研究是当今地球科学的热点。中国大陆被挟持在印度、太平洋、菲律宾海板块和西伯利亚-蒙古块体之间,陆内构造运动强烈、青藏

* 国家自然科学基金资助项目 (49674224)。

国家攀登计划“现代地壳运动与地球动力学”子课题。地震科学联合基金会“九·五”重点项目 (451)。

1997-11-28 收到初稿, 1998-04-17 收到修改稿并决定采用。

高原隆起、强震频繁,被认为是研究板内现今地壳运动最理想地区(赖锡安,1996). 该研究具有重要基础科学意义与防灾减灾实用价值.

丁国瑜和卢演涛(1986, 1989)研究了中国大陆地壳的不均匀结构,划分了各构造块体,并估计了在百万年时间尺度上的平均运动状态——块体运动的方向和年速率. 建立了描述近百万年来平均运动状态的地质学模型. 现今地球动力学、地壳动力学和灾害预测迫切需要知晓在年和数年时间尺度上,周缘各板块对中国大陆和大陆内部各块体间正在进行着的现今块体运动,以便建立完全基于实测的中国大陆现时块体运动模型 PBMC. 经典大地测量学由于测程和精度的局限,难以完成此任务,因而多年来此领域的研究难以进行. GPS、SLR 和 VLBI 等空间大地测量新技术的应用,使现时块体运动模型研究成为可能. 本文根据国家攀登计划“现代地壳运动和地球动力学研究及其应用”(叶淑华, 1996)、1994 和 1996 年两期 GPS 全国复测网的有限数据,首次对中国大陆构造块体现时运动模型进行了初步研究.

1 中国大陆板内块体划分与 GPS 测量

1.1 中国大陆板内块体划分

在丁国瑜和卢演涛(1989)的“板内块体现代运动图”中,通过运动大区分界线,将中国大陆地壳划分为 6 个大构造块体. 为了揭示西藏块体内部不同的运动状态,又将其分为两个块体,如图 1 所示.

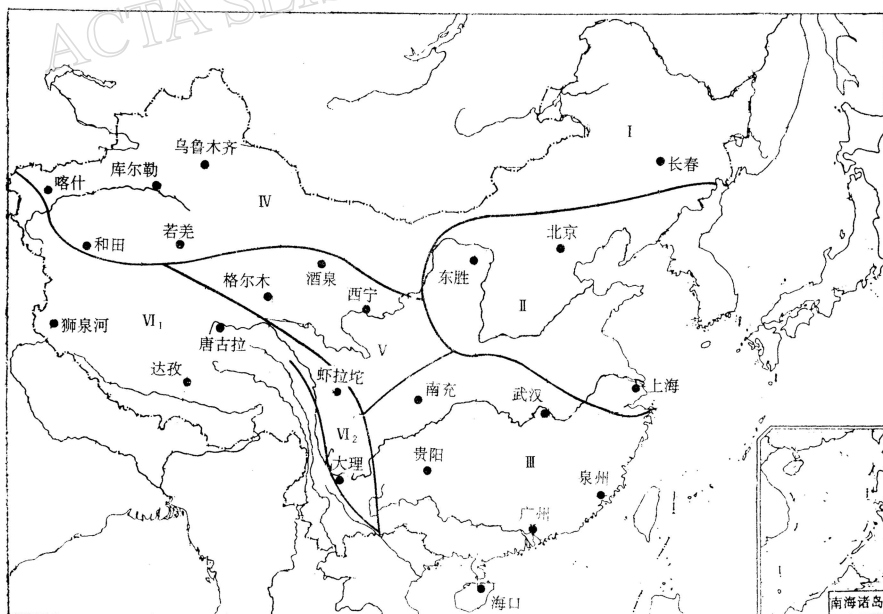


图 1 中国大陆板内块体划分

I. 黑龙江块体; II. 华北块体; III. 华南块体; IV. 新疆块体;
V. 甘青块体; VI₁. 西藏块体; VI₂. 川滇块体

1.2 1994 和 1996 年的 GPS 测量

国家攀登计划全国 GPS 地壳运动监测网共 23 个点. 国家地震局地震研究所、武汉测绘科技大学、国家地震局第一地形变监测中心和中国科学院上海天文台在 1994 年 8 月和 1996 年 7 月, 联合实施了两期观测. 复测共 21 个点, 使用了 9 台 Leica 2000、7 台 Ashtech Z-12 和 7 台 Rogue 8000GPS 接收机. 每个点上连续观测 6~8 天, 每天观测 12~24 小时, 数据采样间隔 30 s, 卫星截止高度角 15° . 采用 IGS 星历和 ITRF 坐标系. 应用国家地震局地震研究所 GPS 组在 GAMIT 软件基础上研制的 SNAPS(satellite navigation and positioning software)软件处理观测资料, 基线长加权平均值和平差值的相对精度均达到 10^{-9} ^①(Qiao *et al.*, 1997). 本文将依据复测 21 个点 1994~1996 年间的两次测量结果, 初步建立完全基于实测的中国大陆块体现时运动模型.

2 建立模型的理论和方法

2.1 建模的步骤和假设

DeMets(1990)在建立全球构造板块运动模型 NUVEL-1 时, 把各构造板块视为刚体. 事实上, 无论板块还是块体, 除具有整体平动和转动的刚性体特性外, 还具有内部不均匀结构和弹性变形特性. 为了较为精细地刻划板内块体的现时运动及其可能存在的随时间演化, 除合理划分块体外, 在建模时应同时考虑该两种特性. 我们计划分两步建模: 首先仅考虑块体的刚性运动特性, 初步建立“中国大陆现时块体运动模型-1”(PBMC-1); 然后再同时考虑各块体内部存在的弹性变形, 进而建立“模型 2”, 并对比两者的效能. 显然, 后者要求布设密度更高的 GPS 监测网. 本文研究范围仅限于前者.

Scholz(1990)在研究了北美大陆、周硕愚(1994, 1996)根据 30 年积累的跨断层形变测量资料, 在研究了中国大陆板内断层滑动速率时均指出, 板内主要块体边界滑动速率显著高于块体内部次级断层的滑动速率, 前者约比后者高数倍至一个数量级. 王琪等(1996)根据 1991~1993 年间, 巴拉-达孜(约 55 km)和日喀则-达孜(约 247 km)两条基线的 GPS 复测资料, 求得西藏块体的内部变形速率, 南北向为 7.0 ± 2.3 mm/a(缩短), 东西向为 7.4 ± 2.3 mm/a(伸长). 而丁国瑜和卢演传(1989)则估计西藏块体的整体运动速率可望达到 25~28 mm/a, 即数倍于块体内部变形速率. 尽管上述资料仍不够完整, 但它们均支持如下的假设: 板内主要构造块体整体的刚性运动显著大于其内部变形, 刚性块体运动模型可能是实际模型的一级近似. 本文将在此假设下, 研究建模的理论方法, 并依据稀疏的 21 个 GPS 复测点, 尝试性地建立 PBMC-1 模型.

2.2 刚性块体运动与欧拉角及卡尔丹角

经典力学中的“定点转动位移定理”已证明: 定点转动刚体的任何有限位移等效于绕通过该定点的某轴的一次转动并可用欧拉(Euler)矢量来定量刻划(秦家桦, 1993).

某构造块体在地球表面作刚性运动(平动与转动), 可将此块体视为通过一种无质量的刚性物质与地球质心紧密地联结在一起的“扩大刚体”. 因此此构造块体在地球表面的运动

① 国家地震局地震研究所 GPS 课题研究组, 1997. 国家地震局 GPS 成果公报(第二号), 1~81.

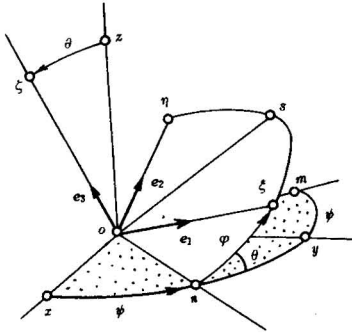


图2 定点转动刚体的欧拉角示意图

轴转动 φ 角(自动角), 使连体基偏离固定基, 到达某一任意位置, 即 $o-\xi\eta\zeta$ 状态. 以方向余弦矩阵为工具, 通过推导可得下列欧拉运动学方程:

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\psi} \sin\theta \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi \\ \omega_y = \dot{\psi} \sin\theta \cos\varphi - \dot{\theta} \sin\varphi \\ \omega_z = \dot{\psi} \cos\theta + \dot{\varphi} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \dot{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2)$$

式中, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为旋转矢量 ω 分解的 3 个分量. 欧拉矢量 ω 为

$$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \quad (3)$$

鉴于构造块体运动对应于 $o-xyz$ 地心坐标系的旋转角度非常小, 当 θ 角很小时, 式(1)中 ω_y 将趋近于零, 难以进行数值计算. 为此引入另一种框架角, 卡尔丹(Cardan)角. 它也是通过 3 次转动到达刚体的任一方位. 所不同的是欧拉角转动次序为 (z, x', z'') , 而卡尔丹角转动次序为 (x, y', z'') , $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为卡尔丹角的 3 次转动角(洪善桃, 1996). 同样可导出类似式(1)的运动方程(4)

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\epsilon}_x \cos\epsilon_y \cos\epsilon_z + \dot{\epsilon}_y \sin\epsilon_x \\ \omega_y = -\dot{\epsilon}_x \cos\epsilon_y \sin\epsilon_z + \dot{\epsilon}_y \cos\epsilon_x \\ \omega_z = \dot{\epsilon}_x \sin\epsilon_y + \dot{\epsilon}_z \end{cases} \quad (4)$$

当 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 很小时

$$\omega_x = \dot{\epsilon}_x \quad \omega_y = \dot{\epsilon}_y \quad \omega_z = \dot{\epsilon}_z \quad (5)$$

2.3 基于 GPS 数据推求卡尔丹角

设 o, i, j 等点是分别设置在块体 Q 和 P 上的 GPS 测站(图 3). 假定块体 Q 相对不动, 我们的目标是, 完全以实测资料为基础, 建立在现时某一时间区间内, 块体 P 相对于块体 Q 的运动学定量模型.

在块体 P 上任取一点 i , 它在 GPS 两期观测中的坐标分别为 (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) 和 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) . 在两期观测之间, 块体 P 相对于块体 Q 产生了运动, 如 2.2 节所述此运动等效于块体的“连体基”相对“固定基”以地心坐标系原点为固定点的坐标旋转. 它是通过 3 个卡尔丹角 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 顺次旋转来实现的. 因此旋转矩阵 R 为

$$R = R_x(\epsilon_x)R_y(\epsilon_y)R_z(\epsilon_z)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\epsilon_y\cos\epsilon_z & -\cos\epsilon_y\sin\epsilon_z & \sin\epsilon_y \\ \cos\epsilon_x\sin\epsilon_z + \sin\epsilon_x\sin\epsilon_y\cos\epsilon_z & \cos\epsilon_x\cos\epsilon_z - \sin\epsilon_x\sin\epsilon_y\cos\epsilon_z & -\sin\epsilon_x\cos\epsilon_y \\ \sin\epsilon_x\sin\epsilon_z - \cos\epsilon_x\sin\epsilon_y\cos\epsilon_z & \sin\epsilon_x\cos\epsilon_z + \cos\epsilon_x\sin\epsilon_y\sin\epsilon_z & \cos\epsilon_x\cos\epsilon_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 均为微小量, 故

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

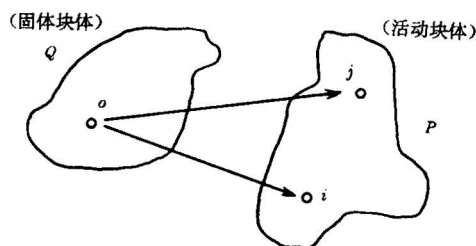


图 3 通过 GPS 测量描述
块体的相对运动

两期观测结果之关系为

$$\begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \\ z_{1i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

进一步推导可得

$$\Delta r_{2i} - \Delta r_{1i} = C_i T \quad (9)$$

其中

$$\Delta r_{2i} = \begin{bmatrix} (x_{2i} - x_{20}) \\ (y_{2i} - y_{20}) \\ (z_{2i} - z_{20}) \end{bmatrix} \quad \Delta r_{1i} = \begin{bmatrix} (x_{1i} - x_{10}) \\ (y_{1i} - y_{10}) \\ (z_{1i} - z_{10}) \end{bmatrix}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & z_{1i} & -y_{1i} \\ -z_{1i} & 0 & x_{1i} \\ y_{1i} & -x_{1i} & 0 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix}$$

若块体 P 上有数个 GPS 测点, 式(9)中 $i=1, 2, \dots, n$. 式(9)建立了两期 GPS 实测值与卡尔丹角 ϵ_x, ϵ_y 和 ϵ_z 的关系. 以式(9)为基础, 建立误差方程与法方程, 在最小二乘原则下, 可解出 ϵ_x, ϵ_y 和 ϵ_z , 并估计其精度.

2.4 计算欧拉矢量

欧拉矢量有两种表达形式, 一是欧拉矢量 ω ; 二是 $(\varphi, \lambda, \omega)$. φ, λ 是欧拉极的经纬度, ω 是以欧拉极和地心坐标系原点连线为转动轴的旋转角速度 ω

$$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z) = \left(\frac{\epsilon_x}{\Delta t}, \frac{\epsilon_y}{\Delta t}, \frac{\epsilon_z}{\Delta t} \right) \quad (10)$$

或

$$\omega = \omega(e_x, e_y, e_z) \quad (11)$$

其中, (e_x, e_y, e_z) 为单位矢量给出欧拉矢量方向, ω 为 ω 的模, 即旋转角速度.

$$\omega = \|\omega\| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (12)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2}} \left(e_z + \frac{c e^2 \tan^2 \varphi}{R \sqrt{1 + e'^2 + \tan^2 \varphi}} \right) \right] \quad (13)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{e_y}{e_x} \right) \quad (14)$$

其中, $c=a^2/b$; a, b 分别为地球长、短半径, e 为第 1 偏心率, $e'^2 = \frac{e^2}{1-e^2}$.

2.5 计算点位线速度

活动块体 P 上任意点位 i 的相对运动线速度 v_i 为

$$v_i = \omega \times r_i \tag{15}$$

r_i 为 i 点在地心坐标系中的矢径.

将 v_i 表达达到以 i 点为原点的站心坐标系(周忠谟等, 1997), 即可求得在局部范围内按东西南北方向表示的速度的方位角, 而 v_i 的模即为速度值.

2.6 计算块体边界带运动

设 i 点位于块体 P_A 和 P_B 的活动边界带上, 分别求得 v_{iA} 和 v_{iB} , v_{iA} 和 v_{iB} 两速度矢量之差即块体边界带(活断层)的相对位移速度矢量.

3 模型的初步结果

应用上述理论方法, 基于攀登计划 GPS 全国监测网 1994~1996 年数据, 尝试性地初步建立了中国大陆现时块体运动模型 PBMC-1.

3.1 中国大陆板内块体相对运动的欧拉矢量

地质学研究表明, 在图 1 的各板内块体中以黑龙江块体较为稳定, 其运动速率仅 0.1~0.5 mm/a(丁国瑜等, 1989). 故我们将其选为相对不动块体, 以长春为固定参照点, 计算出其余 6 个块体相对于黑龙江块体的欧拉矢量. 其欧拉极、旋转速率及其 3 个分量, 列于表 1 中. 从而初步建立了刻划各块体相对运动的定量模型.

表 1 中国大陆板内块体欧拉矢量(1994~1996, 长春固定)

块体					旋转矢量/ $n \text{ rad} \cdot a^{-1}$		
序号	名称	φ (北纬为正)	λ (东经为正)	$\omega/(^{\circ}) \cdot a^{-1}$	ω_x	ω_y	ω_z
Ⅱ	华北	50°32'36"	107°40'59"	0.001 441	-1.266	3.971	5.604
Ⅲ	华南	-2°35'59"	-63°55'49"	0.001 197	2.547	2.547	-0.261
Ⅳ	新疆	-14°23'14"	-80°37'57"	0.001 470	1.123	-6.807	-1.780
Ⅴ	甘青	30°48'34"	-60°54'51"	0.000 915	1.856	-3.337	2.262
Ⅵ ₁	西藏	65°17'1"	44°35'24"	0.001 626	2.361	2.327	7.154
Ⅵ ₂	川滇	20°40'45"	-80°39'11"	0.005 764	3.799	-25.89	-9.811

3.2 中国大陆板内块体相对运动的点位速度场

应用欧拉矢量可计算出各个块体内任何一点相对于基准(相对不动)块体的速度矢量, 从而构成中国大陆板内块体相对运动的速度场. 我们仅计算了各 GPS 测点上的速度矢量.

表 2 给出了 1994~1996 年间, 以长春为基准点的大陆内部各点位的年速率及其精度和方位角. 可以看出, 除华北块体 3 点位的速率中误差略大于模型估计值外, 其余所有点位速率中误差均显著小于或小于估计值. 从整体上看模型结果仍是可信的.

本文所建立的模型是块体间的相对运动模型. 选择不同的块体作为相对不动块体, 所给出的欧拉矢量和点位速度场图象会有所差别. 若以新疆块体为相对不动块体, 乌鲁木齐为固定点, 所算出的速度场其整体空间分布和表 2 及图 4 相近似; 但各矢量均会顺时针方向略作不同的旋转、矢量模也会略作一些变化. 只要知道了相对不动块体的绝对运动或在某种参考系中的运动, 就可求出所有各块体的相应运动.

3.3 PBMC-1 模型结果与地质学、地球物理学和天文学结果的比较

图 4 中, 近百万年来中国大陆板内块体平均运动状态的地质学模型(丁国瑜等, 1989)的年速率和方向, 用粗黑箭头表示; 1994~1996 年间, 基于 GPS 实测数据, 以长春为固定点的 PBMC-1 模型结果的年速率和方向用尾部带小圆点的细黑箭头表示. 两种资料来源完全不同, 且时间尺度殊异的模型, 能相互印证, 整体上具有相当好的一致性. 两种资料均揭示出, 在印度板块向北推挤下中国大陆板内各块体的相互作用: 运动速率由南向北、由西向东逐次减少; 运动方向由北北东逐步转向东以至东南和东东南的基本特征. 说明中国大陆板内块体现时运动(数年时间尺度)整体上仍是新构造运动(百万年时间尺度)基本格局的继承. 围绕此基本格局随时间演化的现时构造微动态过程, 还有待作更多期 GPS 测量来测定. PBMC-1 模型的运动速率普遍高于地质学速率, 是否因为 1994~1996 年正处在中国大陆 20 世纪第 5 地震活跃期内, 故其构造活动水平高于百万年来的平均状态? 尚有待更多的观测与研究来证实.

表 2 中国大陆板内块体相对运动的点位速度矢量
(1994~1996, 长春固定)

块体		点位	速率 mm/a	方向
序号	名称			
VI ₂	川滇	虾拉坨	33±5	S78°E
		大理	16±5	S70°E
VI ₁	西藏	唐古拉	34±13	N63°E
		狮泉河	31±15	N67°E
		达孜	36±16	N64°E
		酒泉	27±23	N71°E
V	甘青	格尔木	27±19	N68°E
		西宁	26±22	N74°E
IV	新疆	库尔勒	20±10	N63°E
		乌鲁木齐	23±11	N67°E
		喀什	24±13	N44°E
		和田	22±10	N47°E
		若羌	20±10	N65°E
III	华南	广州	13±5	N82°E
		贵阳	16±4	N67°E
		泉州	14±4	S83°E
		武汉	17±5	N86°E
I	华北	北京	12±14	N71°E°
		东胜	11±15	N84°E
		上海	18±21	N70°E

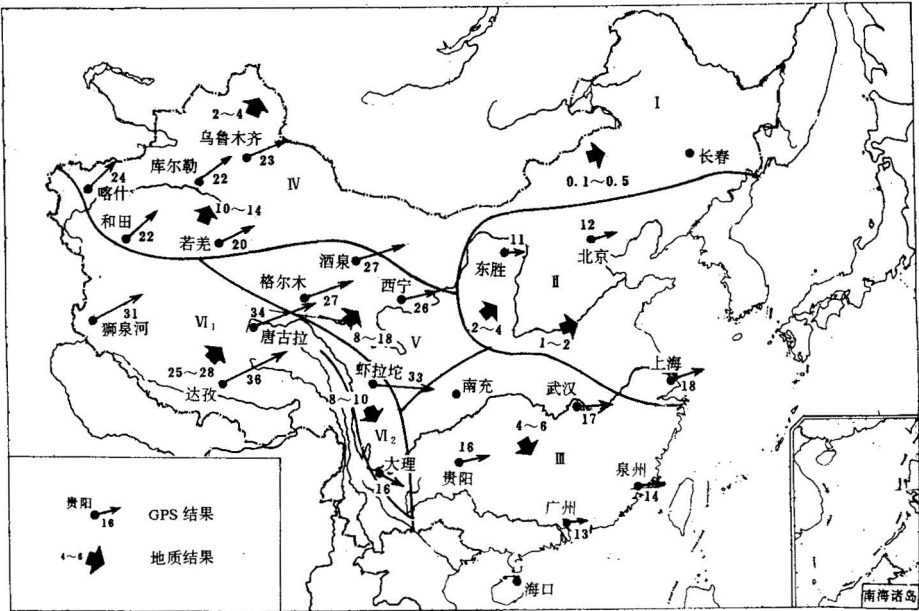


图 4 中国大陆板内块体相对运动略图(基于 GPS 测量的 PBMC-1 模型结果与地质学模型的对比)

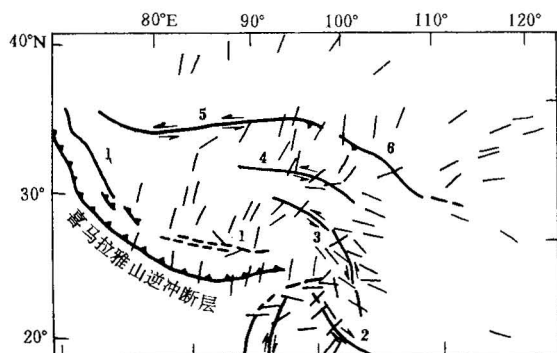


图 5 由震源机制解获得的 P 轴水平投影

1. 印度-雅鲁藏布江缝合带; 2. 红河断裂; 3. 鲜水河断裂;
4. 昆仑断裂; 5. 阿尔金断裂; 6. 海原断裂

瑾, 1995), 与图 4 中 PBMC-1 模型给出的速度场比较, 整体状况相当符合。

上海天文台 VLBI 近年来的实测结果表明, 中国东南地区上海的 VLBI 站相对于西欧存在约 15~20 mm/a 的向东偏南现时运动(赵铭, 1996)。基于 GPS 实测的 PBMC-1 模型给出上海相对于长春存在 18 mm/a 向东偏北运动, 两者也大致符合。

4 结论与讨论

(1) 基于国家攀登计划 1994~1996 年全国 21 个 GPS 点的复测结果, 我们研究了建模的理论方法, 并初步建立了“中国大陆板内块体现时运动模型”(PBMC-1)。它与地质学、地球物理学和天文学的结果能相互验证, 且自身也具有较好的内精度。它首次完全基于实测数据, 定量揭示出在中国大陆范围内各主要构造块体在数年时间尺度上的现时运动。

(2) GPS 等空间测地技术为大空间范围现时时间尺度的地壳运动和动力学研究创造了前所未有的良好条件。已初步证实其有效性。

(3) 与全球板块运动研究结果相类似, 由 GPS 实测的中国大陆板内块体的现时运动(数年时间尺度)状态, 与地质学给出的百万年以来的平均运动状态基本符合, 说明板块和块体运动可能存在着一种动平衡稳定态, 类似于动力学系统的吸引子。围绕动平衡稳定态的时空微动态过程, 有待于更精确、更密集的观测和更细微的研究来揭示, 其中可能蕴含着极其有用的信息。

(4) 印度板块的碰撞对中国大陆内部诸块体的运动起着主导作用; 而诸块体的运动又决定着块体边界带——断裂带的活动方式与速率。

(5) 本文仅是一项初步研究, 所提出的模型还比较粗糙。更优良的模型, 不仅应考虑块体的刚性运动, 还应同时顾及块体的内部变形; 应该用更丰富的空间测地资料, 包括中国大陆邻区的“IGS”(international GPS service for geodynamic), 以及大陆内部今后获得的密度更高、复测期更多的新资料, 并对它们作更精细的处理。我们将继续努力。

感谢马宗晋、叶淑华院士, 陈鑫连、赖锡安教授的帮助; 感谢国家地震局地震研究所 GPS 组提供 GPS 资料。

PBMC-1 模型所给出的川滇菱形块体是向东南方向运动, 这与地质学结果一致。用本文 2.6 节的方法, 计算了川滇块体和甘青块体边界带——鲜水河断裂带、川滇块体与华南块体边界带——安宁河、则木河、小江断裂带的现时运动均呈现左旋状态; 还计算了西藏块体与川滇块体的边界带——红河断裂带的现时运动均呈右旋状态, 这与地质学和地面跨断层测量结果一致, 说明块体运动状态决定了边界带断层的滑动状态。

图 5 是中国西南部由震源机制解获得的主压应力轴水平投影(陈开平, 马

参 考 文 献

- 陈开平, 马瑾, 1995. 印度与欧亚大陆碰撞构造变形数值分析. 地震地质, 17(3): 277~284
- 丁国瑜, 卢演传, 1986. 对我国现代板内运动状态的初步探讨. 科学通报, (18): 1 412~1 413
- 丁国瑜, 卢演传, 1989. 板内块体的现代运动(1: 14 000 000). 见: 马杏垣(主编), 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社. 21
- 洪善桃, 1996. 高等动力学(新一版). 上海: 同济大学出版社. 79~86
- 赖锡安, 1996. 我国大陆主要活动构造带现今地壳运动及其动力学机制. 见: 叶淑华(主编), 运动的地球——现代地壳运动和地球动力学研究及应用. 长沙: 湖南科术出版社. 58~63
- 秦家骅, 1993. 经典力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 168~183
- 王琪, 游新兆, 王启梁, 1996. 用全球定位系统(GPS)监测青藏高原地壳形变. 地震地质, 18(2): 97~103
- 周忠谟, 易杰军, 周琪, 1997. GPS 卫星测量原理与应用(修订本). 北京: 测绘出版社. 14~34
- 赵铭, 1996. 中国地壳运动的全球背景. 见: 叶淑华(主编), 运动的地球——现代地壳运动和地球动力学研究及应用. 长沙: 湖南科技出版社. 22~27
- 周硕愚, 1994. 断层形变测量与地震预报. 地壳形变与地震, 14(4): 90~97
- 周硕愚, 1996. 中国大陆活动断层的分类. 见: 叶淑华(主编), 运动的地球——现代地壳运动和地球动力学研究及应用. 长沙: 湖南科技出版社. 75~79
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, *et al*, 1990. Current plate motions. *Geophys J Int*, 101: 425~478
- Gordon R G, 1991. Plate motions. In: American Geophysical Union, *U S National Report 1987~1990 Contributions in Tectonophysics*, 20th, IUGG, Vienna. 748~758
- Larson K M, 1997. Global plate velocities from the global positioning system. *J Geophys Res*, 102(B₅): 9 961~9 981
- Qiao X J, You X Z, Wan Q, 1997. Monitoring crustal movement in China continent using GPS 1988~1997. In: IUGG IAG. *Proceeding of International Symposium on Current Crustal Movement and Hazard Reduction in East Asia and South-east Asia*, Wuhan China. 43~44
- Scholz C H, 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press. 305~309