

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2009.01.013

郯庐断裂带北段及邻区现代地震 活动性与应力状态

葛荣峰 张庆龙 解国爱 徐士银 王锡勇 陈娟

(南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093)

摘 要 收集了郯庐断裂带北段及邻区自1964年1月至2008年1月的1254个 $M_L \geq 2.0$ 的地震数据和191条震源机制解、198条原地应力测量数据,通过震中分布、震源深度、应变释放速率的分析计算和震源机制解及其它应力数据的统计,探讨了郯庐北段现今的地震活动性和应力状态。结果表明,郯庐断裂带北段及邻区的地震活动可分为日本海-长白山深震区、郯庐断裂带北段地震区、松辽盆地西缘地震区和松辽盆地内部地震区;郯庐断裂带北段现今地震强度较小,频度较低,但空间差异性显著,依兰-伊通断裂活动性比敦化-密山断裂强,且具有两端强而中间弱的分段活动特点;深震区 P 轴平均走向为 288° ,倾角约 31° ,断裂活动以逆断为主;郯庐断裂带北段附近浅震 P 轴走向以 $NEE-SWW$ 向为主,倾角平均 26° , T 轴走向以 $NNW-SSE$ 向为主,倾角平均 23° ,断裂活动以走滑和逆断为主。浅震区和深震区主压应力方位存在差异,这可能是在西太平洋板块低角度高速水平消减产生的 NNW 向挤压应力作用下,郯庐断裂带北段右行走滑派生的次级应力场的影响。

关键词 郯庐断裂带北段 震源机制解 地壳应力 西太平洋板块 中国东北

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2009)01-0141-14

0 引言

郯庐断裂是中国东部一条巨型 NNE 走向的深大断裂带,自中生代以来经历了复杂的构造历史,是一条至今仍在活动的大型活断层,对现今的地震活动有很强的控制作用(李家灵等,1994)。晁洪太等(1999)认为郯庐断裂带内大震主要发生在下辽河-莱州湾和潍坊-嘉山这2段内;施炜等(2003)认为郯庐断裂中段在新构造期强烈右行走滑,地震活动具有分段性,山东段强于江苏段和安徽段;刘东旺等(2006)认为安徽段现今中小地震较为活跃,活动性不强,断裂带内 P 轴集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$, T 轴集中在 $0^\circ \sim 20^\circ$,断裂活动以走滑为主。然而,对郯庐断裂带北段现今的地震活动性、应力状态和断裂运动目前尚未见系统的讨论。一般认为,郯庐断裂带北段是指沈阳以北的部分,分为依兰-伊通断裂和敦化-密山断裂,呈 $NE-NNE$ 向延伸至俄罗斯境内,由南向北依次切过华北板块北缘、松嫩-张广才岭微板块、佳木斯-兴凯微板块、那丹哈达地体等不同时代、不同性质的大地构造单元(牛雪等,2000),是对东北地区中生代以来的构造活动起重要控制作用的两条深大断裂(张庆龙等,2005),新生代以来仍都有强烈的

〔收稿日期〕 2008-01-07 收稿,2008-05-14 改回。

〔基金项目〕 国家自然科学基金重点项目(40634021)资助。

火山和地震活动(陈洪洲等, 1996; 章振铨等, 1999; 郑照福, 2006)。郯庐断裂带北段处于西太平洋板块向东北大陆俯冲形成的深震带前缘, 深、浅源地震活动性、构造应力状态和断层运动性质之间的关系值得进一步探讨。

本文依据最新的地震目录和震源机制解及其它地壳应力数据, 通过震中分布、震源深度、应变释放速率的分析计算和震源机制解及原地应力测量数据的统计, 探讨了郯庐断裂带北段现今的地震活动性、应力状态和运动性质及其与深源地震之间的关系。

1 数据与方法

本文选择 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $118^{\circ} \sim 136^{\circ}\text{E}$ 作为研究区域, 包括中国东北 3 省、内蒙古、日本海、俄罗斯远东部分地区。地震目录主要取自中国地震台网(CSN)、全球地震台网(GSN)、国际地震中心(ISC)和美国国家地震信息中心(NEIC)。通过几个目录的对比, 对其中重复记录的地震进行校正, 减小了震中定位、震源深度、震级的误差, 共得到该区自 1964 年 1 月至 2008 年 1 月的 $M_L \geq 2.0$ 地震 1 254 条, 基本代表了该区 44 年来的地震活动情况。不同的地震目录给出的震级形式不同, 有的甚至缺失, 本文通过几个目录的对比, 查漏补缺后, 按照下式统一换算成面波震级 M_s :

$$\begin{aligned} M_s &= 1.59m_b - 4.0 \\ M_s &= 1.13M_L - 1.08 \end{aligned} \quad (1)$$

地震活动的应变释放速率可以代表地震活动的水平:

$$\dot{e} = (\sum \sqrt{E})/T \quad (2)$$

其中, E 为单个地震释放的能量, $\lg E = 1.5M_s + 4.8$ (焦耳), T 为研究期时间间隔(马宏生等, 2002)。

地壳应力状态研究主要选取“中国大陆地壳应力环境基础数据库”^①和美国哈佛大学 CMT 中心、中国地震台网 CMT 中心和其他作者发表的中强震震源机制解资料, 数据主要分布在郯庐断裂带北段附近, 对其中重复的记录相互对照修正, 确保其可靠性。针对该区中强震资料稀少的特点, 选择了大量单个或多个小震综合震源机制解资料。中强震加小震的震源机制解的统计可以消除资料不足和局部构造应力的影响, 反映该区的构造应力场和断层运动性质。此外, 还选取了水压致裂、断层滑动、钻孔崩落、应力解除、连续应力应变观测等原地应力测量获得的地壳应力资料进行统计。

2 郯庐断裂带北段及邻区的地震活动性

2.1 震中分布

从 1964 年 1 月至 2008 年 1 月 44 年来 $M_L \geq 2.0$ 地震的震中分布图(图 1)上, 可以发现郯庐断裂带北段及邻区的地震在空间上具有明显的分区特点。根据震中分布可以将该区分以下几个地震区(带)(图 1)。

2.1.1 日本海—长白山深震区

从日本海 NWW 向向中国大陆延伸, 宽约 400km, 止于汪清—绥芬河一带。该区地震震级

① 中国大陆地壳应力环境基础数据库网址: <http://www.eq-netlab.com/homepage.htm>。

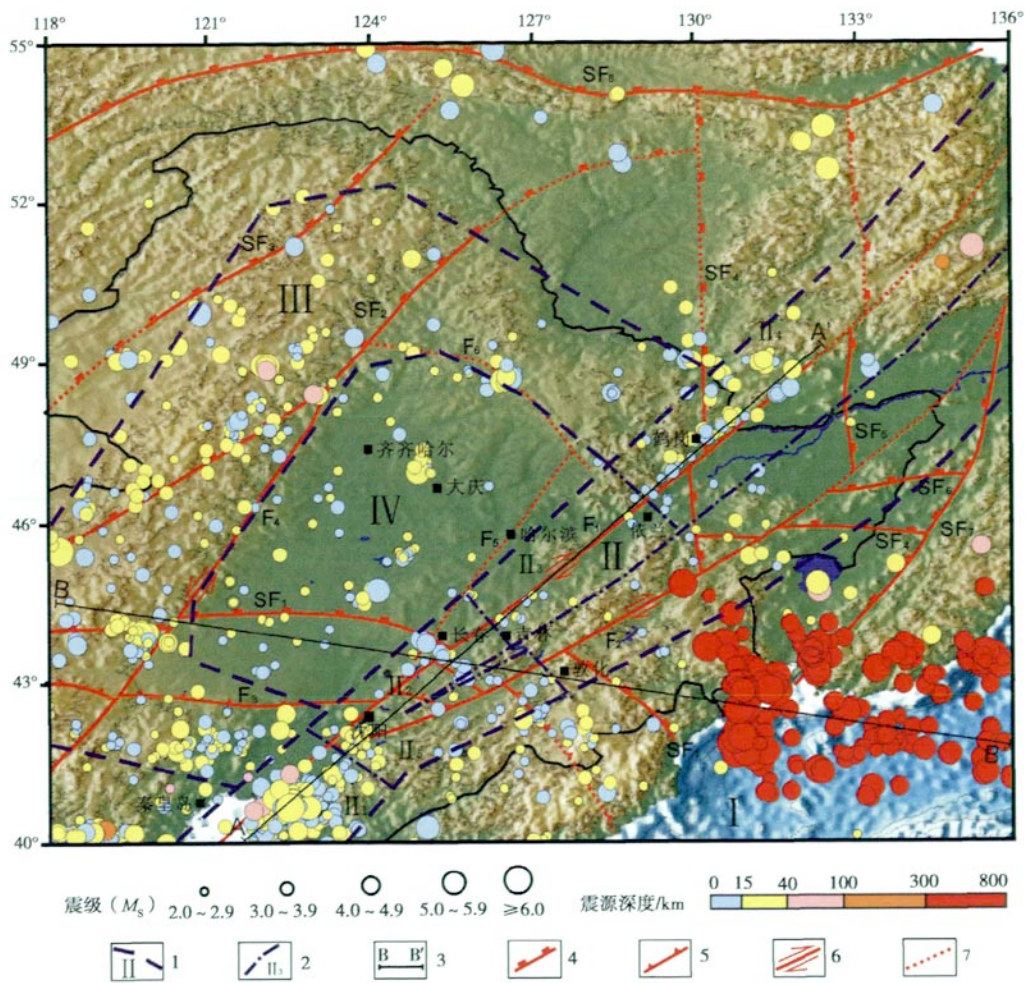


图 1 郯庐断裂带北段及邻区主要断裂与震中(1964-01—2008-01)分布

Fig. 1 Main faults and epicenter(1964-01—2008-01) distribution of the northern Tanlu Fault zone.

1 一级地震区(带), 2 二级地震区(带), 3 震源深度剖面, 4 板块缝合带, 5 逆冲断层, 6 走滑断层, 7 推测断层;地震区(带)划分: I 日本海-长白山深震区, II 郯庐断裂带北段地震区: II₁ 下辽河-渤海湾段, II₂ 沈阳-吉林段, II₃ 吉林-依兰段, II₄ 依兰-萝北段, II₅ 沈阳-敦化段; III 松辽盆地西缘地震区; IV 松辽盆地内部地震区; 主要断裂名称: F₁ 依兰-伊通, F₂ 敦化-密山, F₃ 赤峰-开原, F₄ 嫩江-白城, F₅ 哈尔滨-长春, F₆ 塔溪-林口; 板块缝合带: SF₁ 西拉木伦, SF₂ 二连-黑河, SF₃ 塔源-喜桂图旗, SF₄ 牡丹江, SF₅ 那丹哈达, SF₆ 八面通, SF₇ 锡霍特-阿林, SF₈ 额霍次克

较大,震源深度从日本海向中国大陆增大,达到近 600km,是中国惟一的深震带,是西太平洋板块下插到东北大陆之下的结果(孟森宪等,1996)。

2.1.2 郯庐断裂带北段地震区(带)

郯庐断裂带北段地震区(带)包括依兰-伊通断裂带和敦化-密山断裂带之间及外围约 100km 的地区,地震带内震中沿断裂带分布比较密集,可见断裂活动对地震有一定的控制作用。

依兰-伊通断裂带和敦化-密山断裂带新生代都有很强的活动性。依兰-伊通断裂带由

2 条近于平行的主干断裂构成,多处被 NW 向断裂切截;古近纪的强烈伸展裂隙,控制了依兰-伊通裂谷的发育,其中填充了近 5 000m 的陆相沉积;新近纪在裂谷带内有大量的橄榄玄武岩火山活动(陈洪洲等,1996)。敦化-密山断裂带由 2 条高角度对冲逆断层组成,沿断裂带有大面积多期次新生代碱性玄武岩呈线状分布(章振铨等,1999)。

依兰-伊通断裂是东北地区一条重要的现代地震活动带,自 1918 年有地震活动的文字记载以来,断裂带附近共发生地震 300 余次,其中震级最大的是 1963 年 6 月 21 日萝北 5.8 级地震。从 1964 年 1 月以来的震中分布(图 1)来看,沿断裂带中小地震呈 NE 向线状分布,受 NW 向次级断裂分割,地震分布不均匀,分段性比较明显。其中,沈阳-吉林段处于华北板块北缘与东北复合板块的缝合地带,地震分布比较密集,沈阳和长春附近是地震活动相对频繁的地区。吉林-依兰段地震分布稀疏,44 年来几乎无 4 级以上地震发生,地震活动比较弱。依兰-萝北段(包括境外部分)地震活动性较强,破坏性大震频发且沿断裂带密集分布,地震主要分布在断裂带西侧的小兴安岭造山带内,这可能和断裂带东侧三江盆地内巨厚的沉积盖层中应力不易积累有关(郑照福,2006)。

敦化-密山断裂现今地震活动性则相对较弱,自 1964 年以来 44 年中只有 30 多次地震沿断裂带附近发生,且震级都在 4.0 级以下,震级小,频度低,震中分布零散,只在沈阳-敦化段沿断裂呈 NE 向线性分布,而敦化-穆棱段几乎无浅源地震活动,穆棱以北浅震活动很少。敦化-密山断裂是深、浅源地震活动的分界线。

总体而言,郯庐断裂带北段现今地震活动不强,其中依兰-伊通断裂对地震的控制强于敦化-密山断裂,且具有分段活动性。

2.1.3 松辽盆地西缘地震区

松辽盆地周围被前中生代不同时期的造山带所包围,盆山之间常以深大断裂为界。造山带地震活动频度高、震级小,其中,盆地西北部大兴安岭造山带和南部的燕山造山带东段地震强度较大,而东北部的小兴安岭地区活动水平较弱。

2.1.4 松辽盆地内部地震区

与断裂带、周围造山带相比,松辽盆地内部地震活动震级大,频度低,这可能和盆地基底刚性比较强,应力不易集中而向周围传递有关。地震大致沿 NE 方向线性分布,可能和盆地 NE 向基底断裂活动有关。

2.2 震源深度

从沿依兰-伊通断裂带的震源深度剖面(图 2a)可见,断裂带附近的震源深度 97% < 35km, 59% < 15km, 平均为 17km。因此,依兰-伊通断裂控制的地震活动震源大多位于中上地壳,而下辽河-渤海湾段有个别震源深度达 87km。由图 2 可见,震源深度的分布也具有分段性,与上述震中分布特征一致。

某一时期之内某一大陆地震区(带)的最大震源深度(MFD)与地震活动性强弱可能有一定的相关性。例如,郯庐断裂带中段的下辽河-渤海湾段地震密集,大震频发,最大震源深度为 87km,而往北依兰-伊通断裂带地震活动明显减弱,地震稀疏,最大震源深度较小,分段明显,沈阳-吉林段为 28km,吉林-依兰段为 20km,依兰-萝北段为 34km,而沈阳-吉林段和依兰-萝北段明显比吉林-依兰段地震活动强烈。不同地震区(带)之间,最大震源深度也和地震密集程度成正相关。如图 2b 中,松辽盆地西缘地震区最大震源深度为 27km,松辽盆地内

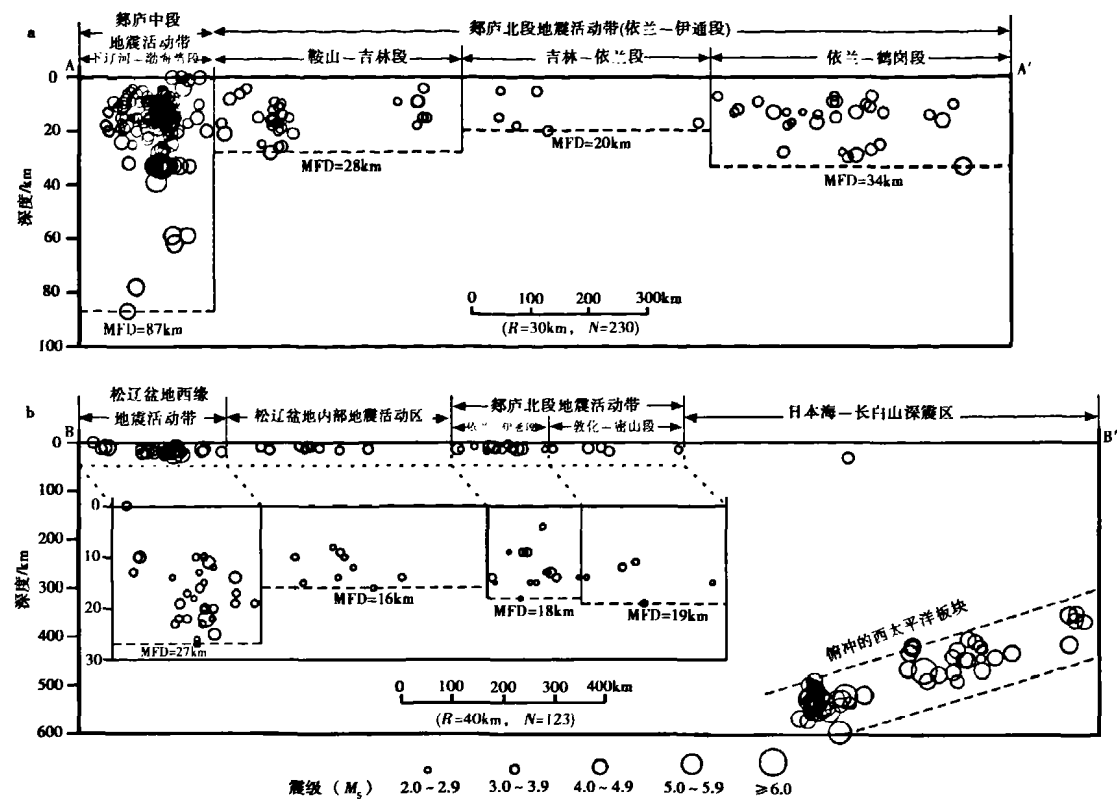


图 2 郯庐断裂带北段震源深度剖面

Fig. 2 Cross sections of source depth along or across the northern Tanlu Fault zone.

a 沿依兰—伊通断裂带的剖面; b 斜交郯庐断裂带北段的剖面

R: 距剖面线距离; N: 地震数目; MFD: 最大震源深度; 剖面位置见图 1

部地震区最大震源深度为 16km，郯庐断裂带北段地震带最大震源深度为 18~19km，该剖面上松辽盆地西缘地震区的地震活动明显比其它 2 个地震带(区)密集。可见，最大震源震度可以作为表征大陆地震带(区)地震活动性的参数之一。

从图 2b 可见，日本海—长白山深震带反映了西太平洋板块从日本海沟 NWW 向向中国大陆俯冲形成的 Benioff 带的形态，倾角约为 21°，比日本海沟处的倾角(约 30°)小，也比两侧的千岛俯冲带和伊豆—小笠原俯冲带倾角小(孙文斌等，2004)。郯庐断裂带北段处于俯冲带前缘正上方，地震活动比较密集，而在深震带上方几乎没有浅震的发生。

2.3 地震应变释放速率

用式(2)计算上述各地震区(带)的应变释放速率，结果见表 1。由于郯庐断裂带北段及附近地区大震稀少，历史记录完整性差，本文选取 1964 年 1 月以来 44 年的完整地震记录，利用大量小震来消除大震不足和记录不全引起的误差。对于某一个地震区(带)而言，在一个或几个地震活动周期中，地震释放的应变和地壳变形积累的应变大致相等。研究表明，该区地震活动具有 20a 左右的周期，1964 年至 2008 年大致分属两个地震平静期和活跃期(孙文福等，2004)。马宏生等(2002)认为，地震平静期是地震能量的积累阶段，因此以平静期作为一个地

表 1 郯庐断裂带北段及邻区的应变释放速率

Table 1 Strain release rate of the northern Tanlu Fault zone and the adjacent areas

地震带(区)		起算年代	时间间隔 /a	地震数	最小震级 (M_s)	最大震源 深度/km	应变释放速率 /($J^{1/2}/a$)
深震区		1964	44	205	2.4	600	3.74×10^7
浅震区	下辽河—渤海湾段	1964	44	416	1.6	87	3.43×10^6
	郯庐断裂带北段	1964	44	32	1.8	33	5.97×10^4
	吉林—依兰段	1964	44	13	1.8	20	7.73×10^3
	依兰—萝北段	1964	44	68	1.4	43	3.43×10^5
	沈阳—敦化段	1964	44	30	1.9	25	1.81×10^4
	松辽盆地西缘地震区	1964	44	240	1.6	78	1.01×10^6
	松辽盆地内部地震区	1964	44	72	1.8	31	1.23×10^5

震周期的开始更为合理。本文的计算满足了上述要求，具有一定的合理性。

从计算结果来看，东北地区可分为地震活动性截然不同的两大地震区。由西太平洋板块俯冲形成的日本海—长白山深震区，大震活动频繁，应变释放速率和中国地震活动最强烈的西藏地区($3.34 \times 10^7 J^{1/2}/a$)相当(马宏生等, 2002)，但震源深度在 600km 左右，对地表变形影响不大。浅震区除下辽河—渤海湾地区以外平均应变释放速率为 $1.56 \times 10^6 J^{1/2}/a$ ，地震活动比较弱，但地区差异性显著。郯庐断裂带北段地震活动有分段特征，渤海湾—下辽河段明显比以北部分活动性强，依兰—伊通断裂比敦化—密山断裂活动性强，而依兰—伊通断裂沈阳—吉林段和依兰—萝北段比吉林—依兰段活动性强，地震活动性呈现中间弱，两端强的特点。

3 郯庐断裂带北段及邻区的应力状态与断层活动性质

3.1 应力状态

3.1.1 震源机制解统计

震源机制解是研究地壳应力状态的有效手段之一。由于深震和浅震发震机制不同，对深震区和浅震区分别进行统计。深震区主要选择“中国大陆地壳应力环境基础数据库”提供的从日本海到东北深震区的震源深度 $> 100\text{km}$ 的 51 个震源机制解，结果如图 3。可见，深震最大主压应力轴(P 轴)方位集中在 $255^\circ \sim 295^\circ$ 之间，平均为 288° ，与日本海沟俯冲带的 Benioff 带倾向一致(孙文斌等, 2004)， P 轴仰角较小，集中在 $25^\circ \sim 35^\circ$ ，平均为 31° ，与俯冲带倾角一致； T 轴方位比较分散，仰角大多数在 45° 以上； B 轴方位集中在 $185^\circ \sim 205^\circ$ 之间，平均 198° ，与俯冲带走向一致，仰角较小，平均 28° 。可见，深震的发生主要受 NWW 向挤压应力场控制，代表了该处西太平洋板块向东北大陆俯冲的一级应力场方向。

郯庐断裂带北段浅源中强震稀少，为了减少统计误差，还选用了张萍等发表的单个小震震源机制解或多个小震综合震源机制解(表 2)。同一地震不同的作者、不同的方法求得的结果可能不同，本文剔除了其中完全相同的记录，而对不同的结果一并进行统计，这样更有助于减小误差；对研究比较详细的地震，例如 1999 年 11 月海城—岫岩 5.1 级地震，张萍等(2001, 2003a, b, 2004b)、谷光裕等(2001)、兰从欣等(2006)不但给出了主震的震源机制解，而且给出了大量前震和余震的震源机制解，除主震之外本文只选择其平均值作为一条记录，以免以偏

表 2 郯庐断裂带北段浅震震源机制解与地壳应力研究状况

Table 2 Research status of focal mechanism of shallow earthquakes and crustal stress in northern Tanlu Fault zone

数据来源	震源机制解数目	地震发生时间	地区	方法	应力状态和断层滑动特征
中国大陆地壳应力环境基础数据库	44	1920—2001	全区	综合	
美国哈佛大学 CMT	31	1962—2005	全区	地震矩张量	
国家测震台网 CMT	3	2005—	全区	波形反演	
高常波等, 2000	7	1999	岫岩—海城	P 波初动解	P : NEE
林玉祥等, 2000	27	1971—2001	辽宁及邻区	各种结果加权平均	P : $70.8^{\circ} \sim 72.0^{\circ}$
张萍等, 2000	23	1969—2000	辽宁	P 波初动解	P : NEE; T : NNW, 仰角 $<40^{\circ}$, 走滑错动为主
谷光裕等, 2001	6	1999	岫岩—海城	P 波初动解	P : NEE - SWW; T : NNW - SSE, 仰角 $<45^{\circ}$
康力等, 2001	6	1990—2001	吉林省中部	小震 P 波初动解	P : NEE—EW; T : NNW, 仰角 $<45^{\circ}$
张萍等, 2001	20	1999	岫岩—海城 (主震)	中小震 P 波初动解	P : NEE - SWW; T : NNW - SSE, 仰角 $<40^{\circ}$
张萍等, 2003a	41	1999	岫岩—海城 (前震)	小震 P 波初动解	P : NEE - SWW, $40^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 或 $220^{\circ} \sim 280^{\circ}$; T : NNW - SSE, $19^{\circ} \sim 328^{\circ}$ 或 $148^{\circ} \sim 199^{\circ}$
张萍等, 2003b	55	1999	岫岩—海城 (余震)	小震 P 波初动解	P : NEE - SWW, $47^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 或 $227^{\circ} \sim 260^{\circ}$; T : NNW - SSE, $316^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 或 $136^{\circ} \sim 180^{\circ}$
张萍等, 2004a	1	2001	沈阳附近	小震复合 P 波初动解	P : NEE - SWW, $245^{\circ} \angle 10^{\circ}$; T : NNW - SSE, $155^{\circ} \angle 1^{\circ}$, 走滑错动为主
张萍等, 2004b	4	2002	营口—海城	中小震 P 波初动解	P : SWW, $76^{\circ} \angle 27^{\circ}$; T : SSE - NNW, $341^{\circ} \angle 9^{\circ}$
张鸣凤等, 2005	13	1963—2003	依兰—伊通断裂北段 (吉林)	P 波初动解	P : NE, $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 仰角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$
吕政等, 2006	4	2006	吉林前郭—乾安	P 波初动解	P : 近 SN; NW 向断层走滑兼正断
兰从欣等, 2006	3	1999	岫岩—海城	P 波初动解	P : 地震前后 SEE—NEE 变化

概全。最后得到中强震和小震震源机制解共 140 个, 这些地震主要分布在郯庐断裂带北段附近, 基本代表了郯庐断裂带北段的地壳应力状态。统计结果见图 3, 其中 P 轴方位以 NEE - SWW 向为主, 平均为 76° 或 258° , 仰角多 $<45^{\circ}$, 平均 26° ; T 轴方位以 NNW - SSE 向为主, 平均 142° 或 333° , 仰角多 $<45^{\circ}$, 平均 23° ; B 轴方位较分散, 仰角较大, 平均 52° 。统计结果说明郯庐断裂带北段现今主要受 NEE - SWW 向的近水平挤压和 NNW - SSE 向的近水平拉张应力的作用。

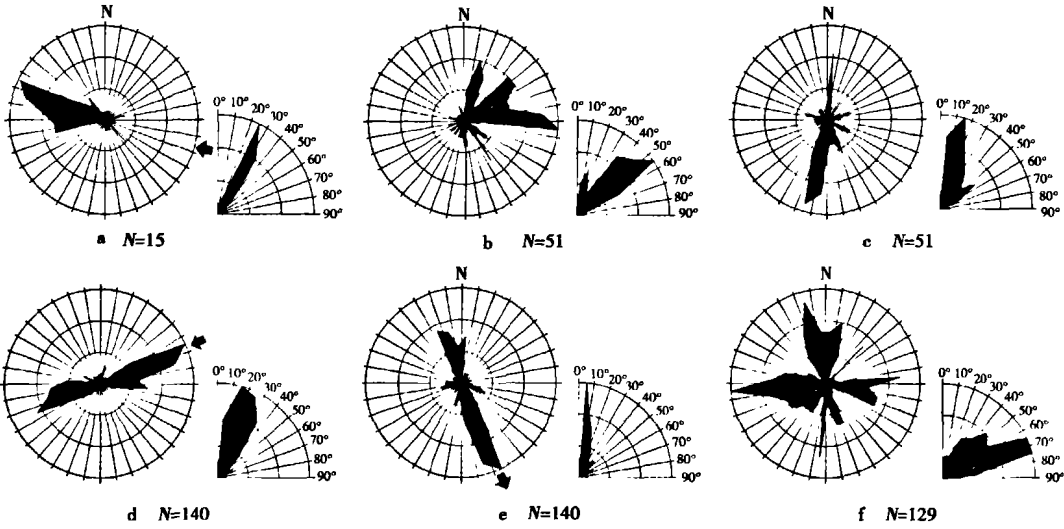


图 3 郯庐断裂带北段震源机制解统计

Fig. 3 Statistics of focal mechanism solution of the northern Tanlu Fault zone.

a 深震区 P 轴; b 深震区 T 轴; c 深震区 B 轴; d 浅震区 P 轴; e 浅震区 T 轴; f 浅震区 B 轴

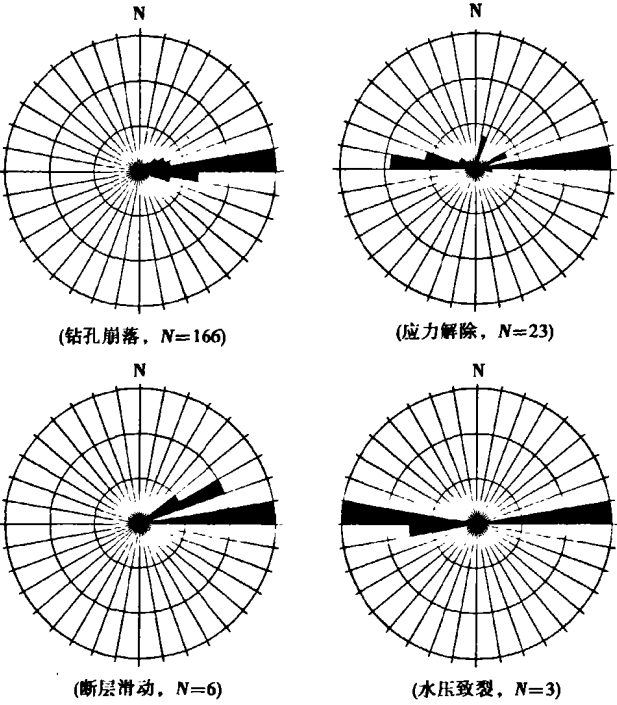


图 4 郯庐断裂带北段原地应力测量数据统计图

Fig. 4 Statistics of the in-situ stress measurement data of the northern Tanlu Fault zone.

3.1.2 其它应力资料统计

为了进一步说明郯庐断裂带北段附近的应力状态,本文还收集了水压致裂、断层滑动、钻孔崩落、应力解除、连续应力应变观测等方法获得的地壳应力资料^①(林玉祥等,2000)。这些原地应力测量数据一般是在<5 000m的近地表测得的,弥补了震源机制解资料大多反映地壳深部应力特征的缺点,是对地壳应力状态统计的重要补充,统计结果见图4。其中钻孔崩落、应力解除、断层滑动和水压致裂给出的平均最大水平主压应力轴方位分别为85.5°、88.5°、71.3°和89.1°,可见,郯庐断裂带北段近地表总体承受NEE—近EW向的挤压,与震源机制解统计给出的结果一致。

3.2 断层运动特征

根据震源机制解主应力轴仰角的大小,可以对发震断层的破裂方式进行划分,探讨某一地区的断层运动特征。本文采用崔效锋等(2005)的划分方案对郯庐断裂带北段及邻区的地震震源机制解进行统计分析(表3):深震区以逆断型、逆走滑型为主,两者占43%,可见,深震主要是在挤压的应力状态下发生的,反映了西太平洋板块俯冲产生的挤压应力。郯庐断裂带北段断层活动方式以走滑型为主,占55%,其次为逆走滑和逆断型,占20%,说明郯庐断裂带北段现今以走滑活动为主,兼有逆断活动。

表3 郯庐断裂带北段的断层运动方式统计
Table 3 Statistics of the fault movement mode of the northern Tanlu Fault zone

地震区(带)	正断型	正走滑型	走滑型	逆走滑型	逆断型	不定型
	$P > 52^{\circ}; T < 35^{\circ}$	$40^{\circ} \leq P < 52^{\circ};$ $T < 20^{\circ}$	$P < 40^{\circ}; T < 40^{\circ};$ $B > 45^{\circ}$	$P < 20^{\circ};$ $40^{\circ} \leq T < 52^{\circ}$	$P < 35^{\circ};$ $T \geq 52^{\circ}$	其它
深震区	8%	2%	22%	37%	6%	25%
郯庐北段浅震区	6%	2%	55%	5%	15%	17%

4 讨论与结论

郯庐断裂带北段中生代以来主要隶属滨太平洋构造域,其复杂的构造运动历史与古太平洋板块相对于欧亚大陆的多期次不同方向的俯冲有关(张庆龙等,2005)。层析成像(Zhao *et al.*, 2004)和震源深度研究(孙文斌等,2004)表明,西太平洋板块现今正通过日本海沟以较高的速度(8~10cm/a) NWW向向东北大陆之下俯冲,俯冲角度约30°,且在500km深处有变缓的趋势。这种水平消亡为主的俯冲,使得西太平洋板块下插到1 000km以外的中国东北地区,挤压型深源大震频发说明板内承受着巨大的挤压应力,挤压应力与俯冲方向一致,为NWW向。然而,GPS观测(王小亚等,2002)和数值模拟(高祥林等,1996)显示,这种正向水平消减产生的相对运动和挤压应力大部分被海沟和岛弧吸收,只有很小的一部分传递到弧后地区,这可能是郯庐断裂带北段现今构造活动和地震水平比较弱的主要原因。

虽然郯庐断裂带北段现今地震活动性整体比较弱,但区域差异性显著,这可能与其所穿过的不同构造单元的地质、地球物理特征有关。在纵向上,以西拉木伦河缝合带为界,位于华北板块北缘及其陆缘增生带的渤海湾—下辽河段、沈阳—吉林段、沈阳—敦化段,地震活动性较

① 同142页①。

强,这可能是因为华北板块具有变质程度较高的古老结晶基底,刚性较强,容易发生脆性断裂;而张广才岭晚古生代陆缘带则相对变质程度较低,刚性较弱,加之中、新生代岩浆活动频繁,是“热而软”的地壳单元,因此位于其上的吉林—依兰段和敦化—穆棱段地震活动性很弱;北部的佳木斯—兴凯地块和华北板块类似,都是以古老陆核为中心的刚性地块,因而依兰—萝北段地震活动性有所增强。在横向上,依兰—伊通断裂是东北地区一条重要的地球物理分异带,其东西两侧重力和航磁异常特征、莫霍面和软流圈深度、地温分布特征都有明显的差异^①(牛雪等,2000),说明依兰—伊通断裂是强烈的壳幔结构变异带,而敦化—密山断裂则分异特征不是很明显,这可能是依兰—伊通断裂活动性比敦化—密山断裂强的根本原因。此外,断裂带两侧地震活动也存在差异,在渤海湾—下辽河段,相对于地温梯度高、破碎强烈的下辽河断陷,地震主要分布在断裂东侧刚性较强的辽东隆起,与此类似,在依兰—萝北段,地震主要分布在断裂西侧的小兴安岭隆起,三江盆地内部地震频率很低。

郯庐断裂带北段浅源地震所反映的挤压应力方向为 NEE—SWW 向,与深源地震震源机制解 P 轴所代表的西太平洋板块俯冲产生的挤压应力场方向(NWW 向)并不一致,而是有一个明显的夹角(30° 左右)。郯庐断裂带新构造期的右行走滑活动已被大量地质构造和震源机制解研究所证实(施炜等,2003),其主要动力来源是西太平洋板块的斜向俯冲(孟森宪等,1996)。NWW 向俯冲产生的挤压作为一级应力场斜向作用在 NE—NNE 走向的郯庐断裂带上,其剪切分力和挤压分力引起郯庐断裂的右行走滑和逆冲活动,与之共轭的是一组 NW 向左行走滑断裂(图 5a)。NE 向右行走滑的郯庐断裂可派生出 NEE—SWW 向的次级挤压应力场,这与郯庐断裂带北段附近统计得到的挤压应力场方向一致。在这一次级挤压应力场作用下,可产生一组 NNE 向和 NWW 向的共轭剪破裂(图 5b),其中 NWW 向剪裂面由于走向与俯冲挤压方向基本一致,走滑作用强烈,往往发展为 NWW 向或 NW 向左行走滑断层,切截郯庐断裂

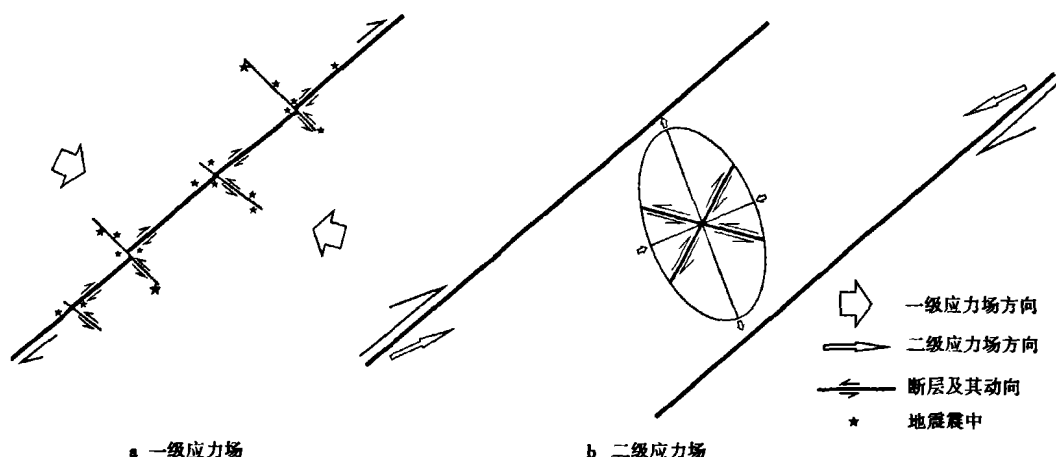


图 5 郯庐断裂带北段的应力场与断层运动分析

Fig. 5 Stress field and fault movement analysis of the northern Tanlu Fault zone.

① 王良书等,2006,郯庐断裂带北段构造体制转换与相关油气盆地演化,中国石化东北勘探新区项目报告。

带, 成为该区许多大震的发震构造, 例如 1975 年海城 7.3 级地震、1999 年岫岩 5.6 级地震(高常波等, 2000)。因此, 该区的地震构造和浅部应力场可能是在西太平洋板块俯冲产生的深部挤压应力场背景下受郯庐断裂带右行走滑控制形成的。

通过上面的分析和讨论, 有以下几点初步认识:

(1) 东北地区的地震可分为日本海 - 长白山深震带、郯庐断裂带北段地震区、松辽盆地西缘地震区和松辽盆地内部地震带。郯庐断裂带北段对该区的地震活动有一定的控制作用, 总体地震活动水平较弱, 但空间差异性显著; 依兰 - 伊通断裂比敦化 - 密山断裂地震活动性强, 且具有分段活动性, 两端的沈阳 - 吉林段和依兰 - 萝北段比中间的吉林 - 依兰段活动性强, 而敦化 - 密山断裂只在沈阳 - 敦化段地震活动比较密集。

(2) 深震区主压应力轴走向平均为 288° , 倾角约 31° , 断层活动方式以逆断型为主, 与西太平洋板块现今低角度高速水平消减的方向一致, 代表其对东北大陆的一级挤压构造应力场。郯庐断裂带北段附近浅源地震 P 轴走向以 $NEE-SWW$ 向为主, 倾角平均 26° , T 轴走向以 $NNW-SSE$ 向为主, 倾角平均 23° , 断裂活动以走滑型和逆断型为主。郯庐断裂带内主压应力方向(NEE 向)与西太平洋板块俯冲产生的 NWW 向挤压应力方向存在差异, 这可能是郯庐断裂带在俯冲挤压的一级构造应力场作用下右行走滑派生的次级应力场的影响。

参 考 文 献

- 晁洪太, 王志才, 刘西林. 1999. 郯庐断裂带下辽河 - 莱州湾段与潍坊 - 嘉山段地震构造和地震活动特征对比 [J]. 华北地震科学, 17(2):36—42.
- CHAO Hong-tai, WANG Zhi-cai, LIU Xi-lin. 1999. Comparison of seismotectonics and seismicities between the Xialiaohu-Laizhouwan segment and the Weifang-Jiashan segment of the Tancheng-Lujiang Fault zone [J]. North China Earthquake Sciences, 17(2):36—42 (in Chinese).
- 陈洪洲, 任锦章, 徐亚勤. 1996. 依兰 - 伊通裂谷火山活动与地震活动 [J]. 东北地震研究, 12(1):8—18.
- CHEN Hong-zhou, REN Jin-zhang, XU Ya-qin. 1996. Volcanism and seismicity along Yilan-Yitong rift valley zone [J]. Seismological Research of Northeast China, 12(1):8—18 (in Chinese).
- 崔效锋, 谢富仁, 赵建涛. 2005. 中国及邻区震源机制解的分区特征 [J]. 地震地质, 27(2):298—307.
- CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren, ZHAO Jian-tao. 2005. The regional characteristics of focal mechanism solutions in China and its adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 27(2):298—307 (in Chinese).
- 高常波, 钟以章. 2000. 1999 年辽宁海城 - 岫岩 5.6 级地震的地质构造背景和发震构造 [J]. 地震地质, 22(4):405—412.
- GAO Chang-bo, ZHONG Yi-zhang. 2000. Geological background and seismogenic fault of the Haicheng-Xiuyan M 5.6 earthquake of November 29, 1999 [J]. Seismology and Geology, 22(4):405—412 (in Chinese).
- 高祥林, 罗焕炎, 平原和郎. 1996. 日本俯冲带应力产生与传播的数值模拟 [J]. 地震地质, 16(2):97—108.
- GAO Xiang-lin, LUO Huan-yan, KAZURO Hirahara. 1996. Numerical model of stress generation and transfer caused by the Japanese subduction zone [J]. Seismology and Geology, 16(2):97—108 (in Chinese).
- 谷光裕, 于龙伟, 王安东, 等. 2001. 辽宁岫岩 5.4 级地震临震预测 [J]. 地震, 21(1):78—84.
- GU Guang-yu, YU Long-wei, WANG An-dong, et al. 2001. The imminent prediction for Xiuyan earthquake with M 5.4 in Liaoning Province [J]. Earthquake, 21(1):78—84 (in Chinese).
- 康力, 刘志平, 盘晓东, 等. 2001. 吉林省中部地区现今构造活动及现代地壳应力场特征的探讨 [J]. 东北地震研究, 17(1):69—75.

- KANG Li, LIU Zhi-ping, PAN Xiao-dong, *et al.* 2001. Research on the characteristics of contemporary crustal stress field and recent tectonic activity in central area of Jilin Province [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 17(1):69—75 (in Chinese).
- 兰从欣, 刘杰, 马士振, 等. 2006. 岫岩 5.4 级地震序列主应力变化特征研究 [J]. *地震*, 26(2):73—82.
- LAN Cong-xin, LIU Jie, MA Shi-zhen, *et al.* 2006. Study on stress variation characteristics of Xiuyan 5.4 earthquake series [J]. *Earthquake*, 26(2):73—82 (in Chinese).
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 1994. 郯庐活断层的分段及其大震危险性分析 [J]. *地震地质*, 16(2):121—126.
- LI Jia-ling, CHAO Hong-tai, CUI Zhao-wen, *et al.* 1994. Segmentation of active fault along the Tancheng-Lujiang Fault zone and evaluation of strong earthquake risk [J]. *Seismology and Geology*, 16(2): 121—126 (in Chinese).
- 林玉祥, 卢良玉, 张萍. 2000. 辽宁及邻区应力场模拟中远场应力的确定 [J]. *东北地震研究*, 16(3):44—50.
- LIN Yu-xiang, LU Liang-yu, ZHANG Ping. 2000. Far-field stress determined in simulated stress field in Liaoning area and its adjacency [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 16(3):44—50 (in Chinese).
- 刘东旺, 夏瑞良, 刘泽民, 等. 2006. 郯庐断裂带安徽段现代地震活动及应力场特征 [J]. *地质科学*, 42(2): 278—290.
- LIU Dong-wang, XIA Rui-liang, LIU Ze-min, *et al.* 2006. Characteristics of recent seismicity and stress fields in Anhui sector of the Tanlu Fault zone [J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(2):278—290 (in Chinese).
- 吕政, 张京辉, 邵喜彬, 等. 2006. 2006 年 3 月 31 日吉林省前郭—乾安 M_s 4.8 地震序列 [J]. *国际地震动态*, 10: 27—32.
- LÜ Zheng, ZHANG Jing-hui, SHAO Xi-bin, *et al.* 2006. Qianguo-Qianan M_s 4.8 earthquake sequence on March 31, 2006 in Jilin Province [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 10: 27—32 (in Chinese).
- 马宏生, 刘杰, 张国民, 等. 2002. 用应变积累释放模型研究中国大陆地块分区地震活动 [J]. *地震学报*, 24(6):569—578.
- MA Hong-sheng, LIU Jie, ZHANG Guo-min, *et al.* 2002. The seismicity research in the subregions of Chinese mainland using strain accumulating and releasing model [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(6):569—578 (in Chinese).
- 孟宪森, 朱景春, 孙文斌, 等. 1996. 东北地区浅源中强震及深震与西太平洋板块俯冲 [J]. *东北地震研究*, 12(2):12—23.
- MENG Xian-sen, ZHU Jing-chun, SUN Wen-bin, *et al.* 1996. Shallow moderate and deep earthquake in northeast China and western Pacific plate subduction [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 12(2):12—23 (in Chinese).
- 牛雪, 卢造勋, 姜德录, 等. 2000. 郯庐断裂北带地区主要构造单元壳幔结构特征与地震活动性 [J]. *地震学报*, 22(2): 145—150.
- NIU Xue, LU Zao-xun, JIANG De-lu, *et al.* 2000. Crustal-mantle structure and seismicity of the main structural units in the northern Tanlu Fault zone region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 22(2):145—150 (in Chinese).
- 施炜, 张岳桥, 董树文. 2003. 郯庐断裂带中段第四纪活动及其分段特征 [J]. *地球学报*, 24(1): 11—18.
- SHI Wei, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen. 2003. Quaternary activity and segmentation behavior of the middle portion of the Tanlu Fault zone [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 11—18 (in Chinese).
- 孙文斌, 和跃时. 2004. 西太平洋 Benioff 带的形态及其应力状态 [J]. *地球物理学报*, 47(3):433—440.
- SUN Wen-bin, HE Yue-shi. 2004. Characteristics of the subduction zone in the western Pacific and its stress state [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(3):433—440 (in Chinese).
- 孙文福, 关英梅, 李芳, 等. 2004. 东北地区地震活动规律及发展趋势研究 [J]. *东北地震研究*, 20(1):9—18.
- SUN Wen-fu, GUAN Ying-mei, LI Fang, *et al.* 2004. Study on the seismicity law in northeast China and its devel-

- ping trend [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 20(1):9—18 (in Chinese).
- 王小亚, 朱文耀, 符养, 等. 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变 [J]. *地球物理学报*, 45(2):198—209.
- WANG Xiao-ya, ZHU Wen-yao, FU Yang, *et al.* 2002. Present-time crustal deformation in China and its surrounding regions by GPS [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2):198—209 (in Chinese).
- 张凤鸣, 许晓艳, 刘铁军, 等. 2005. 应用震源机制解分析依兰—伊通地堑北段现代构造应力场 [J]. *东北地震研究*, 21(4):15—22.
- ZHANG Feng-ming, XU Xiao-yan, LIU Tie-jun, *et al.* 2005. Analysis on the modern structure stress field of the northern section of Yilan-Yitong graben by using the focal mechanism solutions [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 21(4):15—22 (in Chinese).
- 张萍, 蒋秀琴. 2000. 辽宁地区震源机制解及应力场特征的研究 [J]. *东北地震研究*, 16(1):1—7.
- ZHANG Ping, JIANG Xiu-qin. 2000. Study of focal mechanism solutions and stress field characteristic in Liaoning region [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 16(1):1—7 (in Chinese).
- 张萍, 谷光峪, 高艳玲. 2001. 岫岩—海城 M_s 5.4 地震序列震源机制解 [J]. *地震*, 21(1):98—102.
- ZHANG Ping, GU Guang-yu, GAO Yan-ling. 2001. Focal mechanism of Xiuyan-Haicheng (M_s 5.4) earthquake sequence [J]. *Earthquake*, 21(1):98—102 (in Chinese).
- 张萍, 于龙伟, 李爱民, 等. 2003a. 岫岩—海城 M_s 5.4 地震余震震源机制研究 [J]. *东北地震研究*, 19(2):28—35.
- ZHANG Ping, YU Long-wei, LI Ai-min, *et al.* 2003a. Aftershock focal mechanism of Xiuyan-Haicheng M_s 5.4 earthquake [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 19(2):28—35 (in Chinese).
- 张萍, 于龙伟, 李涯, 等. 2003b. 岫岩—海城 5.4 级地震前小震震源机制解与记录特征分析 [J]. *地震地磁观测与研究*, 24(1):29—38.
- ZHANG Ping, YU Long-wei, LI Ya, *et al.* 2003b. An analysis of focal mechanism of small earthquakes and the record characteristics before the Xiuyan-Haicheng earthquake of 5.4 [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 24(1):29—38 (in Chinese).
- 张萍, 李爱民, 赵春平. 2004a. 沈阳及其附近地区小震复合震源机制解 [J]. *地震地磁观测与研究*, 25(5):35—39.
- ZHANG Ping, LI Ai-min, ZHAO Chun-ping. 2004a. The focal mechanism solutions of small earthquakes in Shenyang region and its surroundings [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 25(5):35—39 (in Chinese).
- 张萍, 于龙伟, 关英梅, 等. 2004b. 营口—海城震群与岫岩—海城地震序列地震活动特征的研究 [J]. *东北地震研究*, 20(2):17—33.
- ZHANG Ping, YU Long-wei, GUAN Ying-mei, *et al.* 2004b. Study on the seismicity character of Yingkou-Haicheng earthquake swarm and Xiuyan-Haicheng earthquake sequence [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 20(2):17—33 (in Chinese).
- 张庆龙, 王良书, 解国爱, 等. 2005. 郯庐断裂带北延及中生代构造体制转换问题的探讨 [J]. *高校地质学报*, 11(4):577—584.
- ZHANG Qing-long, WANG Liang-shu, XIE Guo-ai, *et al.* 2005. Discussion on northward extension of the Tanlu Fault zone and its tectonic regime transformation [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(4):577—584 (in Chinese).
- 章振铨, 李志田, 迟田峰. 1999. 敦化—密山断裂带(二道甸子—大山嘴子段)断裂活动性评价 [J]. *吉林地质*, 18(1):51—56.
- ZHANG Zhen-quan, LI Zhi-tian, CHI Tian-feng. 1999. An evaluation on the fracture activity of Dun-Mi Faulted zone

- (Erdaodianzi-Dashanzuizi section) [J]. *Jilin Geology*, 18(1):51—56 (in Chinese).
- 郑照福. 2006. 依兰-伊通断裂北段地震活动性研究 [J]. *地震地磁观测与研究*, 27(增刊):1—5.
- ZHENG Zhao-fu. 2006. The discussion of earthquake feature in north segment of Yilan-Yitong fracture zone [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 27(suppl):1—5 (in Chinese).
- ZHAO Dapeng, LEI Jianshe, TANG Rongyu. 2004. Origin of the Changbai intra-plate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1401—1408.

SEISMIC ACTIVITY AND STRESS STATE OF THE NORTHERN TANLU FAULT ZONE AND ITS ADJACENT AREAS

GE Rong-feng ZHANG Qing-long XIE Guo-ai XU Shi-yin
WANG Xi-yong CHEN Juan

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract

1254 $M_L \geq 2.0$ earthquakes from Jan. 1964 to Jan. 2008, 191 focal mechanism solutions and 198 in-situ stress measurement data in the northern Tanlu Fault zone and its adjacent areas are collected to analyze the seismic activity, structural stress state and fault movement of the northern Tanlu Fault zone through the calculation of epicenter distribution, focal depth, strain release rate and the statistics of focal mechanism solutions and other stress data. The results indicate that the study area can be partitioned into four seismic belts or regions, namely the Sea of Japan to Changbai Mountains deep seismic belt, the northern Tanlu Fault seismic belt, the western margin of Songliao basin seismic belt and the inner Songliao basin seismic belt. The seismic activity of the northern Tanlu Fault zone is weak and inhomogeneous. The Yilan-Yitong Fault is more active than the Dunhua-Mishan Fault, and shows segmentation behavior that is stronger at both sides than the middle part. The maximal stress axis (P -axis) in the deep seismic belt trends 288° on average, dipping 31° and the main fault movement mode is reverse. Near the northern Tanlu Fault zone the P -axis mainly trends NEE-SWW, dipping 26° on average, the T -axis mainly trends NNW-SSE, dipping 23° on average and the main fault movement mode is strike-slip with reverse. The maximal stress axis presents an obvious difference between the shallow and deep earthquake belts, resulting probably from the influence of the secondary stress field derived from the dextral strike-slip of the northern Tanlu Fault zone under the NWW compression due to the low-angle high-speed subduction of the western Pacific plate.

Key words northern Tanlu Fault zone, focal mechanism solution, stress state, western Pacific plate, northeast China

〔作者简介〕 葛荣峰,男,1986年出生,现为南京大学地球科学系构造地质学专业在读研究生,主要从事构造地质与地球动力学研究,电话:025-83593734, E-mail: gerongfeng1986@sina.com。