

孟国杰, 申旭辉, Vladimir Smirnov 等. 堪察加地区现今地壳运动与变形特征研究. 地球物理学报, 2009, 52(3): 720~731

Meng G J, Shen X H, Vladimir Smirnov, et al. Research on characteristics of present-day crustal motion and deformation in Kamchatka area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 720~731

## 堪察加地区现今地壳运动与变形特征研究

孟国杰<sup>1</sup>, 申旭辉<sup>1</sup>, Vladimir Smirnov<sup>2</sup>, Eugene A Rogozhin<sup>3</sup>, 伍吉仓<sup>4</sup>

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 俄罗斯科学院地球物理研究所, 莫斯科 123995

3 莫斯科大学物理系, 莫斯科 119992

4 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092

**摘 要** 利用俄罗斯堪察加地区 1995~2005 年的 GPS 观测数据, 研究了该区现今地壳水平运动速度场特征. 在球坐标系中解算了各应变率分量, 分析了应变率场的空间分布特征, 并与地震学和地质学研究结果进行了综合对比分析. 结果表明, 堪察加半岛北部的微板块边界并不明显, 堪察加南部测站运动速度大于中部和北部地区, 愈靠近东部板块汇聚区, 测站速度越大. 从东海岸到西海岸, 测站水平速度存在明显的梯度衰减特征, 水平运动方向与太平洋板块向西北的俯冲方向基本一致. 各应变率分量具有东部海岸大于中部和西海岸、从东至西呈梯度衰减的特点. 堪察加大部分地区处于 EW 和 NS 向压缩状态, 局部存在拉张. 面应变率结果显示绝大部分为压缩区; 刚性转动结果表明大部分地区表现为顺时针转动, 北部地区和南端顺时针旋转性明显. 东部有效应变率明显大于西部地区, 东西向梯度衰减关系明显. 主压应变率明显大于主张应变率, 特别是在东海岸地区. 主压应变率方向与中等以上地震的主压应力轴在水平方向的投影方向基本一致. 地壳变形场在空间分布上的不一致性主要与太平洋板块在堪察加半岛东南侧的俯冲深度、俯冲方位角、俯冲倾角和俯冲带的耦合强度有关.

**关键词** 堪察加地区, 地壳运动, GPS, 应变率场

**文章编号** 0001-5733(2009)03-0720-12

**中图分类号** P542

**收稿日期** 2008-03-15, 2008-11-26 收修定稿

### Research on characteristics of present-day crustal motion and deformation in Kamchatka area

MENG Guo-Jie<sup>1</sup>, SHEN Xu-Hui<sup>1</sup>, Vladimir Smirnov<sup>2</sup>, Eugene A Rogozhin<sup>3</sup>, WU Ji-Cang<sup>4</sup>

1 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2 *Institute of Physics of the Earth, Russia Academy Sciences, Moscow 123995, Russia*

3 *Department of Physics, Moscow State University, Moscow 119992, Russia*

4 *Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China*

**Abstract** We have collected GPS data in the period of 1995~2005 in Kamchatka, Russia to study the characteristics of present-day crustal horizontal motion velocities in this area. Strain rate components are computed in spheric coordinate system. Analyses of the spatial distribution of strain rate fields derived from GPS measurements are carried out in contrast with seismological and geological results. Results show that microplate boundaries are not clear in the north part of Kamchatka peninsula. Site velocities in southern Kamchatka peninsula are generally greater than in the middle and north of this area. The closer to the eastern subduction zone the sites are, the greater their velocities are. Horizontal velocity field obviously exhibits gradient decrease across

the peninsula from east to west. Generally the horizontal motions have same direction as the Pacific plate subducting to the southeast. All strain rate components have the features of getting less in EW direction. Generally, Kamchatka peninsula is undergoing compression in terms of EW and NS strain rate components, with extension in certain local zones. Dilation rates show that almost all Kamchatka peninsula are contracting; Rigid rotation rates in most regions are clockwise, especially in north zone and southern end. Effective strain rates in eastern zone are greater than in west, and it exhibits remarking gradient decrease in EW direction. Principal compression strain rates are apparently greater than principal extension strain rate, especially in eastern zone. In general, the directions of principal compression strain rate are congruent with horizontal projection of principal compress axis derived from medium and large earthquakes. Spatial non-uniform of crustal deformation field is related to the subduction depth, orientation, dip angle and coupling strength of Pacific downthrust to the southeast of Kamchatka peninsula.

**Keywords** Kamchatka area, Crustal motion, GPS, Strain rate field

## 1 引言

俄罗斯堪察加地区处于太平洋、欧亚和北美三大板块的交汇区. 如果鄂霍茨克和白令海两个微板块存在, 该地区也是世界上少有的 2 个三联点并置的地区. 第一个是太平洋(PA)—白令海(BE)—鄂霍茨克板块(OK)三联点, 位于千岛—堪察加岛弧和阿留申海沟的交汇部位; 另一个是鄂霍茨克板块—白令海—北美板块(NM)三联点, 位于堪察加半岛的东北部. 在堪察加半岛东南侧, PA 板块以 80 mm/a 左右的速度沿 NNW 方向俯冲, 俯冲方位角为  $N30^{\circ}W$  左右, 俯冲带走向大约为  $N35^{\circ}E$ , 几乎垂直于 PA 板块的俯冲方向, 俯冲带在  $55^{\circ}N$  附近与阿留申海沟交会<sup>[1]</sup>.

堪察加东部的千岛—堪察加海沟是 PA 板块与 OK 板块的汇聚边界, PA 板块在此俯冲到 OK 板块下部, 导致堪察加地区成为典型的板块边界地震带, 地震带基本上平行于堪察加半岛中南部. 堪察加海沟与阿留申海沟在白令岛西南部附近海域交汇, 向北延伸到堪察加东北地震带<sup>[2]</sup>. 靠近该地震带的堪察加半岛北部, 横穿堪察加半岛沿西北方向直至马加丹北部的契尔斯基山脉, 存在一条地震活动较弱的条带. 地震活动性、震源机制和地震构造表明该地震条带是 OK 板块与 NM 板块的分界线<sup>[3]</sup>. Seno 等<sup>[4]</sup>对地震滑动矢量的统计检验和相对欧拉矢量反演表明, 独立存在的 OK 板块可以更好地解释其周围的活动构造和库页岛的地震滑动矢量, 所勾画的 OK 板块与 NM 板块的边界与 Cook 等<sup>[2]</sup>给出的基本一致. 为解释堪察加半岛以北科里亚克丘陵区和

白令海峡地区的地震活动特征, 有学者提出了白令板块的存在性<sup>[5]</sup>, 认为 BE 板块西边界在堪察加半岛中部海域与 NM 板块、PA 板块和 OK 板块相接. Apel 等<sup>[6]</sup>根据东北亚 GPS 速度场进行块体模拟, 给出的堪察加东部及其以北的板块边界与地震学和地质学划定结果大致相同.

堪察加地区特殊的构造位置, 导致该区成为世界上典型的强震多发区和火山活跃区. 历史上该区曾经发生多次强震, 包括 1904 年  $M_s8.0$ , 1923 年  $M_w8.5$ , 1952 年  $M_w9.0$ , 1957 年  $M_w8.2$  和 1997 年  $M_w7.8$  级地震. 其中 1952 年 11 月 4 日发生的  $M_w9.0$  地震是 20 世纪全球第 4 大地震, 导致了整个太平洋范围产生海啸. 最近的一次强震是 2006 年 4 月 21 日发生在堪察加半岛最北端的  $M_s8.2$  地震, 本次强震后一个月内, 在主震东西两侧分别发生了 2 次  $M_s7.3$  级强余震, 表明堪察加地区地震活动性近期仍处于活跃状态. 沿堪察加半岛分布有 60 个活火山, 在南北方向成链状排列, 最近的一次火山喷发发生在 1737~1742 年之间<sup>[7]</sup>, 这些火山主要分布在半岛的东南部, 中部有少量的火山, 分布相对凌乱.

近 20 年来, 随着空间大地测量技术的不断发展, 利用 GPS 技术监测全球地壳运动取得了长足进展, 并取得了丰富的研究成果<sup>[8~10]</sup>. 在板块边界区 GPS 已经成为研究大区域地壳变形的主要手段<sup>[11~12]</sup>. 自 1995 年以来, 俄罗斯学者建立了分布于堪察加半岛和马加丹地区的 GPS 观测网络(图 1), 并取得了一些研究成果. Gordeev et al.<sup>[1]</sup>分析了其中 5 个连续站在 1996~2000 年间的位移时间序列特征, 并揭示了 1997 年发生在堪察加半岛中部  $M_w7.8$  级地震前后各测站位移的变化特征;

Bürgmann 等<sup>[13]</sup>利用 5 个连续站的数据分析了该次强震之后快速的非震矩释放特征;Bürgmann 等<sup>[14]</sup>研究了堪察加半岛消减区壳幔耦合特征和凹凸体分布.但目前对堪察加地区的地壳水平运动场、应变场空间变化特征及其动力学成因还缺乏更深入的研究.利用中俄地震科技合作的契机,我们收集了堪察加地区 1995~2005 年的 GPS 观测资料,结合相关地震学、地质学资料,研究了该区现今地壳运动变形特征、板块边界划分方法,并结合地震学和地质学结果对其构造动力学意义进行了探讨.

## 2 GPS 数据收集与分析

自 1995 年起,在 RUSEG 项目的支持下,开始在堪察加及其邻区建立 GPS 观测站,其中包括 5 个连续观测站和 18 个流动观测站.18 个流动观测站分别在 2001、2002、2003 年进行了观测,所有测站都采用 Ashtech Z-12 GPS 接收机和扼流圈天线.每个测站观测 4~5 天,每天观测 24 h 以得到多余观测数据,并抑制日变化短周期噪声.在每一个主观测站观测的同时,在 2~3 个紧邻的辅站上同步进行观测,通过与参考点的比较以确定主站的局部稳定性<sup>[15]</sup>.

本文利用的 GPS 观测资料主要来自 7 个文献<sup>[6,14,16~20]</sup>,并对这些数据从以下 4 个方面作进一步的分析处理,包括:(1)观测时间长度的对比;(2)数据处理软件和方法的对比分析;(3)参考基准的归算;(3)观测误差再分析.由于板块欧拉旋转速度存在误差,测站速度误差随着与定义框架的测站距离增加而变大,在研究距板块稳定区较远、变形范围大的板块边界变形时,采用单个板块的参考框架是不妥的.比较稳健的方法是利用周边板块内部稳定的测站定义参考框架,同时估计板块之间的旋转.考虑到堪察加位于板块交汇区,变形区域较大,Bürgmann 等<sup>[14]</sup>和 Steblov 等<sup>[19]</sup>在利用 GLOBK 软件进行数据处理时,选择位于 NM、EU 和 PA 板块上 38 个测站定义一个包括 3 个板块的参考框架,其中 14 个测站位于 NM 板块上,18 个测站位于 EU 板块上,6 个测站 PA 板块.综合以上分析,表 1 给出了堪察加半岛及其附近地区相对 NM 板块的速度场,对比 Steblov 等<sup>[19]</sup>给出的 9 个测站(BILI, FAIR, KAMS, MAG0, OMS1, OSSO, SEY2, SUS1, TAL1)的速度与表 1 中对应测站的速度可知,除 MAG0 测站外,二者的结果差异在 1 mm/a 之内.文献<sup>[4]</sup>和<sup>[14]</sup>的测站速度是利用更长观测时段数据得到的,

精度略高于 Steblov 等<sup>[19]</sup>的结果.

测站速度的名义误差有时可能会低估测站速度的真实误差,原因在于数据处理时只考虑了白噪声,而与时间相关的噪声并没有考虑<sup>[21]</sup>.为保守估计,本文重新估计各个测站的误差.定义与时间相关的中误差为:

$$\sigma_{\text{new}} = \sqrt{\sigma^2 + C^2/\Delta t^2}, \quad (1)$$

其中  $\sigma$  为原有的名义误差,  $\sigma_{\text{new}}$  为重新计算的测站速度误差,  $\Delta t$  为观测数据的时间跨度,以年为单位.参考 Argus 等<sup>[22]</sup>和 Larson 等<sup>[23]</sup>研究结果,  $C$  值取为 5.5,堪察加地区各测站重新计算的水平速度误差见表 1.

## 3 地壳水平运动速度场分析

从表 1 和图 2 可知,相对 NM 板块堪察加地区地壳水平运动速度总体上表现为:愈靠近东部板块汇聚区,测站水平速度越大,南部测站运动速度大于北部地区,水平运动方向总体上与太平洋板块在堪察加海沟沿 NW 方向的俯冲基本一致.运动速度最大的是位于白令岛的 \_BKI 测站,其北向和西向运动速度分别为 35.4 mm/a 和 34.6 mm/a,总体运动速度达到 49.50 mm/a.从运动方向来看该站与堪察加东海岸测站的运动方向基本一致.白令岛位于阿留申岛弧的最西端,靠近 PA 板块与 NM 板块的边界,运动性质为走滑变形,走滑方向基本上平行于阿留申海沟的西段,地质构造和地震活动性显示该区的地壳变形为沿走滑断层方向的较大范围的弥散性,震源机制显示白令岛处于走滑运动状态<sup>[24]</sup>.\_BKI 测站所处的特殊构造位置决定了其运动特征,它所具有的较大的运动速度反映了 NM 板块与太平洋板块北西向边界地区的强烈的走滑变形特征.

堪察加半岛北部 \_TIL 测站存在明显的南向和西向运动,速度分量明显大于其 2 倍中误差,该站靠近 BE 板块与 NM 板块的边界,从震源机制结果来看, \_TIL 所在地区受到 NW 向的推挤作用, \_TIL 的西向运动速度分量可能与此有关.该站附近发生了 2006 年  $M_s$ 8.2 级地震,震源深度 20 km(<http://www.globalcmt.org>), \_TIL 较大的运动矢量也可能与此地震有关. OSSO 测站与其西部的 \_TIG 测站运动差异运动不明显,这 2 个测站应同属于北美板块.靠近中部东海岸的 UKAM 具有较大的运动速度,三角形位错单元反演结果显示出其东部海域是边界耦合较强的区域,滑动缺失量为 80 mm/a,导

表 1 GPS 测站相对北美板块的运动速度及其误差  
Table 1 GPS velocities relative to North America Plate and their uncertainties

编号	测站	经度(°E)	纬度(°N)	$V_e$ (mm/a)	$V_n$ (mm/a)	$\sigma_e$ (mm/a)	$\sigma_n$ (mm/a)	$V_e$ 与 $V_n$ 相关系数
1	_KMS	166.211	62.456	0.44	1.88	0.85	0.85	0.001
2	_TIL	166.147	60.445	-4.60	-5.90	1.20	1.20	-0.003
3	_BKI	165.984	55.192	-34.60	35.40	1.10	1.10	0.000
4	OSSO	163.067	59.243	-0.01	1.14	2.23	2.20	0.000
5	UKAM	162.593	56.265	-12.22	9.04	2.07	2.06	0.002
6	KRON	160.856	56.318	-16.96	13.61	2.20	2.18	-0.002
7	_KLU	160.856	56.318	1.70	3.80	1.10	1.10	0.000
8	MAYS	160.062	56.254	-1.80	3.90	2.20	2.20	0.001
9	KOZY	159.865	56.042	-3.23	2.12	2.05	2.05	0.000
10	KRM9	159.481	54.025	-6.37	5.11	4.15	4.10	-0.006
11	NALY	159.197	53.142	-17.15	12.45	2.18	2.16	0.000
12	_ESI	158.697	55.930	-1.80	3.20	1.10	1.10	0.000
13	_TIG	158.686	57.759	-1.78	-1.67	1.67	1.65	0.001
14	MILK	158.623	54.693	-5.58	5.13	2.25	2.18	-0.003
15	PETP	158.607	53.067	-12.26	10.76	0.88	0.87	-0.001
16	KORC	158.213	53.280	-11.25	10.24	2.21	2.18	0.001
17	MALI	157.536	53.325	-9.10	9.20	2.40	2.50	-0.011
18	PAUZ	156.810	51.466	-14.24	5.15	2.21	2.20	0.004
19	UHAZ	156.738	57.091	-0.54	1.93	2.26	2.23	0.002
20	UBR2	156.575	52.928	-10.76	6.99	2.53	2.58	-0.206
21	UBR1	156.244	52.661	-10.05	6.46	2.30	2.25	-0.016
22	SOBL	155.962	54.304	-4.70	2.74	2.25	2.22	0.000
23	OMS1	155.770	62.518	-0.28	0.93	2.27	2.21	-0.003
24	TAL1	152.392	61.130	1.43	-2.47	2.30	2.23	-0.001
25	SEY2	152.422	62.925	-0.45	-0.65	1.19	1.17	0.001
26	MAG0	150.770	59.576	-1.85	-3.37	0.96	0.96	0.000
27	SUS1	148.168	62.779	0.53	-1.15	1.25	1.25	0.000
28	KUL1	147.431	61.883	1.87	-3.95	1.33	1.33	-0.001

致该测站运动速度较大<sup>[14]</sup>. UKAM 西南部的 KOZY、\_KLU、MAYS、\_ESI 测站分布相对集中,其东侧的俯冲带上壳幔耦合较弱.南部的 KORC、NALY、PETP 站运动矢量也很明显,在其东侧俯冲带上也是耦合较强的区域.虽然 PA 板块在堪察加半岛南部俯冲较深,但由于耦合较强,滑动缺失率为 70~83 mm/a,导致南端测站 PAUZ 也具有较高的运动速率.

位于马加丹地区 MAG0、KUL1、TAL1 和 SUS1 站都具有南向的运动分量,其中后 3 个站还具有东向运动特征,对比这 4 个测站与 SEY2、OMS1

测站的运动矢量,考虑其误差特征,前者与后者的运动方向和速率大小并无显著不同.虽然地震震源机制、活动断层和遥感图像解译推测 OK 与 NM 板块的边界从这些测站之间穿过<sup>[2,4,25]</sup>,但从目前的 GPS 观测结果来看,这 2 组测站之间速度矢量在统计上并无明显的差异,说明这两组测站所在地区不具有微板块边界活动特征.

图 3a 给出了从 \_BKI 测站开始直至马加丹地区,沿 N39°W 剖面的水平运动速度剖面(向西为正).从图 3a 可知,从堪察加东海岸到西海岸水平速度存在明显的梯度衰减特征,但这种衰减并不是线

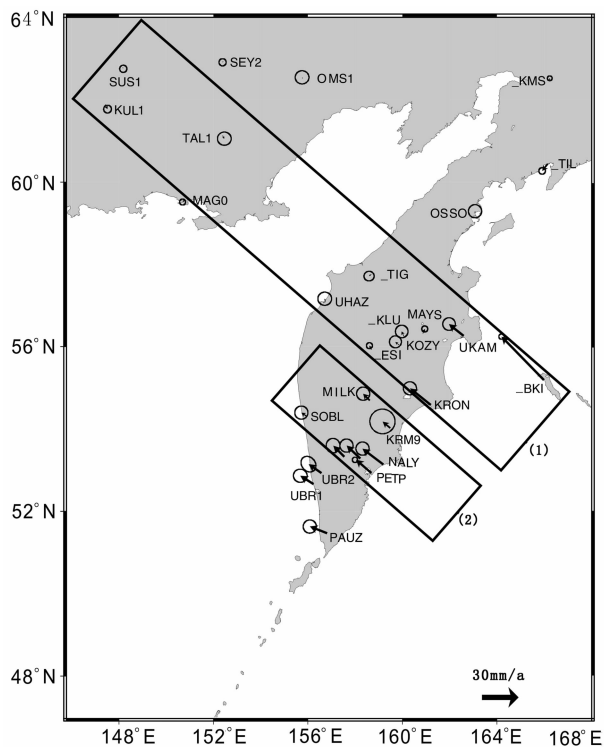


图2 GPS测站速度(相对北美板块)  
(2个长方形表示剖面所在区域)

Fig. 2 GPS site velocities relative to NOAM plate  
(The thin line boxes show the domains  
of 2 profiles shown in Fig. 3)

性的,显示了变形在剖面上的不一致性.利用堪察加半岛7个测站的速度估计速度衰减率为每百公里4.1 mm,位于马加丹地区的4个测站速度与堪察加中部和西部5个测站的相当,运动速率为(3~4)mm/a,与OK与NM板块边界走滑速率基本一致,表明马加丹地区的现今变形动力学机制与堪察加北部不同.从剖面(1)向南平移4°,同样作N39°W方向的剖面(原点在(162.4°E,52.1°N)),计算的速度衰减率为每百公里8 mm(图3b),显示出剖面(2)的速度衰减快于剖面(1).剖面(2)比剖面(1)处具有较深的俯冲深度,可能是二者速度衰减差异的原因.

对离散的速度矢量内插可以更好地显示研究区内位移矢量的总体运动特征<sup>[26]</sup>.利用格林函数方法对图2中的速度场进行样条函数插值分析<sup>[27~29]</sup>,考虑到堪察加半岛北部地区测站较少,如果选用所有测站的速度场进行样条内插,可能会引起内插结果失真,因此只选用南部地区的测站进行处理.选取张力系数为0.95,按照0.5°×0.5°进行网格内插.结果显示堪察加南部地区存在明显的顺时针旋转运动特征,南部变形明显大于半岛中部地区.这样的变形特征一方面可能与PA板块在南部和北部的俯冲速率和俯冲方向不同有关,另一方面也可能与俯冲带南北部耦合程度不同有关.

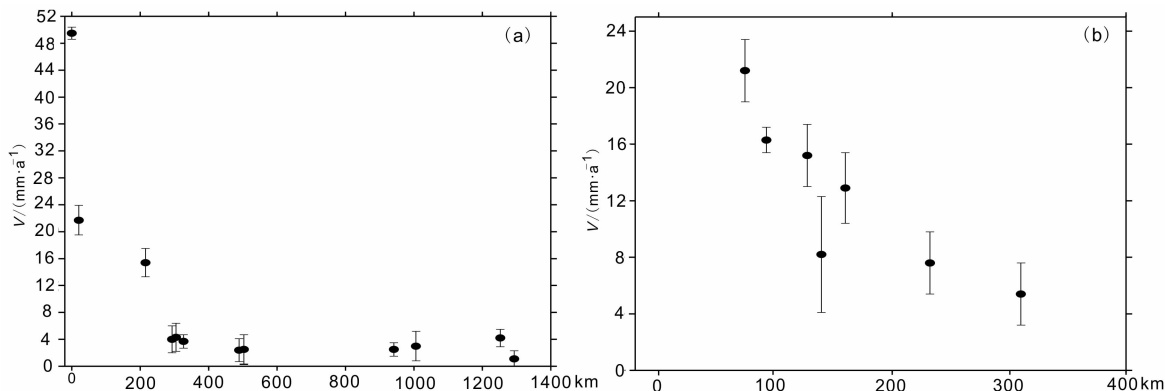


图3 沿剖面(1)(a)和剖面(2)(b)的N39°W向速度(向西为正)

Fig. 3 N39°W velocities along profile (1) (a) and profile (2) (b) as shown in Fig. 2

## 4 堪察加地区的地壳应变率场

### 4.1 计算方法

水平速度场空间分布的不一致性是地壳变形的直接反映,而应变场是地壳变形的主要参数.应变计算的前提是基于地壳连续变形假设,在小范围的图形单元区域,通过对速度场的差分求解图形单元的

平均应变.根据以上对水平速度场的分析,穿过堪察加半岛北部的微板块边界并不明显,该区所有测站都位于北美板块,堪察加地区的变形属于靠近板块边界的连续变形.因此可以利用该区所有测站的速度,借助Delaunay三角形图形单元<sup>[30]</sup>,利用加权最小二乘法进行应变率场解算.考虑到堪察加地区的纬度较高,利用GPS速度解算应变率应该在球坐标系中进行,这样可以减少平面投影对计算结果的

影响<sup>[31]</sup>.

球坐标系中 GPS 测站速度与图形单元平均应变率的关系可以表示为<sup>[32]</sup>:

$$u_{\phi} = -\bar{\omega}_{\theta}r_0 - \bar{\omega}_{\phi}r_0 \cos\theta_0 \Delta\phi + \bar{e}_{\phi\phi}r_0 \sin\theta_0 \Delta\phi + r_0 \bar{e}_{\phi\theta} \Delta\theta + \bar{\omega}_r r_0 \Delta\theta, \quad (2)$$

$$u_{\theta} = -\bar{\omega}_r r_0 \cos\theta_0 \Delta\phi + \bar{\omega}_{\phi}r_0 + \bar{e}_{\phi\theta}r_0 \sin\theta_0 \Delta\phi + r_0 \bar{e}_{\theta\theta} \Delta\theta - \bar{\omega}_r r_0 \sin\theta_0 \Delta\phi, \quad (3)$$

式中  $u_{\phi}, u_{\theta}$  分别为测站东向和北向速度;  $\phi, \theta$  分别为测站经度和余纬,  $\Delta\phi, \Delta\theta$  分别为测站与图形单元重心经度和余纬的差分,  $r_0$  为地球平均半径.  $\bar{\omega}_{\phi}, \bar{\omega}_{\theta}, \bar{\omega}_r$  分别为绕 3 个坐标轴的角速度;  $\bar{e}_{\phi\phi}, \bar{e}_{\theta\theta}, \bar{e}_{\phi\theta}$  分别为水平坐标轴轴向应变和剪切应变率. 每个图形单元刚体转动的欧拉极为  $\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p, \phi_p, \Omega_p\right)$ , 其中,

$$\Omega_p = \sqrt{\bar{\omega}_r^2 + \bar{\omega}_{\phi}^2 + \bar{\omega}_{\theta}^2}, \quad (4)$$

$$\theta_p = \arccos\left(\frac{\bar{\omega}_r \cos\theta_0 - \bar{\omega}_{\theta} \sin\theta_0}{\Omega}\right), \quad (5)$$

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{\bar{\omega}_r \sin\theta_0 \sin\phi_0 + \bar{\omega}_{\theta} \cos\theta_0 \sin\phi_0 + \bar{\omega}_{\phi} \cos\phi_0}{\bar{\omega}_r \sin\theta_0 \cos\phi_0 + \bar{\omega}_{\theta} \cos\theta_0 \cos\phi_0 - \bar{\omega}_{\phi} \sin\phi_0}\right). \quad (6)$$

利用表 1 中测站 EW 和 NS 向速度误差倒数的平方作为水平速度分量的权重, 由公式 (2), (3) 计算每个图形单元内三个应变率分量  $\bar{e}_{\phi\phi}, \bar{e}_{\theta\theta}, \bar{e}_{\phi\theta}$ , 并组成应变率张量矩阵, 通过求解矩阵特征值和特征矢量得到图形单元的主应变率、主应变率方向及其误差. 同时进一步计算有效应变率分量, 其定义为<sup>[33,34]</sup>:

$$\dot{E} = \sqrt{\frac{\dot{e}_{ij} \dot{e}_{ij}}{2}}, \quad (7)$$

其中  $\dot{e}_{ij}$  为应变率张量的分量,  $i=1, 2, j=1, 2$ , 采用哑指标求和约定.

利用三角形单元计算应变时, 图形单元的形状对单元平均应变率的计算精度有一定的影响, 只有形状因子在阈值之内的图形单元, 其应变率精度与所采用的测站速度精度相当<sup>[35]</sup>. 首先计算各图形单元的形状因子, 只有形状因子在阈值之内的单元才参与后续的应变率计算. 利用 28 个 GPS 测站形成 41 个三角形图形单元, 其中图形因子满足阈值条件的有 36 个. 利用这 36 个三角形单元计算每个单元的最大主应变率、最小主应变率, 同时也计算了各三角形单元的周长、面积. 结果表明各三角形单元最大主应变率与其周长的相关系数为 -0.21, 与其面积的相关系数为 -0.20, 最小应变率与其周长的相关系数为 0.20, 最小应变与其面积的相关系数为

0.24, 面应变率与其周长的相关系数为 0.10, 与其面积的相关系数为 0.15, 说明主应变率、面应变率与图形单元大小没有明显的相关性, 本文在球坐标系中解算的应变率真实反映了图形单元的平均应变率特征.

为了削弱可能的异常点运动速度的影响, 并考察图形单元改变对应应变率结果的影响程度, 在测站相对较密的中部和南部, 把相邻 4~7 个测站组成新的图形单元, 利用加权最小二乘法计算图形单元内的应变率参数, 一共组成 5 个多边形单元. 结果显示多边形与三角形单元计算的应变率分量在量值和方向上基本一致.

## 4.2 应变率场分析

主应变率计算结果(图 4)显示出堪察加地区整体上主压应变率大于主张应变率, 主压应变率量值明显表现出区域上的差异性, 中部、中南部东海岸图形单元的主压应变率明显高于西海岸和马加丹地区, 中部东海岸主压应变率大于南端和北部地区. 有 7 个图形单元的主压应变率达到  $10^{-7}/a$ , 其中 KRON、KRM9、NALY 组成的图形单元主压应变率最大, 达到  $-2.78 \times 10^{-7}/a$ , 其次是 KRM9、PETP 和 NALY 组成的图形单元, 其值为  $-2.2 \times 10^{-7}/a$ . 堪察加中西部、西海岸以及马加丹地区的主应变率在  $(10^{-9} \sim 10^{-8})/a$  之间, 在 95% 的置信水平主应变率不显著. 整体上主压应变率的方向与 PA 板块的俯冲方向基本一致, 也与李延兴等<sup>[36]</sup>给出的弹性运动模型一致. 中南部 4 个图形单元主压应变方位角在  $116^{\circ} \sim 125^{\circ}$  之间, 中北部 3 个图形单元主压应变率变方向在  $125^{\circ} \sim 156^{\circ}$  之间, 显示出顺时针偏转特性.

从其他应变率分量结果(图 5)来看, 所有分量都具有东部海岸大于中部和西海岸、EW 向梯度衰减的特点. EW 向应变率结果表明, 堪察加半岛大部分地区处于 EW 向压缩状态, 中部 ( $160^{\circ}E, 57^{\circ}N$ ) 附近存在一个椭圆形的拉张区(图 5a). NS 向应变率结果显示堪察加半岛整体上也具有 NS 压缩的特点, 南部顶端和中部 ( $160.5^{\circ}E, 56^{\circ}N$ ) 附近存在局部的拉张区(图 5b). 第一剪切应变率度量 EW 向伸长和 NS 向压缩的纯剪切部分. 堪察加半岛东海岸第一剪切应变率为负值区, 而中北部 ( $160^{\circ}E, 57.5^{\circ}N$ ) 附近存在一个椭圆形的正值区(图 5c). 第二剪切应变率定义为坐标轴之间夹角的变化, 度量 NE-SW 向伸长和 NW-SE 向压缩的纯剪切变化. 第二剪切率分布结果显示整个堪察加地区都为负值区((图 5d),

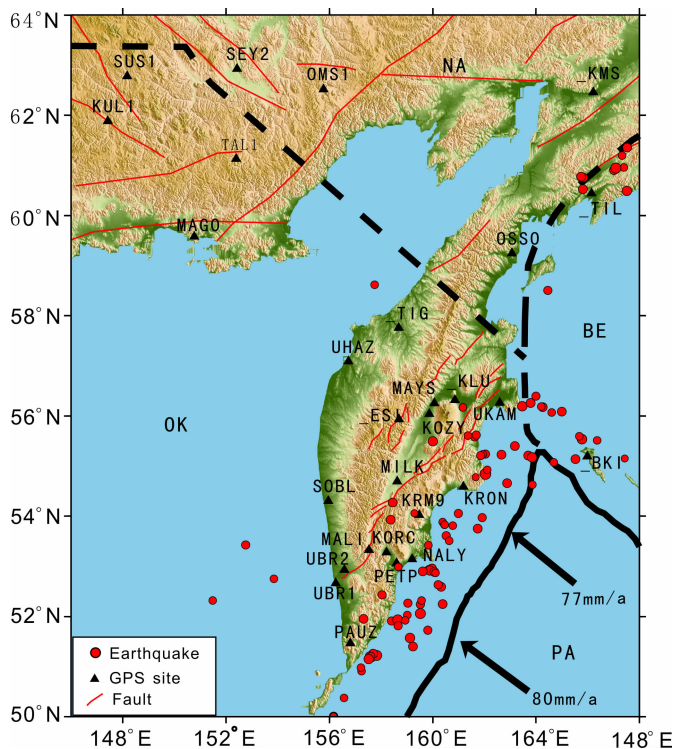


图 1 堪察加及其附近区域构造与 GPS 测站分布  
 红线为第四纪断层,黑实线表示确定的板块边界<sup>[4]</sup>,黑虚线表示推测的板块边界<sup>[5]</sup>.  
 PA,NA,OK, BE 分别代表 PA、北美、鄂霍茨克、白令板块.

Fig. 1 Tectonic configuration and GPS site distribution in Kamchatka and its adjacent zones  
 Red thin lines represent Quaternary faults, plate boundaries are plotted after Seno et al. <sup>[4]</sup>, Mackey et al <sup>[5]</sup>.  
 PA,NA,OK, BE represent Pacific, North American, Okhotsk, Bering plates, respectively.

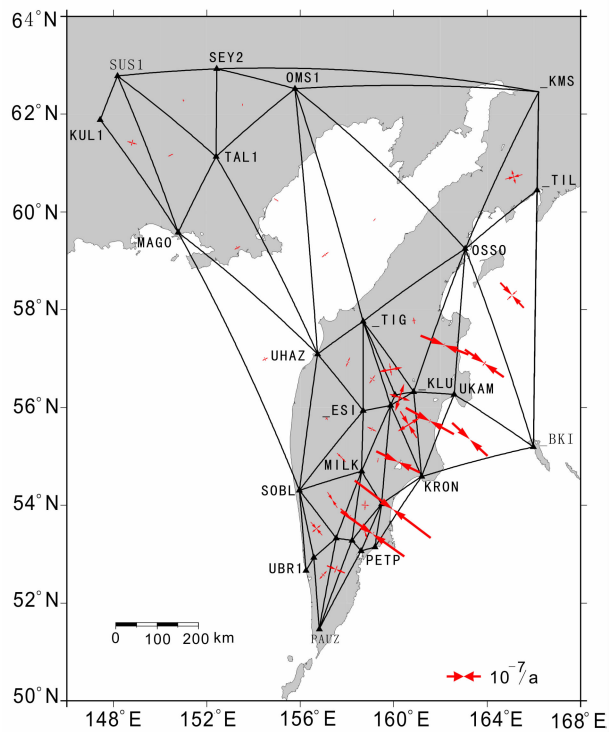


图 4 主应变分布(单位:  $10^{-7}/a$ )

Fig. 4 Principal strain rates (unit:  $10^{-7}/a$ )

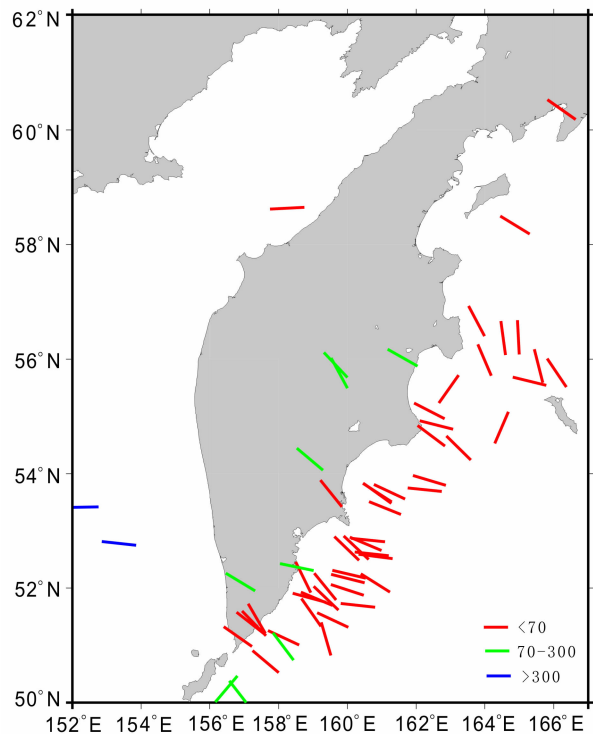


图 6  $M_w \geq 5$  地震震源机制主压应力轴  
 在水平方向的投影(震源深度单位: km)

Fig. 6 Distribution of principal compression axis projected on horizon for  $M_w \geq 5$  earthquakes (focal depth unit: km)

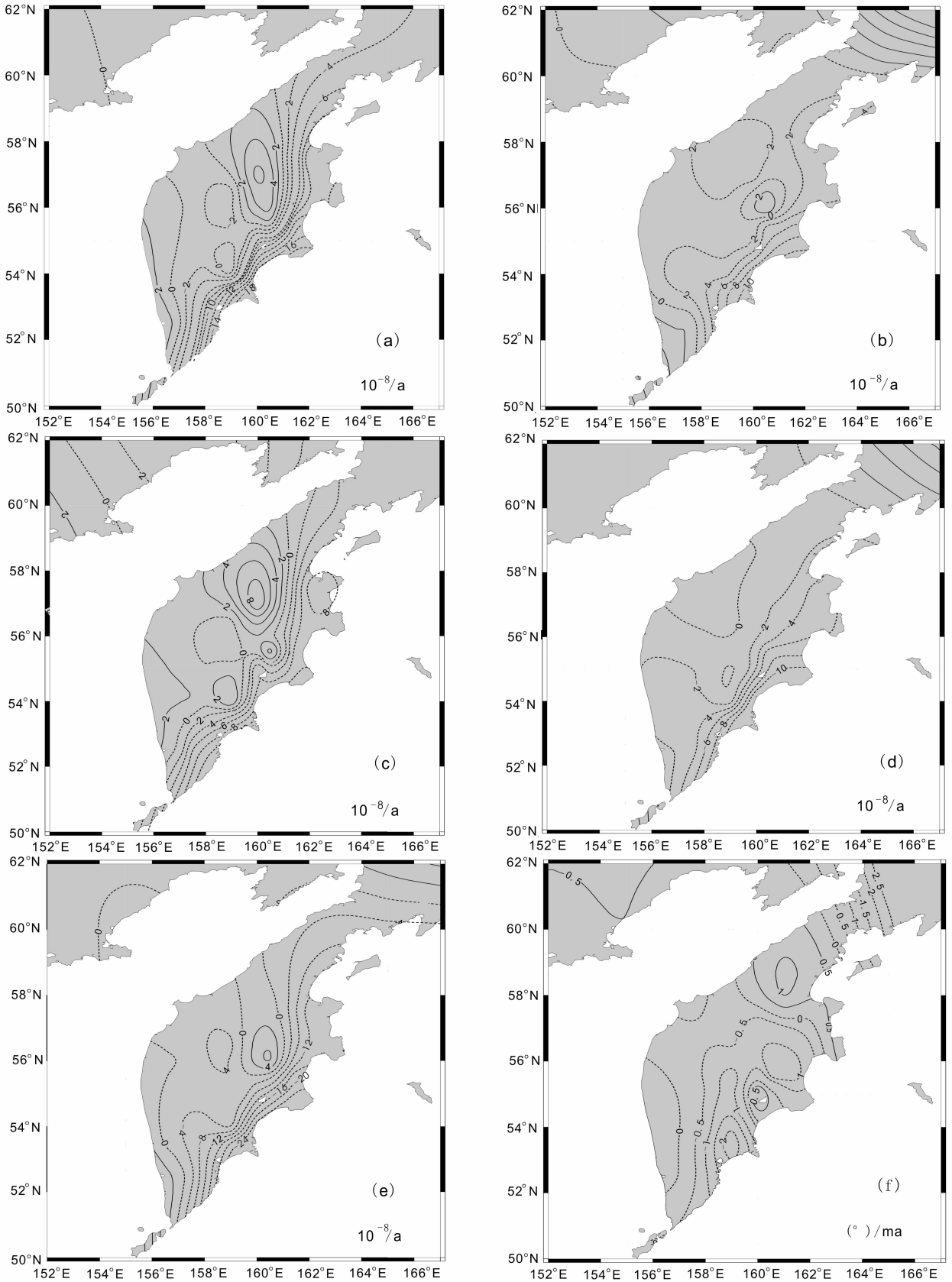


图5 堪察加地区应变率场和水平旋转率

(a)EW 向应变率;(b)NS 向应变率;(c)第一剪切应变率;(d)第二剪切应变率;(e)面应变率;(f)水平旋转率.

Fig. 5 Strain rate fields and horizontal rotation rate

(a)EW-trending;(b)NS-trending ;(c)First shear strain rate;(d)Second shear strain rate; (e)Dilation strain rate;(f)Horizontal rotation rate.



表 2 堪察加半岛南部、北部和马加丹地区主应变率分量

Table 2 Principal strain rate for southern and northern Kamchatka and Magadan

区域	经度 (°E)	纬度 (°N)	主张应变率		主压应变率		主压应变方位角	
			值( $1.0^{-8}/a$ )	误差( $1.0^{-8}/a$ )	值( $1.0^{-8}/a$ )	误差( $1.0^{-8}/a$ )	值(°)	误差(°)
南部	158.66	54.62	0.610	0.512	-4.441	0.722	317.534	5
北部	161.60	60.46	0.888	1.272	-4.829	0.919	341.291	8
马加丹	149.69	61.34	1.400	1.340	0.598	0.913	301.133	8

注:主张应变率和主压应变率,正值为拉张,负值为压缩。

表明 NE-SW 向压缩为主的变形特征. 面应变结果 (图 5e) 显示堪察加半岛绝大部分为压缩区, 在 ( $160.1^{\circ}E, 56.2^{\circ}N$ ) 附近存在长轴为近南北向的椭圆形拉张区, 最南端也具有一定的拉张性. 图 5f 给出了图形单元水平转动率结果, 正值为逆时针转动, 负值为顺时针转动, 结果表明堪察加大部分地区为顺时针转动, 中北部和中部东海岸 ( $160.1^{\circ}E, 54.8^{\circ}N$ ) 附近存在 2 个局域性的逆时针旋转区, 南端顺时针旋转性明显, 与高张力样条函数内插速度场给出的结果一致. 北部地区也是顺时针转动特征明显的地区.

有效应变率分量结果表明大多数图形单元的有效应变率在 95% 的置信水平是显著的, 东部有效应变率明显大于西部地区的, 从东部至西部呈明显的梯度衰减关系, 与全球应变模型<sup>[37]</sup> 给出的该区有效应变结果一致. 东南部海岸存在一个较高梯度的变形区, 可能与该区东南部俯冲带耦合强度较高有关.

把 GPS 测站按照堪察加半岛南部、北部和马加丹 3 个区分组, 分别计算这 3 个地区的主应变率 (表 2), 结果显示南部和北部地区主压应变率大于主张应变率. 南部主压应变率方向与 PA 板块的俯冲方向一致, 北部主压应变率方向相对南部方位角增大  $23.8^{\circ}$ , 表现为顺时针的偏转. 马加丹地区主张应变率大于主压应变率, 其主压应变率比南部和北部地区小一个数量级, 而主张应变率大一个量级, 主张应变的方向基本上垂直 OK 与 NM 板块的边界方向. 此外, 在南部地区利用高张力样条函数按  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  内插的速度场, 我们计算每个四边形图形单元的主应变率, 通过与 GPS 速度场直接计算的应变率对比, 显示出二者有较好的一致性.

## 5 讨论

板块动力学研究认为, 由于北美板块相对欧亚

板块的汇聚, 导致鄂霍茨克海地区向东南方向挤出<sup>[25]</sup>. 堪察加半岛北部中强以上地震的滑动矢量在水平方向投影的方位角为  $100^{\circ}$  左右, 显示出堪察加半岛北部地壳变形为右旋挤压型<sup>[2,4]</sup>; 断层活动特征研究显示出相似的结果<sup>[38]</sup>. Seno 等<sup>[4]</sup> 利用板块模型预测堪察加半岛和马加丹北部相对 NM 板块的运动为  $8 \text{ mm/a}$ , 马加丹东北部为 EW 方向运动, 堪察加半岛北部为 WNW-ESE 方向运动, 地震滑动矢量反演结果认为相对运动小于  $5 \text{ mm/a}$ <sup>[39]</sup>, 与最新的板块边界模型<sup>[40]</sup> 基本一致. Apel 等<sup>[6]</sup> 根据东北亚以及阿拉斯加地区的 GPS 观测数据建立板块运动模型, 预测 OK 与 NM 板块边界左旋运动为  $3 \text{ mm/a}$ <sup>[6]</sup>. 我们把马加丹北部的 TAL1、SEY2 和 OMS1 站的速度分别投影到可能的 NM 与 OK 板块边界的走向和垂向方向, 在不考虑边界弹性应变的情况下, 计算 OK 与 NM 板块在马加丹北部的运动特征. 根据 TAL1 和 SEY2 测站得到的结果为左旋运动速率  $4.0 \pm 3.1 \text{ mm/a}$ , 拉张运动  $0.71 \pm 1.2 \text{ mm/a}$ ; 根据 TAL1 和 OMS1 测站计算的结果为左旋运动速率  $3.3 \pm 2.5 \text{ mm/a}$ , 拉张运动为  $0.96 \pm 1.6 \text{ mm/a}$ . 在 95% 的置信水平, 左旋运动和拉张运动并不显著. 因此, 从现有的 GPS 观测结果来看, 前人利用地震分布、震源机制和地质构造提出的穿过堪察加半岛北部的 NM 和 OK 板块边界并不明显, 马加丹地区和堪察加北部不具有板块边界活动的特征. 为解释堪察加北部的震源机制特征, Mackey 等<sup>[5]</sup> 提出了白令海板块的存在性问题, 认为 BE 板块相对 NM 板块为顺时针转动, 在堪察加北端 BE 板块相对 NM 板块为 WNW-ESE 向的挤压. 从目前的 GPS 观测结果来看 (图 2), 堪察加北部\_TIL 测站是靠近 BE 与 NM 板块边界最近的测站, 该站具有向西南方向的运动特征, 从速率大小来看看, 西向和南向运动在 95% 的置信水平是显著的, 但是由于测站距离 2006 年 4 月 21 日  $M_s 8.2$  级地震的震中只有  $15 \text{ km}$ , 所以其运动速度可能与该地震有关. 堪

察加半岛最北端的\_KMS 测站距离震中 173 km,同时也靠近前人提出的 BE 和 NM 板块边界,但运动速度并不显著.综合对比这 2 个测站的运动特征,从现有较少的 GPS 测站及其运动速度来看,在堪察加东北部,不具有板块边界典型运动特征,BE 板块无法从 NM 板块中单独划分出来.总的来说,根据现今 GPS 观测得到的速度场结果,在堪察加半岛北部不存在前人提出的 BE 以及 OK 板块边界,该区的变形是太平洋板块向北美板块俯冲的响应结果.

利用 GPS 观测结果导出的 PA-NM 板块的相对欧拉矢量<sup>[18]</sup>,我们计算了 PA 板块在堪察加半岛东南部对 NM 板块的推挤速度.计算结果表明,在 47°N 附近,PA 板块向西北方向推挤的速度为 83 mm/a,方位角为 124°;在 50°N 附近,推挤的速度减少为 80 mm/a,方位角改变为 127°;在 PA 板块与 NM 板块交汇部位,推挤的速度继续减少为 77 mm/a 左右,而方位角改变为 130°.俯冲方位角度的改变可能是堪察加半岛 GPS 速度场顺时针旋转、主压应变率方位角在北部大于南部的的主要原因.

利用美国国家地震信息中心(NEIC)给出的 1982 年 5 月~2007 年 3 月  $M_w \geq 5.0$  地震的震源机制结果,我们计算了主压应力轴在水平方向的投影(图 6).结果显示主压应力轴在水平方向的投影具有较好的一致性.浅源和中源地震的主压应力轴的平均方向为 135°左右,在堪察加海沟与阿留申海沟的交汇区及其以北地区,主压应力轴水平方向的投影存在顺时针的偏转,方位角大约为 150°.我们对主压应力轴倾角进行了统计分析,显示出 85% 以上地震的主压应力轴倾角大于 50°,70% 以上地震的主压应力轴倾角大于 60°.从地震深度分布来看,在 50°N 附近,最大的地震深度大约为 500 km;在 55°N 附近则为 300 km 左右;在堪察加海沟与阿留申海沟的交汇区及其以北地区,震源深度小于 70 km.55°N 以南地区,PA 板块的俯冲角度一致性地表现为 55°左右;在 55°以北地区,俯冲板舌的倾角减小为 35°左右<sup>[41,42]</sup>.堪察加地区的地震主要是高倾角逆冲型,与 PA 板块的俯冲特征符合.

根据地震类型、古海啸沉积物和火山岛弧的走向,认为 PA 板块在堪察加半岛的消减边界曾经延伸到堪察加与阿留申交汇区的北部<sup>[43]</sup>.从 GPS 的观测结果来看,堪察加半岛北部的 GPS 测站并没有表现出明显的与 PA 板块俯冲方向一致的北西向运动,可能说明了 PA 板块目前的消减边界限制在 PA 板块与阿留申岛弧的交界区附近.

最新的活动断层探槽研究表明,在过去的 9 千年内,堪察加半岛中部(161°E, 55.5°N)至少发生了 3 次大的破裂事件,平均间隔是 800 年左右,最近的一次发生在 1500~1300 年,因此认为该区可能已经积累了较高的构造应变<sup>[43]</sup>.从本文计算结果来看,该区属于应变率分量梯度高值区.

## 6 结 论

利用堪察加及马加丹地区 1995~2005 年以来的 GPS 观测数据,研究了该区现今地壳水平运动速度场和应变场的空间分布特征,并与地震学和地质学研究结果进行了综合对比分析.得到以下基本结论:

(1)堪察加半岛北部不存在微板块边界特征.水平运动速度场愈靠近 PA 与 NM 板块俯冲带,测站水平速度越大,堪察加半岛南部测站运动速度大于北部和中部地区.从堪察加半岛东海岸到西海岸,水平速度存在明显的梯度衰减特征,但这种衰减并不是线性化的,显示了变形在空间上的非均匀性和复杂性,水平运动方向与 PA 板块向西北的俯冲方向基本一致.

(2)堪察加半岛应变率分量都具有东部海岸大于中部和西海岸、东西向梯度衰减的特点.大部分地区处于 EW 和 NS 向压缩状态,局部存在拉张区.东海岸第一剪切应变率为负值,中北部(160°E, 57.5°N)附近存在椭圆形的正值区;第二剪切率分布结果显示整个堪察加地区都为负值.面应变结果表明堪察加绝大部分为压缩区;刚性转动结果显示堪察加大部分地区为顺时针转动,北部地区和南端顺时针旋转特征明显.东部有效应变率明显大于西部地区,东西向梯度衰减关系明显.

(3)总体上堪察加地区主压应变率明显大于主张应变率,特别是在东海岸地区.中北部的主压应变率方位角相对中南部具有顺时针偏转的特征.主压应变率方向与中等以上浅源和中源地震的主压应力轴在水平方向的投影基本一致.

(4)堪察加地区现今地壳变形反映了 PA 板块边界在北西方向对 OK 板块俯冲的结果.变形场在空间分布上的不一致性与 PA 板块在堪察加半岛东南部的俯冲深度、俯冲方位角、俯冲板舌的倾角和俯冲带的耦合程度有关.

致 谢 李延兴研究员给予了热情帮助,俄罗斯科学院地球物理研究所提供了俄罗斯远东活断层数据

和地震资料,审稿专家提出了宝贵的修改意见,作者在此一并致谢。

## 参考文献(References)

- [1] Gordeev E I, Gusev A A, Levin V E, et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America Plate junction from GPS data. *Geophys. J. Int.*, 2001, **147**: 189~198
- [2] Cook D B, Fujita K, McMullen C A. Present-day interactions in Northeast Asia: North American, Eurasian, and Okhotsk Plates. *J. Geodyn.*, 1986, **6**:33~51
- [3] Savostin L, Zonenshain L, Baranov B. Geology and plate tectonic of the sea of Okhotsk. Am Geophys Union. *Geodynamics ser.*, 1983, **11**:189~221
- [4] Seno T, Sakurai T, Stein S. Can the Okotsk plate be discriminated from the North American plate? *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(B5):11305~11315
- [5] Mackey K G, Fujita K, Gunbina L V, et al. Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block. *Geology*, 1997, **25**(11):979~982
- [6] Apel E V, Bürgmann R, Steblov G M, et al. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L11303, doi:10.2929/2006GL026077
- [7] Tibaldi A. Recent surface faulting investigated in Kamchatka volcanic arc. *Eos Trans. AGU*, 2004, **85**(14):133, 134, 141
- [8] Arugs D F, Michael B H. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(15): 1973~1976
- [9] Beavan J, Tregoning P, Bevis M, et al. Motion and rigidity of the pacific plate and implications for plate boundary deformation. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(2261), doi:10.1029/2001JB000282
- [10] Kahle H, Cocard M, Peter Y, et al. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian plates. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B10): 23353~23370
- [11] McClusky S, Balassanian S, Barka A, et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B3):5695~5719
- [12] Shen Z K, Lü J, Wang M. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B11409, doi:10.1029/2004JB003421
- [13] Bürgmann R, Kogan M G, Levin V E, et al. Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsk, Kamchatka, earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(7):1331~1334
- [14] Bürgmann R, Kogan M G, Steblov G M, et al. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B07405, doi: 10.1029/2005JB003648
- [15] Gordeev E, Levin V, Kasahara, et al. GPS monitoring in Kuril-Kamchatka and Aleutian arcs junction. *Eos Trans. AGU*, 1999, **80**(46):948
- [16] Kogan M, Steblov M K, King R W, et al. Geodetic constraints on the rigidity and relative motion of Eurasia and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(14):2041~2044
- [17] Takashi H, Kadahara M, Kimata F, et al. Velocity field of around the Sea of Okotsk and Sea of Japan regions determined from a new continuous GPS network. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**(16):2533~2536
- [18] Sella G F, Dixon T H, Mao A. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, B4, 2081 doi:10.1029/2000JB000033
- [19] Steblov G M, Kogan M G, King R W, et al. Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**:2041~2044
- [20] Prawirodirdjo L, Bock Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, B08405, doi:10.1029/2003JB002944
- [21] Mao A, Harrson C, Dixon T H. Noise in GPS coordinates times series. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 2797~2816
- [22] Argus D F, Gordon R G. Tests of the rigid-plate hypothesis and bounds on intraplate deformation using geodetic data from very long baseline interferometry. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:13555~13572
- [23] Larson K M, Freymueller J T, Philipson S. Global plate velocities from Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:9961~9981
- [24] Geist E L, Scholl D W. Large-scale deformation related to the collision of the Aleutian arc with Kamchatka. *Tectonics*, 1994, **13**:538~560
- [25] Riegel S, Fujita K. Extrusion tectonics of the Okhotsk plate, Northeast Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(7):607~610
- [26] England P, Molnar P. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B12401, doi: 10.1029/2004JB003541
- [27] Wessel P, Bercovici D. Interpolation with splines in tension: A Green's function approach. *Mathematical Geology*, 1998, **30**:77~93
- [28] Gan W, Prescott W H. Crustal deformation rates in central and eastern U. S. inferred from GPS. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(19):3733~3736
- [29] Jin S, Park P H. Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements. *Earth Planets Space*, 2006, **58**: 529~534
- [30] 孟国杰, 申旭辉, 伍吉仓等. GPS 地壳形变监测网应变解算方法与程序设计. 大地测量与地球动力学, 2006, **26**(2):70~74  
Meng G J, Shen X H, Wu J C, et al. Strain computation methods of GPS network in crustal deformation monitoring

- and program design. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2006, **26**(2):70~74
- [31] 石耀霖,朱守彪. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论. 大地测量与地球动力学, 2006, **26**(1):1~8  
Shi Y L, Zhu S B. Discussion on methods of calculating strain with GPS displacement data. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2006, **26**(1):1~7
- [32] Savage J C, Gan W, Svarc J L. Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B10):21995~22007
- [33] Kreemer C, Holt W E, Haines A J. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation. *Geophys. J. Int.*, 2003, **154**:8~34
- [34] Calais E, Dong L, Wang M, et al. Continental deformation in Asia from a combined GPS solution. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L24319, doi:10.1029/2006GL028433
- [35] 伍吉仓,邓康伟,陈永奇. 三角形形状因子对地壳形变计算精度的影响. 大地测量与地球动力学, 2003, **23**(3):26~30  
Wu J C, Deng K W, Chen Y Q. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2003, **23**(3):26~30
- [36] 李延兴,张静华,何建坤等. 由空间大地测量得到的太平洋板块现今构造运动与板内形变应变场. 地球物理学报, 2007, **50**(2):437~447  
Li Y X, Zhang J H, He J K, et al. Current-day tectonic motion and intraplate deformation-strain field obtained from space geodesy in the Pacific Plate. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2):437~453
- [37] Kreemer C, Haines J, Holt W E, et al. On the determination of a global strain rate model. *Earth Planets Space*, 2000, **52**:765~770
- [38] Kozhrin A I. Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction. *Tectonophysics*, 2004, **380**:273~285
- [39] Demets C. A test of present-day plate geometries for northeast Asia and Japan. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(B12):17627~17635
- [40] Bird P. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, **4**(3):1~52
- [41] Gorbatov A, Kostoglodov V, Suárez G. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(B8):17883~17898
- [42] Park J, Vadim L, Mark B, et al. A dangling slab, amplified arc volcanism, mantle flow and seismic anisotropy in the Kamchatka plate corner. In: Stein S, et al. eds. *Global Plate Boundary, Geodynam, Series. Am. Geophys. Union*, 2002, **30**:295~324
- [43] Gordeev E, Kasahara M, Eichelberger J. Return to Petropavlovsk-Kamchatsky: Subduction in the Far North. *Eos Trans. AGU*, 2004, **85**(44):452~453

(本文编辑 胡素芳)