

王晶晶、刘林飞、朱守彪等,2015,中国大陆地应变率场分布及其与地震活动性关系的研究,中国地震,31(4),629~637。

# 中国大陆地应变率场分布 及其与地震活动性关系的研究

王晶晶<sup>1)</sup> 刘林飞<sup>2)</sup> 朱守彪<sup>3)</sup> 韩艳<sup>1)</sup>

1) 辽宁省盘锦市地震台,辽宁省盘锦市科技大街北 124010

2) 山西省地震局,太原 030021

3) 中国地震局地壳应力研究所,北京 100085

**摘要** 利用中国大陆地区的 GPS 速度观测资料,通过 2 次插值计算,得到地应变率场。首先将 GPS 观测结果通过插值计算获得中国大陆及邻区均匀网格节点上的速度值,然后运用有限单元中形函数(Lagrange 插值函数)的求导方法,计算每个网格单元积分点处的地应变率分量,从而获得中国大陆及邻区稳定的地应变率场的分布。计算结果表明,总体上中国大陆及邻区地应变率分布西高东低;以南北地震带为界,西部地区应变率高,而东部地区,尤其是华南地区地应变率很低;而塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等构造稳定区域的地应变率也很小。此外,还发现中国大陆及邻区地应变率分布与地震活动之间的关系非常密切,变形产生的应变能密度与地震密度( $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 内发生的地震数目)之间吻合得很好,应变能密度高的区域,地震活动性较强;反之,则较弱。同时,最大剪应变率、面应变率与地震活动性之间也呈对应关系。

**关键词:** GPS 观测 地应变率 应变能密度 地震活动性 中国大陆

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0629-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

根据弹性回跳理论(Reid, 1910),地震是构造应力、应变在震区内缓慢积累到一定极限突然释放弹性应变能而引发地震动的过程。显然,地震的孕育发生与地壳的变形有必然的联系。

自 20 世纪 90 年代以来,中国大陆地区陆续布设了大量的 GPS 站点,并通过观测获得了中国大陆地区非常丰富的地壳运动资料。这些资料可以帮助我们分析断层活动、构造演化以及地震活动。由于 GPS 观测结果都是基于一定的坐标框架,故在不同的观测系统或者在不同的坐标里给出的观测速度是不同的。为此,很多研究者利用 GPS 观测结果来进行地应变率场的计算(Kato et al, 1998; Holt et al, 2000; Savage et al, 2001; Bennett et al, 2003; Bos et

[收稿日期] 2014-11-04; [修定日期] 2015-01-08

[项目类别] 北京市自然科学基金项目(8152034)、中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140305)以及中央级科研院所科研业务专项(ZDJ2013-21)共同资助

[作者简介] 王晶晶,女,1977年生,工程师,主要从事地震监测与分析工作。E-mail: 326565953@qq.com

刘林飞,通讯作者,男,主要从事地震前兆观测与分析工作。E-mail: liulf2013@126.com

al, 2003; Mazzotti et al, 2005; 朱守彪等, 2005; Zhu et al, 2006、2011), 同时基于应变场可以进一步求取地应力, 从而进行更加深入的地球动力学分析。

由于中国大陆地域广阔, 故现有的 GPS 站点不仅总数量相对不足, 其空间分布也极其不均。这种空间分布格局导致了不同的研究人员使用相同的 GPS 观测资料计算给出的地应变率结果却各不相同(顾国华等, 2001; 杨少敏等, 2002; 江在森等, 2003; 黄立人等, 2003; 沈正康等, 2003; 李延兴等, 2004; Gan et al, 2007)。朱守彪等(2005)、Zhu 等(2011)分析了产生这一现象的原因, 并提出利用 2 次插值的方法来求解计算地应变率。他们对青藏高原地区的计算结果表明, 该方法计算简便, 物理思路清晰, 易于编制计算程序, 并且精度高, 计算的应变率结果与地应力、地震等观测资料有可比性。本文拟采用 2 次插值方法利用 GPS 观测资料计算中国大陆地区的地应变率场, 并考察地应变率与地震活动的关联, 以探求地震孕育的机制。

## 1 中国大陆 GPS 观测及其应变率分布

中国大陆地区自 20 世纪 90 年代布设 GPS 观测站点以来, 已积累了丰富的 GPS 测点的速度资料(Wang et al, 2001; Gan et al, 2007), 图 1 为中国大陆及邻区 1998~2007 年相对于欧亚板块的 GPS 观测结果。由图 1 可见, GPS 测点的空间分布稀疏且不均, 如华北地区以及青藏高原东缘站点多、密度大, 而青藏高原中西部以及华南地区测点较少。

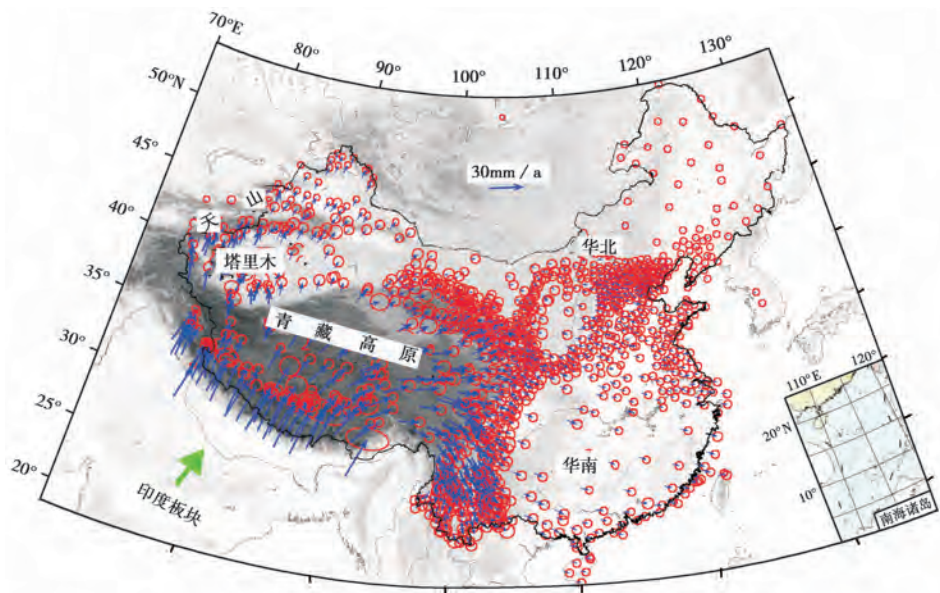


图 1 1998~2007 年中国大陆及邻区相对于欧亚大陆的 GPS 观测结果  
误差椭圆表示 95% 置信水平

为得到中国大陆及邻区稳定的地应变率场, 本文采用朱守彪等(2005)、Zhu 等(2006)提出的 2 次插值方法: 首先运用 Kriging 插值得到均匀网格节点上的速度值( $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ ); 然后在每一个网格单元里, 利用 Lagrange 插值得到插值函数, 再对插值函数求导, 获得每个网格单元积分点处的地应变率分量; 最后求取最大主应变、最大剪切应变等物理量。

图 2 为本文计算给出的中国大陆及邻区最大、最小主应变率的分布图。由于主应变率为

坐标不变量,因此它不随坐标框架的变化而变化,所以利用主应变率来分析地质构造会更为客观。从图 2 可以看出,总体上中国大陆地区应变率是西高东低,以南北地震带为分界线,西侧应变率大,东侧则较小。最小主应变率(挤压为负)的最大值出现在青藏高原的主边界碰撞带(MBT)附近,其值为 $(4 \times 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-8})/a$ ;同时图 2 还显示,在青藏高原地区主压应变的方位呈扇形分布,此外在青藏高原腹地及东北缘地区出现拉张应变大于挤压应变的区域(即图 2 中箭头向外的矢量大于箭头向内的)。由图 2 还可以看到,塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地以及华南地区等构造稳定的区域应变率很低,而天山地区的应变率很高。

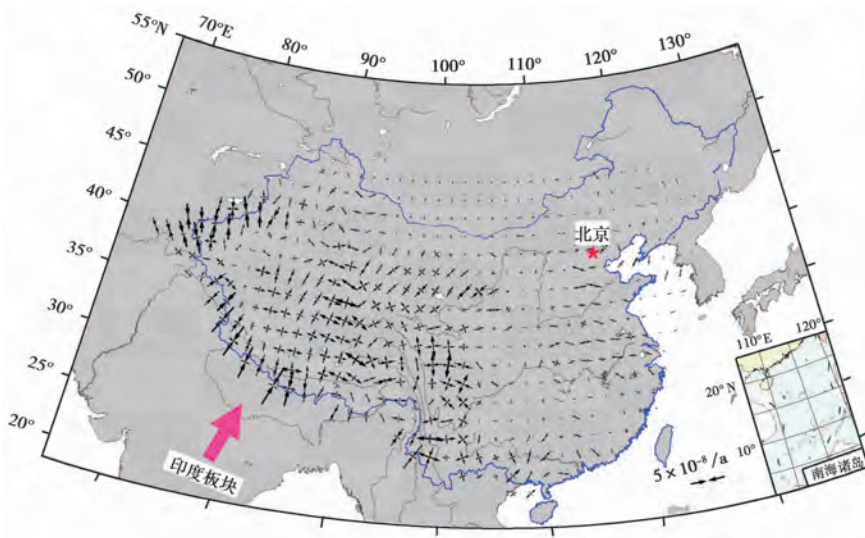


图 2 中国大陆及邻区最大、最小主应变率分布

箭头向外表示最大主应变率(正值);箭头向内表示最小主应变率(负值)

为检验计算结果的可靠性,须将计算出的主应变率与相关观测资料进行比较。由于地壳内部的应力状态无法直接观测,因此利用地震震源机制解中的 P、T 轴方位也可以从一定程度上判定地壳内部的应力状态。图 3 为中国大陆及邻区浅源地震震源机制分布图,通过比较 P、T 轴的方位与图 2 中主应变率的方向可见,总体上两者之间存在可比性。特别是图 3 青藏高原内部及东北缘地区出现很多正断层型地震,这与图 2 计算给出的拉张区域的位置是一致的。这也从一定程度上证明了本文应变率计算结果的合理性。另外,图 4 为谢富仁等(2011)给出的中国大陆及邻区构造应力场方位分布,图 4 显示的应力方位与图 2 最小主应变率方位的一致性很好,从而进一步证明本文应变率结果的可靠性。

## 2 地应变率分布与地震活动性的关系

中国大陆及邻区由于受印度洋板块、菲律宾海板块以及太平洋板块的共同推挤作用,区内地貌起伏大,断层发育,构造应力场复杂,强震活动十分频繁。图 5 为中国大陆及邻区浅源地震分布图。图 5 显示,在青藏高原、天山及周边地区地震活动最为频繁,此外华北地区的地震活动也很活跃。而地震活动与地应变率之间有没有关系?有什么关系?仅从图 2 的主应变率分布难以发现。由于地震的发生需要应变能的积累,并且地震成因多为岩石的剪切破裂,因此本文

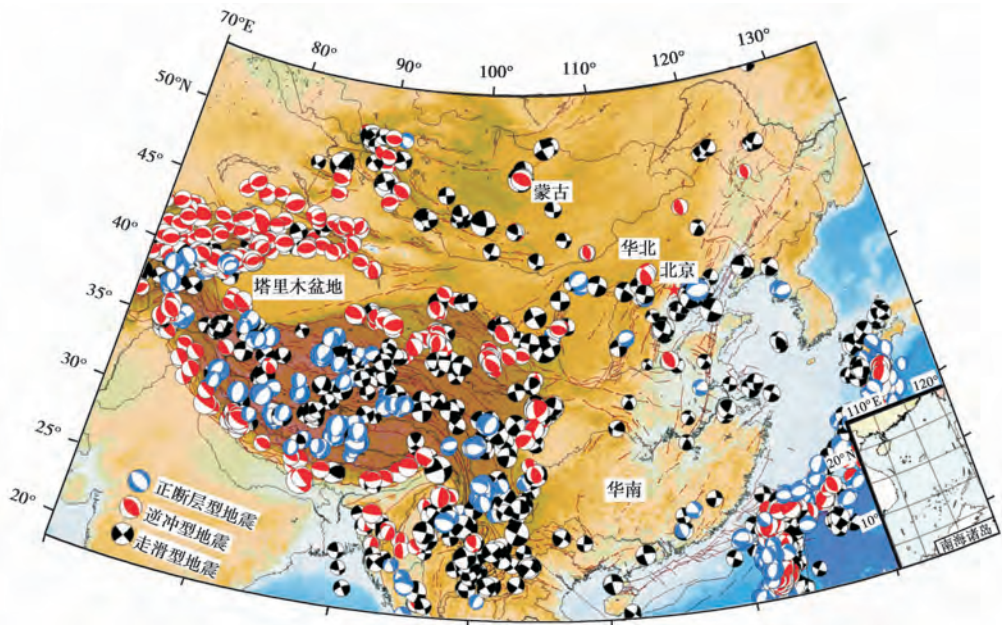


图3 1976~2008年中国大陆及邻区  $M_s \geq 5.0$  浅源地震震源机制分布

资料来源: <http://www.globalemt.org/>

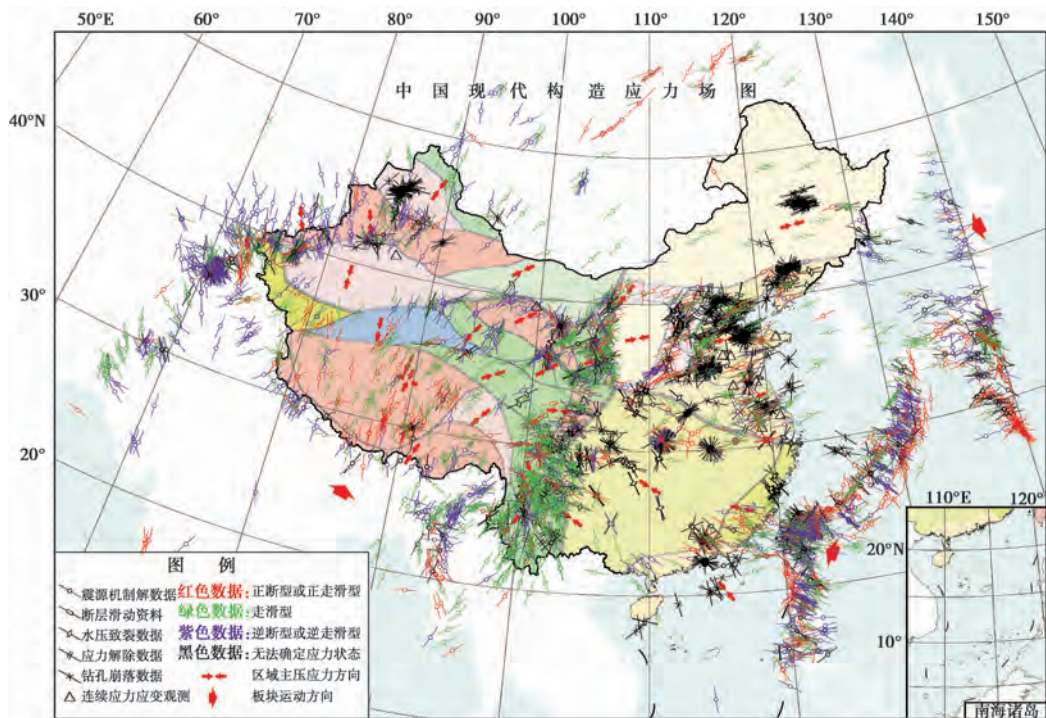


图4 中国大陆及邻区构造应力场分布(据谢富仁等(2011))

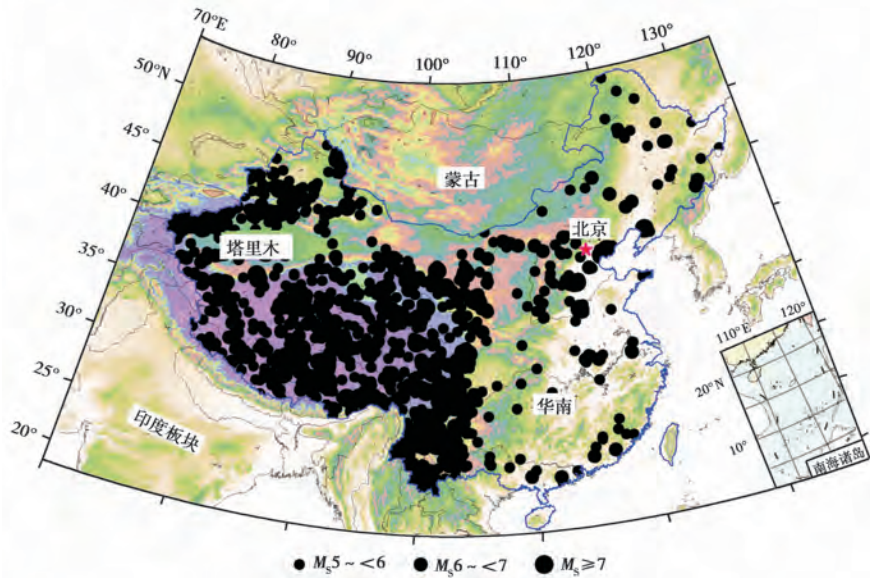


图5 1900~2008年中国大陆及邻区  $M_s \geq 5.0$  地震震中分布  
震源深度小于40km

将进一步计算最大剪切应变率、面应变率以及应变能能量密度的变化率等。

### 2.1 最大剪切应变率

图6为根据GPS资料计算出的最大剪切应变率等值线分布图。由图6可见,最大剪应变率的高值区出现在青藏高原及周边以及天山地区,而塔里木盆地、四川盆地以及华南地区等构造稳定的区域,最大剪应变率较低;这与图2给出的最大主应变率结果是对应的。比较图5、6可见,地震活动与最大剪应变率之间存在着关联,即:最大剪应变率高值区域的地震活动性强、低值区域的地震活动性弱。

### 2.2 面应变率

图7为由GPS观测资料计算给出的中国大陆地区面应变率等值线分布图。总体上,西部地区面应变率高于东部地区。此外,根据面应变率的计算公式,可知当面应变率为正值时表示该处受到拉张力的作用;反之,则表示处于压缩状态。图7显示,在青藏高原内部出现了面应变率大于0的区域,对照图3的震源机制分布不难看出,在这些面应变率为正的区域里出现了正断层型地震。所以,面应变率的空间分布大体上与地震的类型是一致的。

### 2.3 应变能量密度变化率

图8为应变能量密度变化率等值线分布图。由图8可见,应变能的空间分布大体上与应变分量的分布类似,也是西高东低。通过仔细观察不难发现,应变能密度分布与图5的地震震中的空间分布相关性很好。为进一步定量比较应变能密度与地震活动性之间的关系,本文计算了地震活动的密度,即在单位区域里发生的地震次数,此处称之为地震密度(文中取 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 内发生的地震数目)。图9给出了地震密度的等值线分布。对比图8、9不难看出,两者之间吻合得很好,总的轮廓非常一致,应变能体现了地震发生的密度水平。应变能密度高的区域,地震密集,地震活动性强;反之,则地震数量少,地震活动弱。

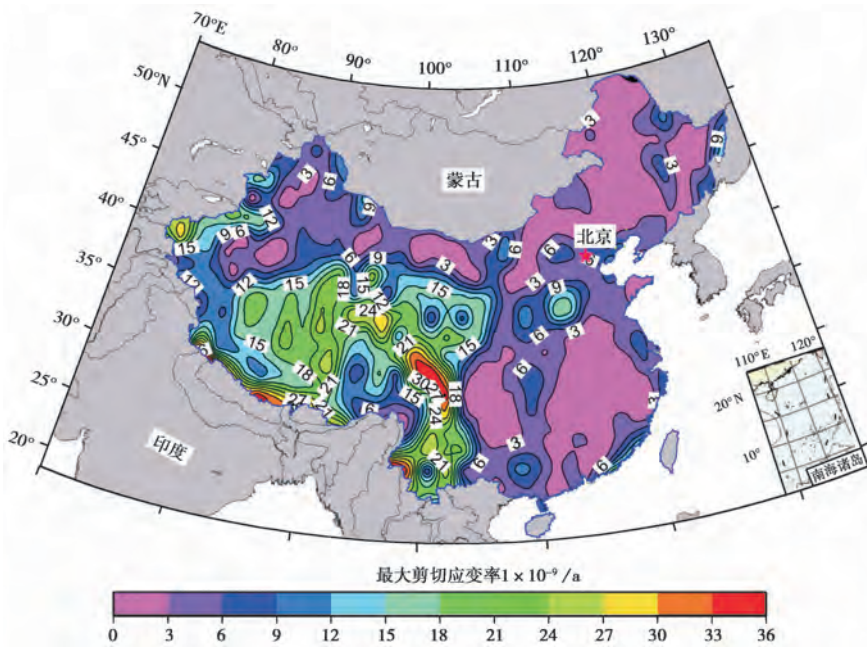


图 6 由 GPS 观测计算给出的最大剪切应变率等值线分布

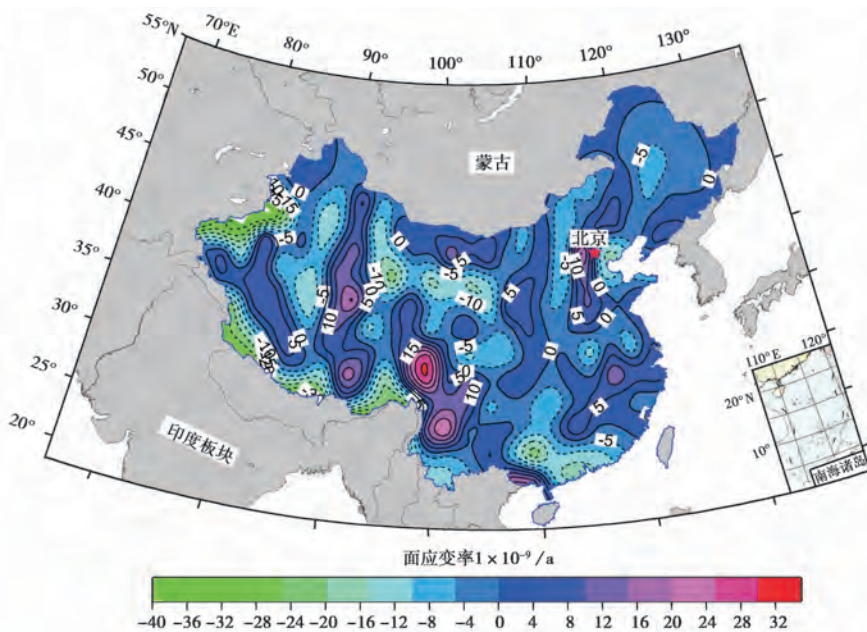


图 7 由 GPS 观测计算给出的面应变率等值线分布

### 3 讨论与结论

本文采用 2 次插值的方法,利用 GPS 观测资料计算了中国大陆及邻区的地应变率场,计算结果与震源机制解的方位、地震类别以及中国大陆构造应力方位等有较好的一致性,从而说明文中计算应变率的方法是有效的。2 次插值中第 1 步是利用 Kriging 插值获得中国大陆

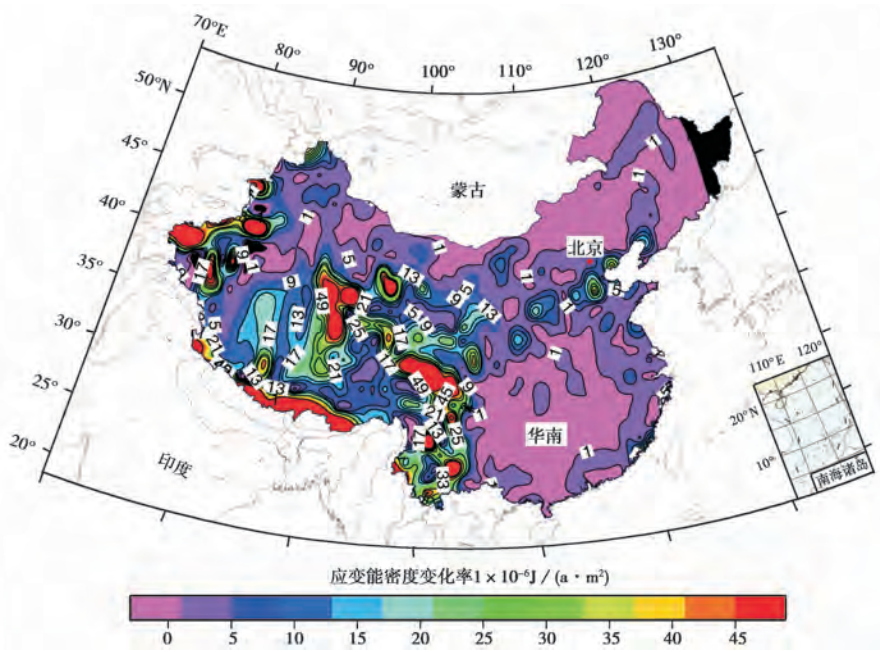


图 8 由 GPS 观测计算给出的应变能密度变化率等值线分布

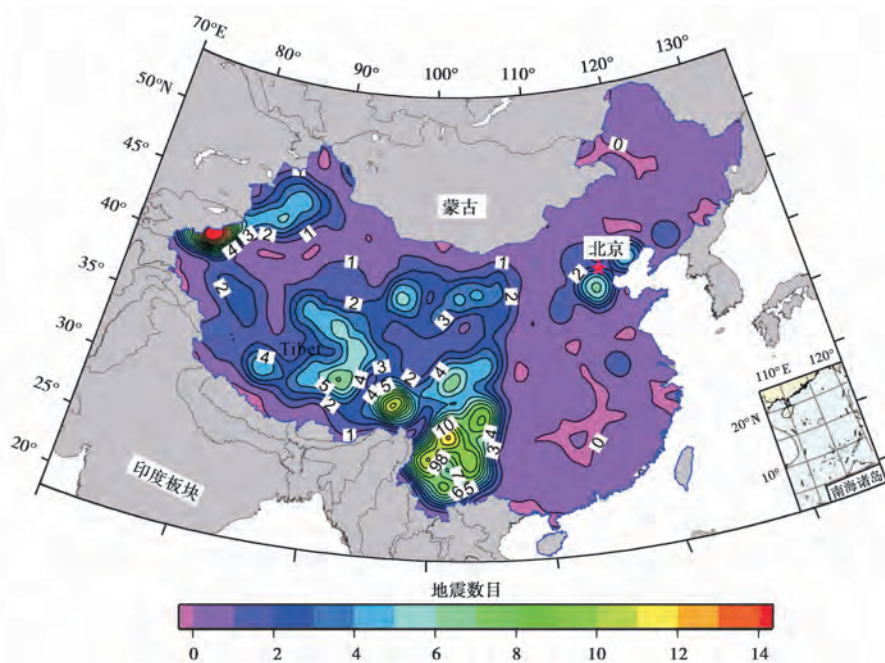


图 9 地震密度等值线分布

其中的地震与图 5 中的对应

及邻区均匀网格节点上的速度值,这等效于对观测的速度场进行高通滤波,将 GPS 观测中与整体分布不协调的站点速度进行光滑,从而保证应变率结果不会产生突跳,在空间上平稳过

渡。同时,通过与 Gan 等(2007)得到的青藏高原地区应变率分布特征进行比较可知,本文的计算结果是可靠的。此外,中国大陆及邻区的地应变率总体上是西高东低,这与中国大陆的地质构造特点、地震活动水平以及其他地球物理观测结果是一致的。另,在中国大陆边界及附近地区,由于 GPS 测点少,计算结果不甚可靠,相关研究者在应用本文结果时对此应予以注意。

通过上述研究,得到以下初步认识:

(1)利用 2 次插值计算由 GPS 观测资料产生的地应变率方法稳定可靠,并且精度很高。该方法还可以进一步应用于其他区域,特别是在 GPS 站点空间分布很不均匀的情况下使用。

(2)中国大陆及邻区地应变率分布总体上西高东低;以南北地震带为界,西部地区地应变率高,而东部地区,尤其是华南地区地应变率很低;此外塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等构造稳定的区域,地应变率也很小。

(3)中国大陆及邻区地应变率的分布,特别是应变能量密度的分布,与地震活动性的关系非常密切,即应变能密度高的地区,地震活动性强;反之,则地震活动较弱。因此,地应变率场对于分析地震活动趋势可提供一定的参考。

致谢:两位匿名审稿专家提出诸多宝贵建议,在此表示感谢。

## 参考文献

- 顾国华、申旭辉、王敏等,2001,中国大陆现今地壳水平运动基本特征,地震学报,23(4),362~369。
- 黄立人、王敏,2003,中国大陆构造块体的现今活动和变形,地震地质,25(1),23~32。
- 江在森、马宗晋、张希等,2003,GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形,地球物理学报,46(3),352~358。
- 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。
- 沈正康、王敏、甘卫军等,2003,中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究,地学前缘,10(增刊 I),93~100。
- 谢富仁、张红艳、崔效锋等,2011,中国大陆现代构造应力场与强震活动,国际地震动态,(1),4~12。
- 杨少敏、游新兆、杜瑞林等,2002,用双 3 次样条函数和 GPS 资料反演现今中国大陆构造形变,大地测量与地球动力学,22(1),68~75。
- 朱守彪、蔡永恩、石耀霖,2005,青藏高原现今构造应变率场的计算及其结果的地球动力学意义,地球物理学报,22(3),292~302。
- Bennett R A, Wernicke B P, Niemi N A, et al, 2003, Contemporary strain rates in the northern Basin and Range Province from GPS data, *Tectonics*, 22(2), doi:10.1029/2001TC001355.
- Bos A, Spakman W, Nyst M, 2003, Surface deformation and tectonic setting of Taiwan inferred from a GPS velocity field, *J Geophys Res*, 108(B10), doi:10.1029/2002JB002336.
- Gan, W, Zhang P, Shen Z, et al, 2007, Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements, *J Geophys Res*, 112, B08416, doi:10.1029/2005JB004120.
- Holt W E, Chamot-Rooke N, Pichon X L, et al, 2000, Velocity field in Asia inferred from quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations, *J Geophys Res*, 105(B8), 19185~19210, 10.1029/2000JB900045.
- Kato T, El-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.
- Mazzotti S, James T S, Henton J, et al, 2005, GPS crustal strain, postglacial rebound, and seismic hazard in eastern North America: The Saint Lawrence valley example, *J Geophys Res*, 110, doi:10.1029/2004JB003590.
- Reid H F, 1910, The mechanism of the earthquake, in *The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission*, 2, 16~28, Carnegie Institute of Washington, Washington, DC.
- Savage J C, Gan W, Svare J L, 2001, Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone, *J Geophys Res*, 106



(B10), 21995~22007.

Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J, et al, 2001, Present-day crustal deformation in China constrained by GPS measurements, *Science*, **294**, 574~577.

Zhu S B, Cai Y E, Shi Y L, 2006, The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and its geodynamics implications, *Pure Appl Geophys*, **163**, 1477~1493.

Zhu S B, Shi Y L, 2011, Estimation of GPS strain rate and its error analysis in the Chinese continent, *J Asian Ear Sci*, doi : 10.1016/j.jseas.2010.06.007, **40**(1), 351~362.

## A study on the relationship between GPS-ground strain rate field and seismicity in the Chinese mainland

Wang Jingjing<sup>1)</sup> Liu Linfei<sup>2)</sup> Zhu Shoubiao<sup>3)</sup> Han Yan<sup>1)</sup>

1) Panjin Seismic Station, Earthquake Administration of Liaoning Province, Panjin 124010, Liaoning, China

2) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

3) Institute of Crustal Dynamic, CEA, Beijing 100085, China

**Abstract** An earthquake is a mechanical process in which elastic strain energy is released suddenly once stresses in the focal region are accumulated to a critical extent. Therefore, there exists an intrinsic connection (<http://cn.bing.comdictsearch?q=.&FORM=BDVSP6>) between the process of earthquake preparation and the cumulation of crustal strain. In this paper, strain rate field is calculated by the use of GPS velocities observed in the Chinese mainland with twice interpolations approach. Interpolating the scattered GPS velocity data of Chinese mainland and its adjacent areas to grid point values by Kriging, we then calculate the strain rate from these nodal values of each element similar to derivative of shape functions (essential Lagrange interpolation function) in finite element algorithm, and obtain the stable distribution of strain rate field in the studied area. The results show that the strain rates in China and its adjacent areas on the whole are high in the west and low in the east. The strain rates are evidently larger in the western region of China than those in the east bounded by North-South Seismic Belt. To the east of the belt, strain rates are very low, especially in southern China. In addition, the tectonic stable regions such as the Tarim Basin and Ordos Basin show low strain rates. Moreover, the calculated results suggest that the seismic activity is closely related to the strain rates in China and its adjacent areas. There is a very close relationship between strain energy density and seismicity. Where strain energy is large, seismicity is high, and vice versa. We also found correspondences between seismicity and the maximum shear strain rate and surface strain rate. Therefore, the calculation of strain rate field will provide an important reference for seismic hazard assessment.

**Key words:** GPS measurements Strain rates Strain energy density Seismicity  
Chinese mainland