

李拴虎, 高立新, 韩晓明, 等. Amurian 板块旋转模型及其沿郯庐断裂带二级划分[J]. 华南地震, 2017, 37(4): 9-15. [LI Shuanhu, GAO Lixin, HAN Xiaoming, et al. Amurian Plate Rotation Model and Its Secondary Division along the Tanlu Fault Zone [J]. South China journal of seismology, 2017, 37(4): 9-15.]

Amurian 板块旋转模型及其沿郯庐断裂带二级划分

李拴虎, 高立新, 韩晓明, 陈立峰, 梁沙沙

(内蒙古自治区地震局, 呼和浩特市 010010)

摘要: 阿穆尔(Amurian)板块在东北亚地区的地壳运动和地震活动研究中起着特别重要的作用, 特别是可以解释郯庐断裂带在板块构造中的作用性问题。然而, 由于研究数据不足, 南部边界的划分仍有争议, 因此, 郯庐断裂带将是进一步准确界定阿穆尔板块的关键所在。通过分析贝加尔裂谷拉伸带和斯塔诺沃依山脉挤压带的震源机制解和应力矢量方向, 结合中国东北地区的 GPS 数据计算结果, 建立了中心位于 $E118.4^{\circ} \pm 2.4^{\circ}$, $N57.5^{\circ} \pm 1.2^{\circ}$ 附近的主体 Amurian 板块的旋转模型。利用卡方统计检验的数理方法计算了朝鲜半岛与 Amurian 主体板块和中国华南地块的相关性, 发现朝鲜半岛既不属于 Amurian 板块, 也不属于中国华南地块, 而是一个相对独立的刚性地块, 能量释放量级也说明了同样的问题。结论表明: 郯庐断裂带应是 Amurian 板块的南边界, 至少是 Amurian 板块二级划分的边界带。

关键词: Amurian 板块; 旋转模型; 郯庐断裂带; 二级划分

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 04-0009-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.04.002

Amurian Plate Rotation Model and Its Secondary Division along the Tanlu Fault Zone

LI Shuanhu, GAO Lixin, HAN Xiaoming, CHEN Lifeng, LIANG Shasha

(Inner Mongolia Autonomous Region Earthquake Agency, Hohhot 010010, China)

Abstract: The Amurian plate (AM) in the northeast Asia plays a particularly important role in the estimation of surrounding crustal movements and interpretation of seismic activities, especially which can interpret the role of Tanlu fault in plate tectonic. However, due to the lack of research data, the location of the southern border is still controversial, therefore, the Tanlu fault zone will be the key to further defining the Amurian plate. Based on the analysis of the focal mechanism solutions and stress vector direction of the Baikal rift zone stretching belt and Sitanuowoyi mountains extrusion belt, combining with GPS data in northeast China, the paper establishes the

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 2016 年内蒙古自治区科技厅重大专项(强震短临跟踪和空地立体观测技术集成创新); 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(160506)

作者简介: 李拴虎 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 GPS、INSAR 方面的研究工作。

E-mail: lizhengke06@126.com.

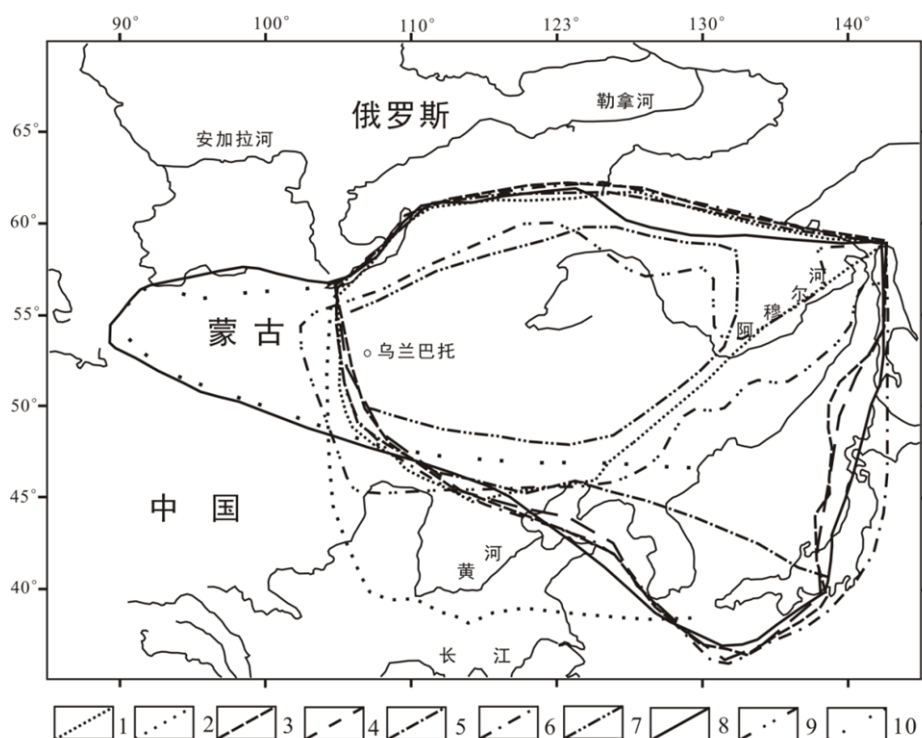
main rotation model of Amurian plate whose center is located in near $E118.4^{\circ} \pm 2.4^{\circ}$, $N57.5^{\circ} \pm 1.2^{\circ}$. By using the x^2 method, the paper calculates the correlation of the Korean Peninsula between the main Amurian plate and China Southern block, and finds that the Korean Peninsula does not belong to the Amurian or Chinese Southern, which is a relatively independent rigid block. The magnitude of the energy release also shows that the same problem. The conclusion shows that the Tanlu fault zone should be the southern boundary of the Amurian plate, at least a secondary division boundary zone of the Amurian plate.

Keywords: Amurian plate; Rotation model; Tanlu fault zone; Secondary division

0 前言

在国际地球参考框架(ITRF)下的全球板块运动模型 NUVEL-1A 内, Amurian 板块并没有从欧亚板块内整体剥离出来^[1-2], 然而, 从 Zonenshain 等人的研究开始, Amurian 板块被认为是一个单独的构造单元, 之后的专家学者都做过类似的研究。按照定义, 岩石圈板块的变形是整体刚性移动的, 近年来基于 GPS 的大地变形测量已经证实其存在^[3]。但东部边界一直没有达成共识(图 1), 最初东边界沿库页岛一直向南, 通过北海道沿日本海岸线展布。后来通过地震活动性的分析, 从库页岛南部

开始分离, 沿日本北海道西海岸并通过本州岛, 与南部海沟重合^[4-6], 南部边界的争议相对较小, 主体为通过渤海, 与东西向的阴山-燕山断裂带重合。Gatinsky 根据公开发表的数据, 定义了从渤海开始, 沿郯庐断裂带一直到库页岛的最北端的边界, 单独划分出了日本-朝鲜半岛(KJ)板块, 主要包括朝鲜半岛, 日本海, 中国东海、黄海和渤海的部分, 中国东北郯庐断裂带的一部分, 以及日本岛西南地区。Imaev^[7]同样认为 Amurian 板块是一个南边界通过郯庐断裂带的刚性块体。Malyshev^[8]根据东亚岩石圈的减薄判定锡霍特-阿林造山带位于 Amurian 板块的东边界区域。



注: 1: Gatinsky and Rundquist, 2004; 2: Heki et al., 1999; 3: Wei and Seno, 1998; 4: Bird, 2003; 5: Jin et al., 2007; 6: Zonenshain et al., 1979; 7: Imaev et al., 2000, 2003; 8: Petit and Fournier, 2005; 9: Malyshev et al., 2007; 10: Sherman et al., 1984。

图 1 Amurian 板块边界不同的划分方式

Fig.1 Different dividing ways of the Amurian Plate boundary

欧亚板块与 Amurian 板块的分界带同样存在争议, 其中一派沿着贝加尔地震带和斯塔诺沃依地震带以北地区划分。斯塔诺沃依地震带分为两支, 北支沿着斯塔诺沃依山脉至乌达湾(鄂霍次克海), 南支通过 Tukuringra-Dzhagdy(T-D)山脊^[9-10]。Petit 认为板块北边界从从乌达湾开始, 穿过阿尔丹地盾南部和贝加尔裂谷(BRZ)东北边缘, 后沿着贝加尔盆地一直往西到达蒙古北部盆地。Malyshev 的研究认为北部边界是一个隆起的软流圈条带, 从贝加尔裂谷向东延展, 通过杰尔图拉克断裂, 阿尔丹-斯塔诺沃依地盾南缘, 结雅等一系列中新代盆地, 一直延伸到鄂霍茨克板块。Imaev 认为北部边界是一个缓冲型的地震条带, 缓冲区北缘对应奥莱克马-斯塔诺沃依地震带, 南缘对应蒙古-鄂霍茨克断裂带。本文通过研究 Amurian 板块的动力学过程, 试着确定其南部边界, 并借助 GPS、地质和地球物理数据来研究其东部和北部边界与其它板块的相互作用。

1 Amurian 板块旋转模型

根据板块构造理论,地壳运动形式符合球体的运动规则。

$$V_i = \omega \times r_i \quad (1)$$

式(1)中, V_i 为地面运动观测速度; ω 为块体旋转角速度; r_i 为测点旋转半径。

也就是说，在球体上的刚性块体的运动可以根据它的旋转中心和旋转速度来确定，旋转中心的坐标是根据最基本的转换断层的走向来计算的，板块的相对位移速度主要通过二个参数来确定，第一是根据海洋磁异常推断；第二是使用利应用越来越广泛的 GPS 测量相对运动的绝对值速度场来计算。

虽然 Amurian 板块属于欧亚板块内部的二级块体,但仍可以使用公式(1)中的理论来计算其相对旋转中心。为了计算相对准确,选取了中国东北地区的 17 个 GPS 站点的速度场,其中郯庐断裂带 WS 部的 11 个站点参与计算;断裂带 ES 部的 6 个站点作为参考站点(图 2)。通过 GPS 速度场可以看出,速度方向由 ES 向逐渐向 EN 向偏转,形成一个明显的旋转弧;速度值在郯庐断裂带附近异常变小,且速度方向有重新向 ES 向偏转的趋势,说明郯庐断裂带二侧的块体在速度上并不同步,运动方向亦不同步,这符合郯庐断裂带右旋走滑的基本特点。

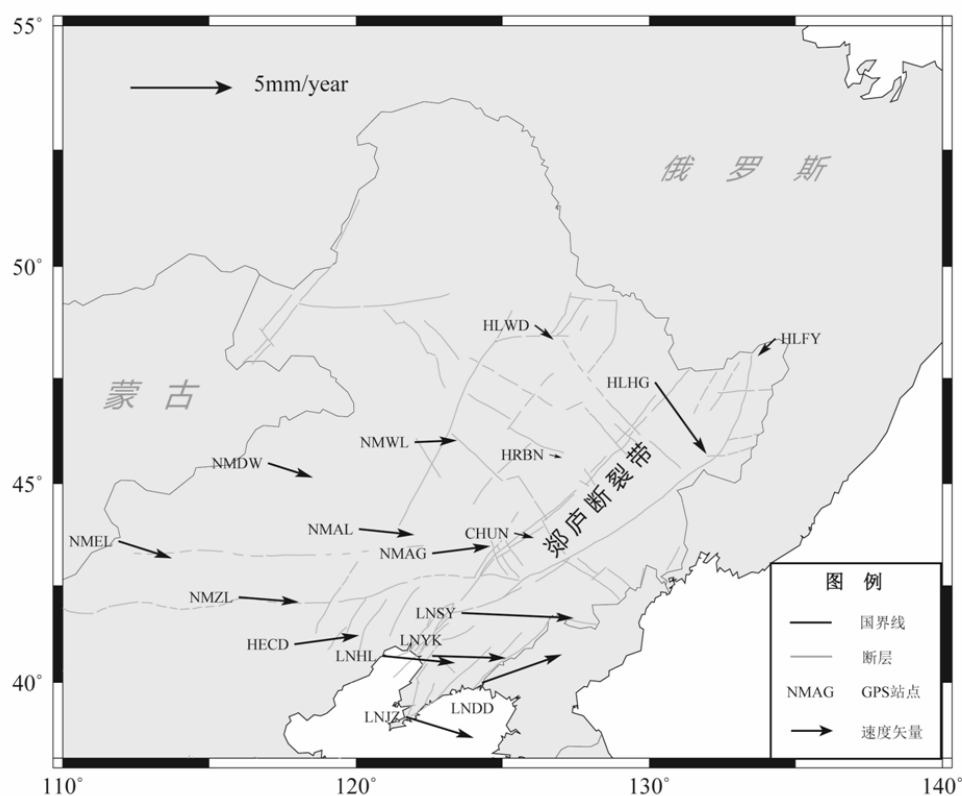


图 2 利用 GPS 数据计算 Amurian 板块的旋转中心

Fig.2 The rotation center of the Amurian plate calculated by using GPS data

依据 GPS 速度场计算得到 Amurian 板块的旋转中心位于 $E118.4^{\circ} \pm 2.4^{\circ}$, $N57.5^{\circ} \pm 1.2^{\circ}$, 旋转速度为 $0.08^{\circ} \pm 0.020$ /百万年。在已有的研究中, 依据 GPS 数据计算 Amurian 板块旋转中的研究主要分为二个派, 其中一派给出旋转中心位于 $E120^{\circ} \pm 3^{\circ}$, $N57^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 附近(斯塔诺沃依山脉); 另一派给出的旋转中心偏差比较大, 位于 $E150^{\circ} \sim E150^{\circ}$, $N45^{\circ} \sim E60^{\circ}$ 附近(鄂霍次克海)(表 1)。造成旋转中心坐标不一致的主要原因是选择了不同的 GPS 站点来计算板块的运动特征, 同时受限于 Amurian 板块内部的 GPS 站点

相对较少且分布不均匀的影响。例如 Prawirodirdjo^[11]和 Sella^[12]只用了 3 个站点的数据来计算 Amurian 板块的旋转参数, Kreemer^[13]使用了 6 个站点的数据, Jin^[14]从 11 个站点数据中计算出了旋转中心, Apel^[15]综合了公开发表的论文数据, 共搜集到 32 个站点的数据, Timofeev 使用了 12 个站点数据(6 个在外贝加尔地区, 6 个在远东地区)。Amurian 板块最具代表性区域是阿穆尔-结雅河流域, Ashurkov 在此区域内布设了测量点, 这将大幅度的提高 Amurian 板块旋转参数的计算精度。

表 1 Amurian 板块的旋转参数

Table1 Rotation parameters of the Amurian Plate

旋转中心分类	数据来源	旋转中心坐标		旋转速度 (°/百万年)	中心计算误差	
		东经/(°)	北纬/(°)		经度/(°)	纬度/(°)
第一派别	Zonenshain and Savostin, 1981	117.450	56.590	0.100	--	--
	Parfenov et al., 1987	118.020	57.900	0.410	--	--
	Wei and Seno, 1998	123.250	60.420	0.025	--	--
	Hsu et al., 2006	121.720	60.653	0.102±0.002	1.65	0.87
	Timofeev et al., 2008	117.100	57.600	0.083	--	--
	S.V. Ashurkov, 2011	122.285	58.950	0.095±0.003	0.73	0.519
	本文计算结果	118.400	57.500	0.080±0.020	2.40	1.20
第二派别	Kreemer et al., 2003	157.500	58.500	0.034±0.013	5.50	3.40
	Prawirodirdjo and Bock, 2004	154.747	45.433	0.093±0.230	43.00	4.40
	Calais et al., 2006	133.000	57.400	0.077±0.016	4.90	2.14
	Apel et al., 2006	148.350	51.626	0.063±0.017	5.31	4.20
	Jin et al., 2007	153.417	50.464	0.056±0.008	10.00	2.90
	Shestakov et al., 2008	150.824	59.778	0.037	--	--

贝加尔湖南部观测扩张速率为 2.3 mm/a, 而贝加尔湖北部盆地扩张速率只有 1.25 mm/a, 具有显著的线性下降趋势, 主要因为边界南北板块的运动模式转变, 贝加尔裂谷带是 Amurian 板块旋转的起始点, 同时也是旋转运动得以维持的发力点。

通过比较贝加尔地震带和斯塔诺沃依地震带最大压应力的水平方位角和震源滑动矢量, 并参考已有关于 Amurian 板块旋转参数的各项研究, 在 Amurian 板块北部边界, 有一个明显的应力变化带, 分别为贝加尔裂谷带的 NW-SE 向的拉伸应力, 奥莱克马-斯塔诺沃依山脉至 T-D 山脊区域的 NNE-SSW 向的挤压应力。Shevchenko 认为 T-D 山脊是欧亚板块斜向俯冲到 Amurian 板块下挤压隆升, 或者是 Amurian 板块斜向推覆挤压欧亚板块形成的。Imave 依据地质、构造和地震数据, 推断出挤压和拉伸应力转变区域位于约 $E121^{\circ}E$ 的奥莱克马河中游。根据 Amurian 板块北边缘震源滑动

矢量推断出了板块的旋转中心, 结果很好的体现了边界带挤压与拉伸应力的转换关系(图 3)。本文计算结果和其中一派别的计算结果很好的吻合了 Amurian 板块北边界 BRZ 区域的的拉伸矢量方向, 同样吻合了奥莱克马-斯塔诺沃依山脉和 T-D 山脊的挤压矢量方向, 同时对中国东北地区的断裂构造也有了较好的解释^[16]。其中另一学派派别代表给出的中心距离 $E121^{\circ}E$ 的位置太远, 所以不能很好的解释整个 Amurian 北边界的挤压与拉升应变效应。

2 Amurian 板块沿郯庐断裂带二级划分

2.1 朝鲜半岛的归属性

为了研究朝鲜半岛是否属于 Amurian 板块, 引用 Jin 的数据^[17], 使用 χ^2 (卡方检验) 测试不同模型计算结果和数据的相关性, χ^2 是一个加权速度差的平方值:

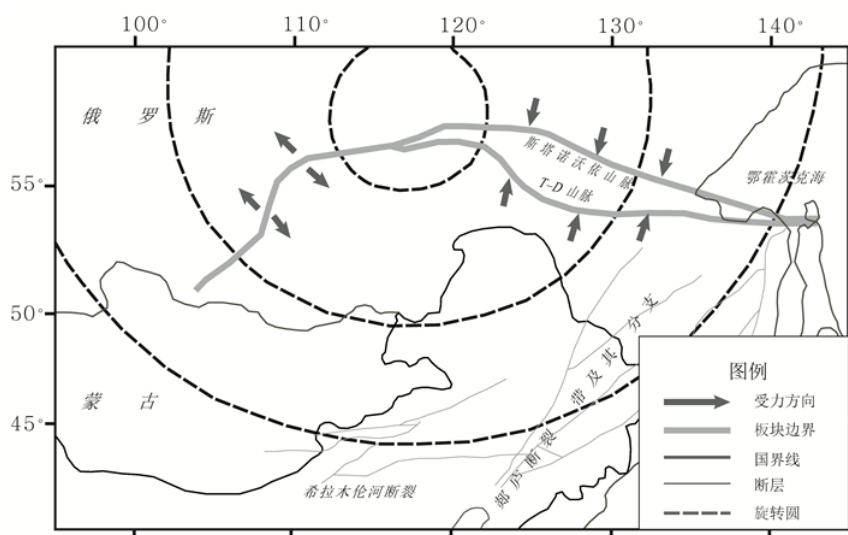
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(v_o(i) - v_m(i))^2}{\sigma_o^2(i)} \quad (2)$$

式(2)中, $v_o(i)$ 是站点 i 的观测速度, $v_m(i)$ 是站点 i 在旋转模型内的计算速度, $\sigma_o^2(i)$ 是观测速度的方差值, n 是 GPS 站点的个数。

要检查朝鲜半岛是否属于 Amurian 板块的一部分, 引入 F 自由度系数:

$$F = \frac{(x_{\text{plate1}}^2 - x_{\text{plate2}}^2) / 3}{x_{\text{plate2}}^2 / (n-3)} \quad (3)$$

首先假设 Amurian 板块分为二个独立的块体, 沿郯庐断裂带以北设为 Amurian 板块(简写 AM), 以南设为朝鲜半岛(简写 KP)。plate1 模型假设 KP 是 AM 的一部分, plate2 模型假设为 KP 和 AM 是相互独立的旋转块体, 通过比较 F 系数来对比模型的符合性^[8]。



注: 浅色长条代表拉伸应力矢量方向; 黑色长条代表挤压应力矢量方向; 虚线段代表旋转模型; 细红色线段代表断裂带; 粗浅色实线段代表 Amurian 板块北边界沿斯塔诺沃依划定; 粗浅色虚线段代表 Amurian 板块北边界沿 Tukuringra-Dzhagdy 山脊划定。

图3 震源滑动向量与阿穆尔板块旋转模型

Fig.3 Slip-vectors in the earthquake foci and the rotation models of the Amurian Plate

根据表2计算结果, KP 和 AM 作为独立二个板块(KP-AM)的模型中, χ^2 值有明显的下降, 从一个板块(KP+AM)的 209 下降到 115, F 值为 25.93, 但远远大于 99% 置信水平值 3.9。当假设 KP 属于 SC 的一部分, χ^2 值从(SC+KP)385 下降到(SC-KP) 128, F 值增加到 65.3, 同样远远大于 99% 置信水平值 3.9。通过计算可以推断, 朝鲜半岛可能既不属于 Amurian 板块, 也不属于中国南部板块, 从板块动力学意义上讲, 朝鲜半岛属于一个刚性的相对独立的次级板块。

2.2 郯庐断裂带能量释放

根据古登堡-里克特经验公式对朝鲜半岛及其周围的贝加尔断裂带、蒙古中部、中国东北、日本西南和库页岛 6 个区域地震能量释放进行估算, 结果表明, 1900—2014 年以来的一个多世纪, 此区域的外部旋转应变累积能量主要通过蒙古、中国华北和日本西南地震带释放, 板块内部因旋转而产生的应变能量通过中国东北地区沿郯庐地震

带释放(图4)。据估算, 沿着此区域边缘发生的灾难性地震($M \geq 6.0$)释放总能量是朝鲜半岛地震($M \geq 3.0$)的 $10^5 \sim 10^6$ 倍, 日本西南地震释放了最大的能量约 10^{26} 尔格, 蒙古地震释放了量 10^{25} 尔格, 中国东北估计为 10^{24} 尔格, 贝加尔断裂带和库页岛地震各释放了约 $10^{23} \sim 10^{24}$ 尔格, 而朝鲜半岛释放了约 10^{21} 尔格, 在量级上朝鲜半岛可以视为能量释放空白地带, 加之朝鲜半岛近 2000 年内从未记载过灾难性的地震这将有利的说明朝鲜半岛不处在应力大量释放的边界带上, 而是一个低地震活动性的“安全岛”区域。另外 Kim and Gao 通过对 ≥ 4.0 级地震的 b 值进行了系统研究, 发现朝鲜半岛的 b 值长期稳定在约 0.91 左右, 并没有应力累积效应的发现, 这为朝鲜半岛不属于 Amurian 板块提供了另一个科学的依据。

3 结语

Amurian 板块的边界划分问题一直有争议, 整体上存在着二种大的划分方式, 其每种划分方式

表 2 不同板块模型的统计检验
Table 2 Statistic tests of different block models

板块数量	板块组合	χ^2	χ_f^2	f	F
1	AM+KP	209	2.15	97	--
2	AM-KP	115	1.22	94	25.93
1	SC+KP	385	3.81	101	--
2	SC-KP	128	1.31	98	65.30

注：AM：Amurian；KP：Korea Peninsula；SC：South China； F ：自由度； χ_f^2 ： χ^2 与 f 的比值。

的合理性需要更进一步的广泛研究，同时需要更为密集的区域大地测量网。郯庐断裂是中国和朝鲜半岛之间的一条重要的断裂带，它南接秦岭-大别山造山带，穿过黄海到中国东北，并延伸到鄂霍次克海。它是多年来 Amurian 板块东南边界划定中最为争议的地方，直接关系着朝鲜半岛是否属于 Amurian 板块的问题。

通过计算 Amurian 板块的 GPS 速度场、旋转模型应力矢量、卡方检验和能量释放等几个方面的研究，得出以下几个结论：朝鲜半岛是一个相

对独立的刚性块体，即不属于 Amurian 板块（AM-KP 模型）；即使 Amurian 板块的南边界绕过朝鲜半岛沿日本海划分（AM+KP 模型），也不能忽略郯庐断裂带在板块内部的地位，因其是一条能量释放的重要边界带；GPS 和应力矢量的计算证明 Amurian 板块（AM-KP 模型）存在一个共同的旋转中心。综上所述，郯庐断裂带应该是 Amurian 板块的南边界（AM-KP 模型）；至少是 Amurian 板块的二级边界（AM+KP 模型），把 Amurian 板块分为北部和南部（朝鲜半岛）二个次级板块。

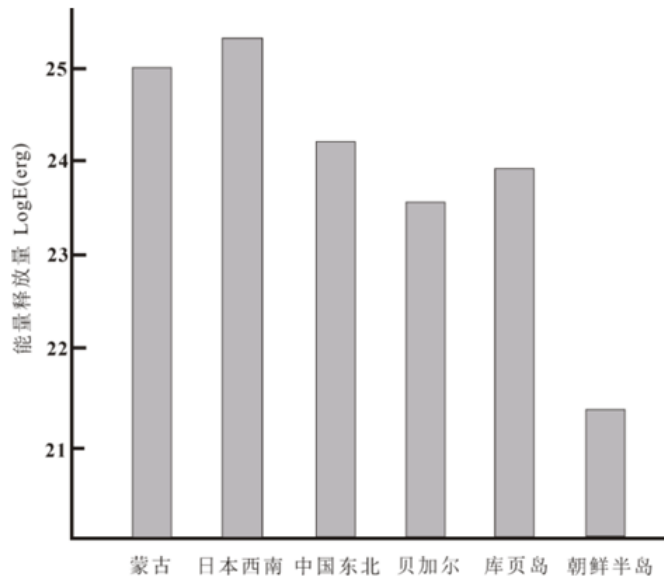


图 4 1900—2014 年阿穆尔板块周缘地震能量释
Fig.4 Energy release in the Amurian boundary during 1900 and 2014

致谢：GPS 数据来源于“中国大陆构造环境监测网络”，感谢“陆态网”数据的各位数据维护及处理人员。

参考文献：

- [1] DeMets C,Gordon R G,Argus D F,et al. Current plate motions [J]. Geophys. J. Int,1990,101(2):425-478.
- [2] DeMets C,Gordon R G,Argus D F,et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions [J]. Geophys. Res. Lett, 1994,21 (20):2 191-2 194.
- [3] Calais E,Dong L,Wang M,et al. Continental deformation

- in Asia from a combined GPS solution [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33 (24): L24319.
- [4] Bird P. An updated digital model of plate boundaries [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, 4(3): 1027.
- [5] Parfenov L M, Berzin N A, Khanchuk A I. The model of the formation of orogenic belts in Central and Northeast Asia [J]. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2003, 22 (6): 7–41.
- [6] Petit C, Fournier M. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling [J]. *Geophys. J. Int.*, 2005, 160(6): 357–369.
- [7] Imaev V S, Imaeva L P, Koz'min B M, et al. Earthquake-induced buffer structures between the Eurasian and Amurian plates in South Siberia [J]. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2003, 22 (6): 55–61.
- [8] Malyshev Yu F, Podgornyi V Ya, Shevchenko B F, et al. Deep structure of the Amur lithospheric Plate border zone [J]. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2007, 26 (2): 3–17.
- [9] Gatinsky Yu G, Rundquist D V. Geodynamics of Eurasia: plate tectonics and block tectonics [J]. *Geotektonika*, 2004 (1): 3–20.
- [10] Zonenshain L P, Savostin L A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia [J]. *Tectonophysics*, 1981, 76 (1–2): 1–45.
- [11] Prawirodirdjo L, Bock Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109 (B8): B08405.
- [12] Sella G F, Dixon T H, Mao A. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (B4): 2081.
- [13] Kreemer C, Holt W E, Haines A J. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation [J]. *Geophys. J. Int.*, 2003, 154(1): 8–34.
- [14] Jin Sh, Park P H, Zhu W. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 257 (3–4): 486–496.
- [15] Apel E V, Bürgmann R, Steblov G, et al. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33 (11): L11303.
- [16] Timofeev V Yu, Gornov P Yu, Ardyukov D G, et al. GPS measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin network, the Far East [J]. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2008, 27 (4): 39–49.
- [17] Jin S G, Park P H. Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements [J]. *Earth Planets Space*, 2006, 58: 529–534.
- [18] Stein S, Gordon R G. Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, 69 (2): 401–412.