青藏高原现今高分辨率地壳运动特征

方　颖，江在森，张　晶，武艳强

中国地震局地震预测研究所，北京　100036

摘要：利用 GPS 资料，采用最小二乘配置和小波技术分析了青藏高原的地壳运动特征，对该区地壳运动强度和涡旋运动进行了定量分析. 结果显示，青藏高原地壳运动强度沿喀喇昆仑断裂、玛尼—玉树—鲜水河—小江的弧型构造带，自西向东递减. 川滇菱形块体显示出北强南弱、西强东弱的特点，东边界形成明显的分界线，而西边界并不明显；青藏高原存在 3 个涡旋分区：顺时针旋转的拉萨、羌塘及川滇中西部地区，亚东—谷露断裂以东的区域为其涡旋高值区；逆时针旋转的柴达木地块及其以北的地区，西昆仑断裂与阿尔金断裂之间为其高值区；逆时针旋转的青藏高原与华南地块的边界带，龙门山与安宁河的拐角处为其高值区.

关键词：地壳运动；涡旋运动；青藏高原；GPS.

中图分类号：P553　　**文章编号**：1000—2383(2009)03—0399—06　　**收稿日期**：2008—10—21

High-Resolution Characteristics of Recent Crustal Movement in Qinghai-Tibet Plateau

FANG Ying, JIANG Zai-sen, ZHANG Jing, WU Yan-qiang

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

Abstract: Characteristics of current crustal movement in Qinghai-Tibet Plateau were analyzed with least square collusion and wavelet using GPS data, and crustal movement strength and vortex movement were analyzed quantitatively. The conclusions are drawn as follows: The crustal movement strength in Qinghai-Tibet Plateau decreases from west to east along arc tectonic ruptures formed by Kala-Kunlun, Mani, Yushu, Xianshuihe and Xiaojiang faults. The crustal movement strengths in north and west are stronger than those of south and east in the Sichuan-Yunnan block, of which east boundaries are obvious, and west boundaries are not. There are three vortex zones in Qinghai-Tibet Plateau. Firstly, Lhasa, Qiangtang, and mid-west of Sichuan-Yunnan region clockwisely rotate, and areas to east of Yadong-Gulu are high-value areas. Secondly, Qaidam block and that to its north counterclockwisely rotate, and high-value areas are between West Kunlun and Altun. Thirdly, the boundaries of Qinghai-Tibet Plateau and southern China block counterclockwisely rotate, and high-value areas are in the corner of Longmenshan and Anninghe.

Key words: crustal movement; vortex movement; Qinghai-Tibet Plateau; GPS.

青藏高原是地球科学研究的宝库，它在东亚大陆动力学研究中具有举足轻重的作用. 近年发展起来的 GPS 技术，对推动青藏高原地壳运动特征及动力学环境的研究具有十分重要的意义，使青藏高原现今运动与变形的研究进入了一个新的阶段，并形成了一些宝贵的认识. 活动地块假说(张国民和张培震，2000)把青藏高原划分成 6 个次级地块，分别为拉萨活动地块、羌塘活动地块、巴颜喀拉活动地块、柴达木活动地块、祁连活动地块和川滇活动地块；在印度板块的向北推挤下，青藏高原的地壳物质向东流动，并在周边刚性地块阻挡下围绕东构造结发生顺时针旋转(张培震等，2002)；GPS 监测获得高原北部地壳水平运动速率，发现两个涡旋构造(马宗晋等，2001；唐文清等，2005；陈智梁等，2006). 已有的研究成果构成了青藏高原的整体运动格局，但在高分辨特征的认识方面，仍缺乏较为详尽的描述.

基金项目：地震预测研究所基本科研业务专项(No. 0207690201)；国家自然科学基金项目(No. 40674010)；“十一·五”科技支撑项目(Nos. 2006BAC01B02-02-02，2006BAC01B02-02-05).

作者简介：方颖(1968—)，女，副研究员，主要从事 GPS 与断层活动性研究. E-mail：powersohi@163.com

本文依托 GPS 资料、借助单元网格方法，从高低频、多分辨率的角度研究青藏高原地壳运动的特征，不仅对青藏高原运动、旋转的整体性进行描述，更试图对其局部特征进行高分辨的认识.

1 观测资料与数据分析处理方法

1.1 观测资料的处理

本研究主要采用来自中国地壳运动观测网络的观测数据，其中包括 25 个基准台的连续观测(1998 年 7 月—2004 年 10 月)、56 个基本台的 7 期观测(1998—2004 年)和 200 多个区域台的 3 期流动观测数据(1999、2001、2004 年). GPS 数据的处理(Shen *et al.*, 2000)分 3 步进行：第 1 步用 GAMIT 软件处理 GPS 原始观测数据，获取测站和卫星轨道的单日松弛解；第 2 步用 GLOBK 软件将每日松弛解和 SOPAC(Scripps Orbital and Permanent Array Center)产出的全球 IGS 跟踪站的单日松弛解合并，得到包含所有 GPS 测站的单日松弛解；第 3 步用 QOCA 软件综合所有单日松弛解估算各个测站的位置和速度(王敏等，2003)；最后得到欧亚基准下的中国大陆速度场(图 1). 本文在此速度场结果的基础上，进行进一步的分析和解释.

1.2 青藏高原水平位移速度场连续分布的获取

本文的分析中要用到连续分布的水平速度场. 由于 GPS 站点不均匀，需对水平速度场进行插值. 目前用于空间插值的方法很多，如最小二乘配置、曲面函数拟合等. 本文选取最小二乘配置法.

1.2.1 最小二乘配置法简介 最小二乘配置或最小二乘估计法最先应用在重力场方面，应用重力观测资料进行插值获得大范围重力场(Moritz, 1963)，后来该方法被推广应用于利用大地测量资料研究地壳垂向运动速率(Fujii and Xia, 1993). 近年来最小二乘配置法在计算连续速度场、地应变场方面得到越来越多的应用(Kato *et al.*, 1998; Ei-Fiky *et al.*, 1999; 江在森等, 2000, 2001; 章传银等, 2007).

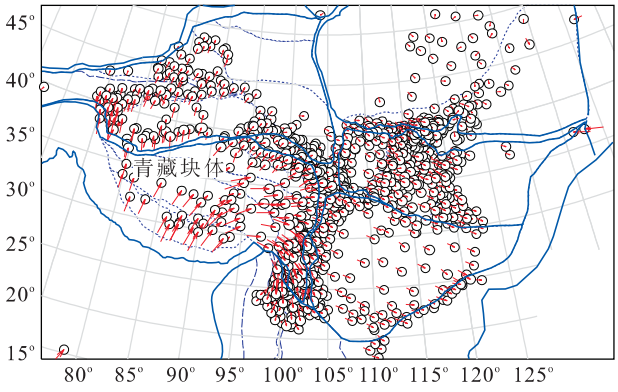

图 1 欧亚基准下的中国大陆速度场(1999—2004 年)

Fig. 1 Velocity field of Mainland China on European and Asian benchmark (1999—2004)

具体方法介绍如下：

设 $\boldsymbol{L}$ 为已知观测值向量，t 为要滤波的已测点信号，$\boldsymbol{n}$ 为观测误差向量，s 是待估算点信号，t 和 $\boldsymbol{n}$ 都是中心分布的. 那么最小二乘配置的基本方程为：

$$\boldsymbol{L} = t + \boldsymbol{n}, \tag{1}$$

则：

$$\hat{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{C}_{tt}(\boldsymbol{C}_{tt} + \boldsymbol{C}_{nn})^{-1}\boldsymbol{L}, \tag{2}$$

$$\hat{s} = \boldsymbol{C}_{st}(\boldsymbol{C}_{tt} + \boldsymbol{C}_{nn})^{-1}\boldsymbol{L}, \tag{3}$$

式(2)、(3)中，$\boldsymbol{C}_{tt}$ 为已测点信号 t 的先验自协方差矩阵；$\boldsymbol{C}_{nn}$ 为观测误差的自协方差阵；$\boldsymbol{C}_{st}$ 为待估算点信号与已测点信号 t 之间的协方差. 经推算的 $\hat{s}$ 的协方差为：

$$\boldsymbol{C}_{\hat{s}\hat{s}} = \boldsymbol{C}_{ss} - \boldsymbol{C}_{st}(\boldsymbol{C}_{tt} + \boldsymbol{C}_{nn})^{-1}\boldsymbol{C}_{ts}. \tag{4}$$

将某一坐标为(x, y)的待估算点的位移表示为(u, v)，用 $c(a, b)$表示变量 a、b 间的协方差，于是由式(3)可得：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c(u,u_1),\cdots,c(u,u_m),c(u,v_1),\cdots,c(u,v_m) \\ c(v,u_1),\cdots,c(v,u_m),c(v,v_1),\cdots,c(v,v_m) \end{bmatrix} \cdot (\boldsymbol{C}_{tt} + \boldsymbol{C}_{nn})^{-1}\boldsymbol{L}, \tag{5}$$

并假定 $\boldsymbol{C}_{nn}$ 为对角矩阵，其中相对于 x 向位移的对角元均为 $f_{xr}(0)$，相对于 y 向位移的对角元均为 $f_{yr}(0)$. 且：

$$f_{xr}(0) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} mu_i^2, \quad f_{yr}(0) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} mv_i^2, \tag{6}$$

式(6)中，$mu_i(i=1,2,\cdots,m)$为 x 向位移的中误差；$mv_i(i=1,2,\cdots,m)$为 y 向位移的中误差.

式(2)、(5)中，$\boldsymbol{C}_{st}$、$\boldsymbol{C}_{tt}$ 需根据同一个协方差函数获得，故最小二乘配置进行位移的推估内插主要取决于所建立的协方差函数. 假定位移分布在空间连续的条件下，高斯型函数较适合于拟合位移或位移速率，即两点间位移的协方差应随距离增大而减小. 但只在一定距离范围内的任意两点间位移是相关的，超出这一距离则不相关. 故选择如下高斯型函数

作为位移的经验协方差函数.

$$f(d)=f(0)\mathrm{e}^{-k^2d^2}\ , \tag{7}$$

式(7)中，d 为两点间距离；k 为待定参数. 令 $2m$ 维向量 $\boldsymbol{P}=(p_1,p_2,\cdots,p_{2m})^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{C}_{tt}+\boldsymbol{C}_{nn})^{-1}\boldsymbol{L}$，那么有：

$$\begin{pmatrix}u\\v\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}c(u,u_1),\cdots,c(u,u_m),c(u,v_1),\cdots,c(u,v_m)\\c(v,u_1),\cdots,c(v,u_m),c(v,v_1),\cdots,c(v,v_m)\end{bmatrix}\begin{pmatrix}p_1\\\vdots\\p_{2m}\end{pmatrix}. \tag{8}$$

1.2.2　青藏高原 GPS 水平速度协方差函数确定

据公式(1)～(7)，利用 GPS 点位移速度观测结果建立青藏高原水平位移速度信号的经验协方差函数(图 2). 并据公式(8)进一步获得青藏高原地区水平位移速度场连续分布图像(略).

1.3　华南位移基准的确定方法

为了反映研究区域内地壳相对运动情况，笔者把速度解转为相对于稳定的华南地块基准(吕江宁等，2003；杨国华等，2005)的速度.

华南地块 GPS 站点较少、分布不均匀，为此首先用最小二乘配置法得到华南地块连续分布的速度场(计算过程同 1.2). 华南地块 GPS 观测点较少，难以获得该区域水平位移速度信号的经验协方差函数，为此用中国大陆水平位移速度信号的经验协方差函数，对华南地块的位移速度进行拟合推估与滤波，得到华南地块水平位移速度场的连续分布.

根据华南地块 GPS 观测点的分布情况，本文选取 2°×2°空间分布的 35 个连续分布点. 通过测量学上应用广泛的相似变换方法(顾国华等，2000)，计算椭球面上从欧亚基准转换到华南基准的 3 个平移参数和 3 个旋转参数，得到相对华南地块的青藏高原的速度解.

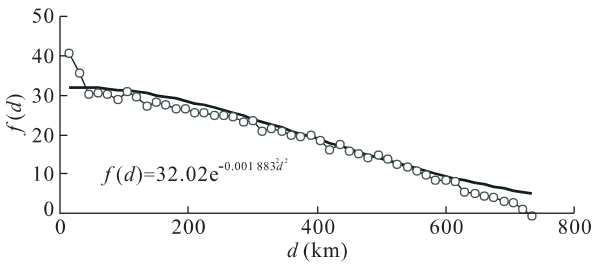

图 2　青藏高原水平位移速度信号的经验协方差函数

Fig. 2　Experience covariance functions of horizontal displacement velocity signal in Qinghai-Tibet Plateau

2　青藏高原地壳运动强度分析

2.1　分析方法介绍

采用小波二维多分辨技术，用“sym5”函数对华南基准下的连续速度场进行分解，分别对东西分量、南北分量进行 6 级分解，获得：0.25°×0.25°、0.5°×0.5°、1.0°×1.0°、2.0°×2.0°、4.0°×4.0°、8.0°×8.0°六种分辨率的图像，得到空间二维的逼近系数项和细节系数项. 再用东西分量和南北分量的逼近系数计算空间点位移长度的逼近系数，即：$A_{长度}=\sqrt{A_{ew}^2+A_{ns}^2}$，其中，$A_{长度}$ 为位移长度的逼近系数，A_{ew} 为东西分量的逼近系数，A_{ns} 为南北分量的逼近系数. GPS 观测点的 $A_{长度}$ 表示为地壳运动强度，不同空间分辨率的 $A_{长度}$ 图像反映不同空间尺度的地壳运动强度.

2.2　结果分析

图 3 显示，青藏高原大空间尺度(8.0°×8.0°)地壳运动呈现西强东弱的运动格局，即自西向东，地壳运动逐渐递变，方向上逐渐向东－南东偏转，同时运动强度逐渐减弱. 4.0°×4.0°空间尺度在安宁河、则木河和小金河一带出现地壳运动的渐强区，在岷江断裂、西秦岭北缘和东昆仑－玛沁玛曲段附近出现锲形的渐弱区. 由于 GPS 点位密度原因，0.25°×0.25°、0.5°×0.5°和 1.0°×1.0° 三种空间尺度显示的地壳运动特点接近一致. 亚东－谷露断裂南段附近运动强度最大；川西北地块显示出较强的运动特点，而滇中地块运动明显较弱；川滇菱形块体显示出北强南弱、西强东弱的特点，东边界形成明显的分界线，而西边界并不明显. 穿过岷江断裂、西秦岭北缘断裂，向南到马尔康断裂、川滇东边界外围和红河东南缘形成一条很长的速度减弱带. 结合中国大陆布格重力异常图看，这条很长的速度减弱带与该地区的重力高梯度带基本吻合，表明该带不仅是青藏高原与华南地块之间地壳物性特征的重要分界线，同时又是地壳运动差异的分界线. 而这条分界线与青藏地块与华南地块的边界并不完全一致①，那么两者之间有何关系？其深部的地球动力学特征如何？还需进行深入的研究.

按照已有地块划分的结果，青藏块体自南向北划分成 6 个次级活动地块，而多空间尺度地壳运动强度分布图像表明，拉萨地块、川滇菱形块体的运动

① 张培震等，2002. 主要活动地块划分的说明(供课题内部交流使用，“大陆强震机理”(973 项目)).

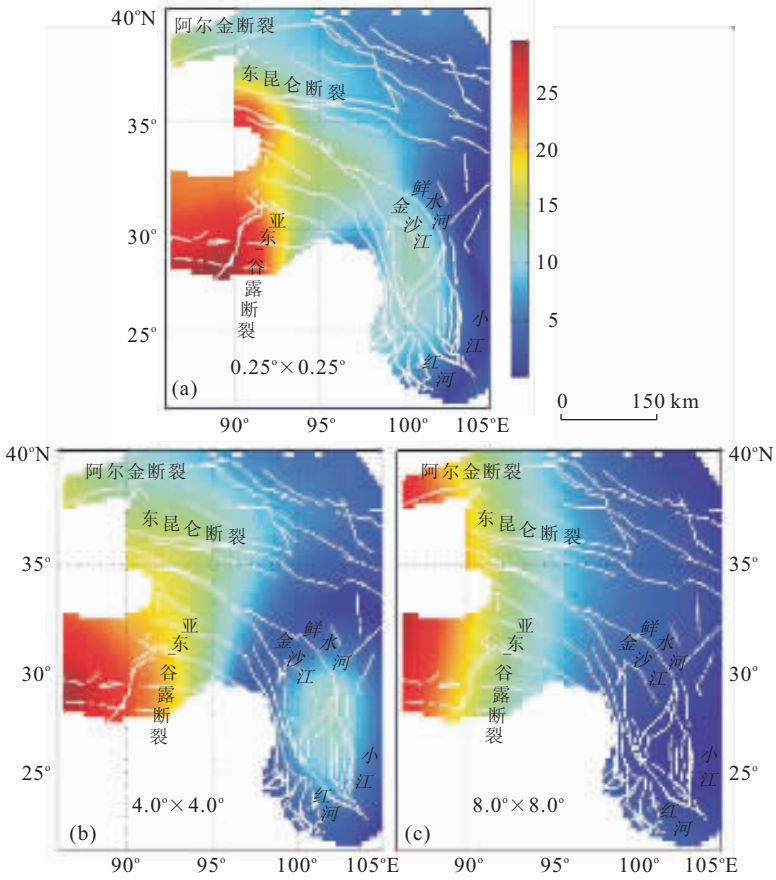

图 3 青藏高原多分辨率地壳运动强度

Fig. 3 Multi-revolution crustal movement strength of Qinghai-Tibet Plateau

显示出与周边的差异性，块体运动特征比较明显；而其他地块的运动与周边地块没有明显的分界线.

3 青藏高原涡旋运动分析

3.1 分析方法介绍

涡旋运动反映的是岩石圈的流变性质，可以用旋度来描述，对于水平位移，可以用垂向角速度来表示. 球面上块体的运动可以看作是块体的整体旋转运动与块体内部均匀应变之和（李延兴等，2004），笔者把块体推广到网格单元（Savage *et al.*，2001）. 具体公式如下：

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r\begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\lambda \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \tag{9}$$

式(9)中，r 为地球的平均半径；φ、λ 为 GPS 观测点的纬度和经度；v_e、v_n 为沿经线、纬线的位移速度；ω_x、ω_y、ω_z 为欧拉旋转矢量；x、y 为球面正交曲线坐标系中 GPS 的坐标，以网格中心为坐标原点，纬线为 x 轴，经线为 y 轴；A_0、B_0、C_0 为青藏高原地区的均匀应变参数. 笔者目的是计算各网格单元中心的 ω_z 角速度，由于此计算不受位移基准的影响，计算中采用欧亚框架下 0.25°×0.25°最小二乘配置的结果，采用各网格的 4 个点，用最小二乘方法解算各网格单元的 ω_z 角速度（图 4），计算得到的青藏高原地区的均匀应变参数值，$A_0=-5.528\times10^{-9}$、$B_0=-9.312\times10^{-9}$ 和 $C_0=4.620\times10^{-9}$.

3.2 结果分析

由于 GPS 观测密度及观测误差的限制，笔者无法对青藏高原的全貌进行精细的描述，只能对现有的数据图像进行分析. 依照角速度的方向，青藏高原地区分为 3 个明显的涡旋分区（图 4）.

其中，拉萨地块、羌塘地块及川滇地块的中西部，为逆时针涡旋区，高值区位于拉萨地块内部—亚

东—谷露断裂以东，其最大角速度接近 4.9 rad/a.

另一个分区位于柴达木地块及其以北的地区，为顺时针涡旋区，高值区位于西昆仑断裂与阿尔金断裂之间，其最大角速度接近 3.2 rad/a.

另外，青藏高原与华南地块的边界带（包括鲜水河东南段、安宁河、大梁山、龙门山南段、则木河、建水断裂南段和红河东南段）为顺时针涡旋区，高值区位于龙门山与安宁河的拐角处，其最大角速度接近 2.8 rad/a. 华南地块内的 GPS 站点，水平位移在观测误差范围以内，但是具有整体的系统性（王敏，私人通信），表现为大范围的顺时针涡旋，但角速度很小，小于 0.4 rad/a.

印度板块与欧亚大陆相抵，有东西两个“触角”，西边的“触角”位于帕米尔地区，东边的“触角”在阿萨姆地区. 受 GPS 测点分布的影响，无法对这两个“触角”的涡旋运动进行详细描述，但图 4 显示，离“触角”越近的地方，角速度值越大. 另外，GPS 速度场（图 1）也显示出两个“触角”附近涡旋运动较强的图像. 笔者推断，在广泛存在壳内流体（粘滞性流体）的青藏高原，两个“触角”的构造活动是引起周边地区涡旋运动的主要原因. 而在青藏高原与华南地块的边界带，较弱的涡旋运动可能是由滑动量较大的弧型左旋走滑断裂引起周边粘滞性物质的流动形成的.

青藏高原存在的 3 个大范围涡旋分区，只在少数地区以深大断裂为分界线，如沿羌塘块体的北边界（玛尼、玉树断裂）；而大部分地区是跨构造的，如鲜水河断裂带的西北段和东南段分别属于不同的涡旋运动方向；红河断裂的南段和北段分别属于不同的涡旋运动方向；龙门山断裂的南段和北段分别属于不同的涡旋运动方向. 涡旋分区边界线两侧的岩石流变性质可能发生了较大的变化.

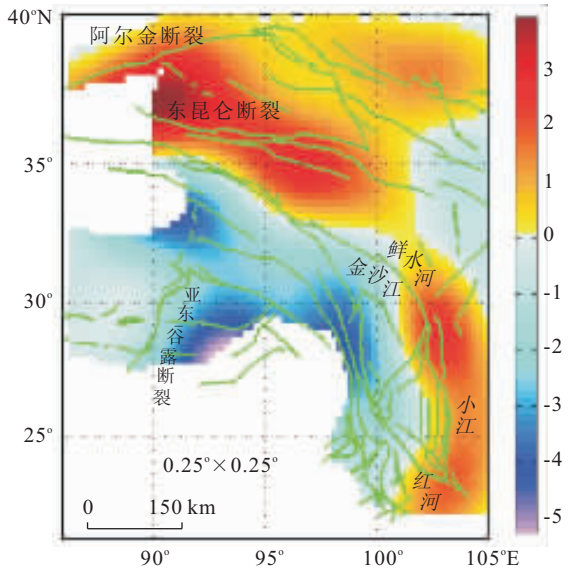

图 4　青藏高原旋涡运动（0.25°×0.25°）

Fig. 4　Vortex movement of Qinghai-Tibet Plateau

4　结论

（1）青藏高原的地壳运动强度沿喀喇昆仑断裂、玛尼—玉树—鲜水河—小江的弧型构造带，由西向东递减. 川滇菱形块体的运动强度显示出北强南弱、西强东弱的特点，东边界形成明显的分界线，而西边界并不明显. 穿过岷江断裂、西秦岭北缘断裂，向南到马尔康断裂、川滇东边界外围和红河东南缘形成一条很长的地壳运动速度减弱带，该带不仅是青藏高原与华南地块之间地壳物性特征的重要分界线，同时也是地壳运动差异的分界线.

（2）涡旋运动反映的是岩石圈的流变性质. 青藏高原存在 3 个角速度量值较高的涡旋分区，表明青藏高原地壳内广泛存在大范围流体. 3 个涡旋分区分别为：顺时针涡旋的拉萨、羌塘及川滇中西部地区，亚东—谷露断裂以东的区域为其涡旋高值区；逆时针涡旋的柴达木地块及其以北的地区，西昆仑断裂与阿尔金断裂之间为其高值区；逆时针涡旋的青藏高原与华南地块的边界带（包括鲜水河东南段、安宁河、大梁山、龙门山南段、则木河、建水断裂南段和红河东南段），龙门山与安宁河的拐角处为其高值区. 这种大范围方向一致、跨构造的涡旋，可能是积聚在一定范围内的地壳内流体（粘滞性流体），在印度板块两“触角”、东边界滑动量较大的弧型左旋走滑断裂的作用下，形成大范围的向周边逐渐衰减的涡旋运动.

（3）青藏高原 3 个涡旋分区的边界，可能为岩石圈流变性质变化较大的地区.

References

Chen, Z. L., Liu, Y. P., Tang, W. Q., et al., 2006. Recent deformation and displacement of continental lithosphere in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 25(1): 20—28 (in Chinese with English abstract).

Ei-Fiky, G. S., Kato, T., Oware, E. N., 1999. Crustal deformation and interpolate coupling in the Shikoku district, Japan, as seen from continuous GPS observation. *Tectonophysics*, 314(4): 387—399.

Fujii, Y., Xia, S., 1993. Estimation of distribution of the rates of vertical crustal movements in the Tokai district with the aid of least squares prediction. *J. Phys. Earth*, 41:239－256.

Gu, G. H., Niu, H. Y., Zheng, G. M., et al., 2000. Crustal movement in China mainland observed from 1998 to 1999. *Acta Seismologica Sinica*, 22(6):561－567 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Zhang, X., Chen, B., et al., 2000. Characteristics of recent horizontal movement and strain-stress field in the crust of North China. *Chinese J. of Geophys.*, 43(5):657－665 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Zhang, X., Cui, D. X., et al., 2001. Recent horizontal movement and deformation in the northeast margin of Qinghai-Tibet block. *Chinese J. of Geophys.*, 44(5):636－644 (in Chinese with English abstract).

Kato, T., Ei-Fiky, G. S., Oware, E. N., 1998. Crustal strains in the Japanese islands as deduced from dense GPS array. *Geophys. Res. Lett.*, 25(18):3445－3448.

Li, Y. X., Li, Z., Zhang, J. H., et al., 2004. Horizontal strain field in the Chinese mainland and its surrounding areas. *Chinese J. of Geophysi.*, 47(2):222－231 (in Chinese with English abstract).

Lü, J. N., Shen, Z. K., Wang, M., 2003. Contemporary crustal deformation and active tectonic block model of the Sichuan-Yunnan region. *China Seismology and Geology*, 25(4):533－554 (in Chinese with English abstract).

Ma, Z. J., Chen, X. L., Ye, S. H., et al., 2001. GPS study of current crustal movement of China mainland. *Chinese Science Bulletin*, 46(13):1118－1120 (in Chinese with English abstract).

Moritz, H., 1963. Interpolation and predication of point gravity anomalies. *Annals Academiace Scientiarum Fennicae*, 69(Ⅲ A):1－32.

Savage, J. C., Gan, W. J., Svarc, J. L., 2001. Strain accumulation and rotation in the eastern California shear zone. *J. G. R.*, 106(B10):21995－22007.

Shen, Z. K., Zhao, C. K., An, Y., et al., 2000. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by global positioning system measurements. *J. G. R.*, 105:5721－5734.

Tang, W. Q., Chen, Z. L., Liu, Y. P., et al., 2005. Present-day tectonics activity in the intersection area of the Xianshuihe fault and Longmenshan fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 24(12):1169－1172 (in Chinese with English abstract).

Wang, M., Shen, Z. K., Niu, Z. J., et al., 2003. Present-day crustal movement of Chinese mainland and active block model. *Science in China (Ser. D)*, 33(Suppl.):21－32 (in Chinese).

Yang, G. H., Jiang, Z. S., Wu, Y. Q., et al., 2005. No-net-rotation on crustal movement of China mainland and its application. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(4):6－10 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C. Y., Ding, J., Chao, D. B., 2007. General expression of least squares collocation in local gravity field. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32(5):431－434 (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. M., Zhang, P. Z., 2000. Academic progress on the mechanism and forecast for continental strong earthquake in the first two years. *China Basic Science*, (10):4－10 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P. Z., Wang, Q., Ma, Z. J., 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 9(2):442－450 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈智梁，刘宇平，唐文清，等，2006. **青藏高原东北缘大陆岩石圈现今变形和位移. 地质通报**，25(1):20－28.

顾国华，牛红叶，郑贵明，等，2000. **中国大陆** 1998－1999 **年地壳运动观测结果. 地震学报**，22(6):561－567.

江在森，张希，陈兵，等，2000. **华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征. 地球物理学报**，43(5):657－665.

江在森，张希，崔笃信，等，2001. **青藏块体东北缘近期水平运动与变形. 地球物理学报**，44(5):636－644.

李延兴，李智，张静华，等，2004. **中国大陆及周边地区的水平应变场. 地球物理学报**，47(2):222－231.

吕江宁，沈正康，王敏，2003. **川滇地区现代地壳运动速度场和活动地块运动模型研究. 地震地质**，25(4):533－554.

马宗晋，陈鑫连，叶叔华，等，2001. **中国大陆区现今地壳运动的** GPS **研究. 科学通报**，46(13):1118－1120.

唐文清，陈智梁，刘宇平，等，2005. **青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动. 地质通报**，24(12):1169－1172.

王敏，沈正康，牛之俊，等，2003. **现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. 中国科学**(D **辑**)，33(**增刊**):21－32.

杨国华，江在森，武艳强，等，2005. **中国大陆整体无净旋转基准及其应用. 大地测量与地球动力学**，25(4):6－10.

章传银，丁剑，晁定波，2007. **局部重力场最小二乘配置通用表示技术. 武汉大学学报**(**信息科学版**)，32(5):431－434.

张国民，张培震，2000. **"大陆强震机理与预测"中期学术进展. 中国基础科学**，(10):4－10.

张培震，王琪，马宗晋，2002. **青藏高原现今构造变形特征与** GPS **速度场. 地学前缘**，9(2):442－450.