



论文

松辽盆地西缘边界断裂带中南段走滑性质、
时间及其位移量韩国卿^{①②}, 刘永江^{①*}, Franz NEUBAUER^②, Johann GENSER^②, 邹运鑫^{③④},
李伟^{①②}, 梁琛岳^①

① 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

② Department Geology and Geography, University of Salzburg, Salzburg A-5020, Austria;

③ 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

④ 内蒙古地质矿产勘查院, 呼和浩特 010010

* 联系人, E-mail: yongjiang@jlu.edu.cn

收稿日期: 2011-05-09; 接受日期: 2011-08-25

国家自然科学基金重点基金项目(批准号: 40739905)、中国石油化工股份有限公司科技开发项目(编号: G0800-06-ZS-327), 博士点基金项目(编号: 200801830041)、国家留学基金建设高水平大学公派研究生项目(编号: 2008617114)和中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室开放基金资助

摘要 松辽盆地的西缘边界断裂带, 又称嫩江-八里罕断裂带, 位于东北地区中部, 大兴安岭的东缘, 传统认识上认为其为一条 NNE 向的大型正断层或拆离断层。通过对断裂带中南段楼子店、岭下地区韧性变形岩石构造要素系统测量和统计, 显微构造观察, 有限应变测量, 石英组构 EBSD(电子背散射衍射)分析和变形带白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学等方面的对比研究, 证实断裂带南段楼子店地区与中段岭下地区变形岩石具有相同的变形组构特征, 应为同一断裂带同期变形的产物, 初步确定了松辽盆地西缘边界断裂带中南段在早白垩世早期(~130 Ma)曾经历左行走滑变形阶段; 通过对断裂带两侧西拉木伦河缝合带和倭勒根岩群展布的研究, 确定嫩江-八里罕断裂带的现今累计走滑位移量在 40~50 km 之间。

关键词松辽盆地西缘边界断裂带
楼子店地区
岭下地区
左行走滑
位移量
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年

松辽盆地西缘边界断裂带, 又称嫩江-八里罕断裂带^[1], 为松辽盆地与大兴安岭隆起的分界, 东北地区重要的 NE-NNE 向断裂之一; 其大地构造位置位于中亚造山带的东段, 黑龙江中、小地块群^[2](图 1(a)), 满洲地块^[5]或佳蒙地块^[6]的中部。东北地区构造位置特殊, 夹持于西伯利亚, 华北和西太平洋三大板块之间, 且北侧的蒙古-鄂霍茨克缝合带的闭合

同西太平洋板块向欧亚大陆的俯冲在时间上存在叠加, 均为晚侏罗-早白垩世, 致使东北地区盆岭构造格局的形成机制倍受争议, 而松辽盆地西缘断裂带性质的厘定无疑对松辽盆地的成因, 大兴安岭的隆升机制, 以及东北地区中、新生代以来的构造格局有重要的意义。

嫩江-八里罕断裂带的命名始见于内蒙古自治区

英文引用格式: Han G Q, Liu Y J, Neubauer F, et al. Characteristics, timing, and offsets of the middle-southern segment of the western boundary strike-slip fault of the Songliao Basin in Northeast China. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 464-475, doi: 10.1007/s11430-012-4362-y

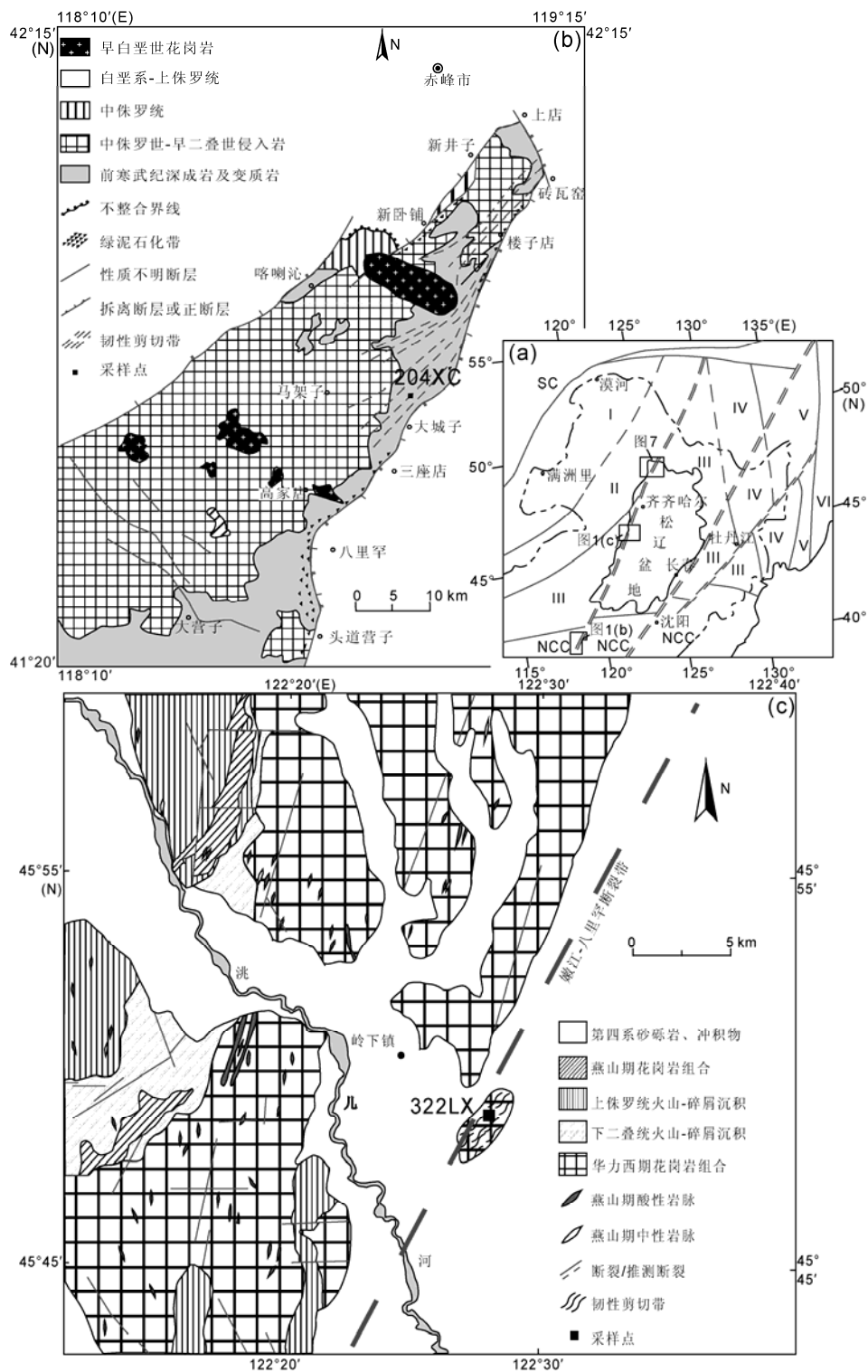


图 1 研究区构造背景及地质简图

(a) 东北地区构造背景图: SC-西伯利亚克拉通; NCC-华北克拉通; I-额尔古纳地块; II-兴安地块; III-松嫩地块; IV-布列亚-佳木斯地块; V-侏罗纪增生杂岩; VI-白垩纪大陆边缘浊积岩及火山岩(据参考文献[3]修改). (b) 楼子店地区地质构造简图(据参考文献[4]修改). (c) 岭下地区地质构造简图

区域地质志, 其沿黑龙江, 吉林省与内蒙古自治区的边界呈 NNE 向展布, 向南延伸入河北省, 与平场-桑园大断裂相接, 长度 1200 km 以上^[1](图 1(a)). 断裂带北段称嫩江断裂, 目前对其研究主要集中在区域地球物理方面, 通过布格重力异常, 航磁异常, 深反射剖面研究确定了断裂带的大致展布位置, 并认为其性质为伸展拆离断层或大型低角度正断层^[7~11]. 南段称红山-八里罕断裂, 对其研究始于上世纪 80 年代^[4,12~20], 多数学者把红山-八里罕断裂看作是喀喇沁隆起的东缘边界拆离断层^[13,14,16](图 1(b)). 该断裂带北部——老哈河断裂控制着元宝山盆地晚侏罗-早白垩统(孙家湾组)地层的沉积^[12], 但后期广大学者发现红山-八里罕断裂并非单纯的拆离断层, 其可能在伸展拆离过程中具有左行走滑分量^[4,17~20]或是后期遭受过左行走滑剪切作用改造^[15], 并在开鲁西部左行截断了 EW 向的西拉木伦河缝合带^[1,21]. 由于松辽盆地边界断裂带中段地区多被第四纪覆盖, 客观上造成了对其性质研究的空白, 故断裂带南段红山-八里罕断裂和北段嫩江断裂是否为同一断裂带, 断裂带整体经历怎样的演化阶段等问题一直没有定论. 笔者^[21,22]通过野外考察在断裂带中南部吉林省岭下地区发现具有左旋走滑性质的韧性剪切带(图 1(c)), 并对断裂带南部——红山-八里罕断裂带楼子店地区进行了详细的野外考察, 结合最新获得的岭下地区变形岩石中的新生白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄数据, 综合对比上述两个地区韧性变形岩石的运动学及年代学特

征, 讨论松辽盆地西缘边界断裂带南段楼子店剪切带和中段岭下剪切带的性质及归属.

1 野外地质特征

笔者在断裂带南段楼子店乡小城子地区发现一出露宽度数百米的韧性剪切带(图 1(b)), 剪切片理产状为 $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 72^{\circ}$; 线理产状成两组, 一组为 $27^{\circ}\angle 8^{\circ}$, 一组为 $207^{\circ}\sim 223^{\circ}\angle 4^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 与前人统计结果一致^[4](图 2(a)). 垂直剪切片理面方向眼球状构造发育, 钾长石 σ 型旋转残斑指示其具有左行剪切特征(图 3(a)). 在断裂带中段白城市岭下地区洮儿河东侧第四纪冲沟中发现断续出露的一套华力西期二长花岗岩和斜长花岗岩岩体, 宽度数百米, 其韧性剪切变形显著发育. 该韧性变形花岗岩带整体呈强弱带相间分布, 为典型的韧性剪切带辫状构造; 单个变形带也具有强弱带之分, 可见长英质矿物和暗色矿物相间排列构成层状片理面, 长英质矿物拉长明显. 剪切面理由于风化作用影响较易识别, 往往沿暗色矿物片理面形成裂开构造(图 3(b)). 片理产状总体为 $110^{\circ}\sim 144^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 75^{\circ}$; 线理倾向有两组, 一组为 $197^{\circ}\sim 220^{\circ}$, 另一组为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ (图 2(b)); 长石旋转残斑, S-C 组构均显示其具有左行剪切运动特征. 在洮儿河以西地区沿河展布的同时代花岗岩体未发生变形作用, 表明嫩江-八里罕断裂带主要沿 NE 向的松辽盆地西缘展布, 现今可能多被第四系覆盖.

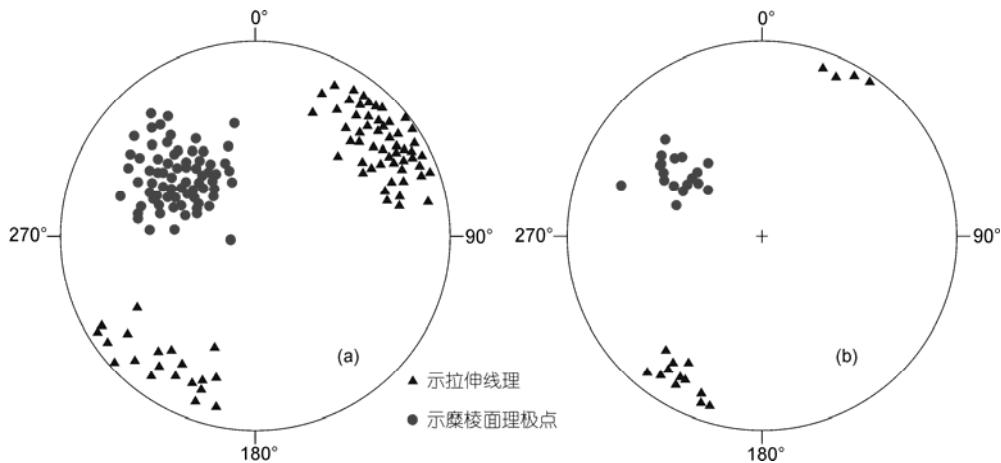


图 2 构造要素赤平投影图
(a) 楼子店地区, 数据来自参考文献[4]; (b) 岭下地区

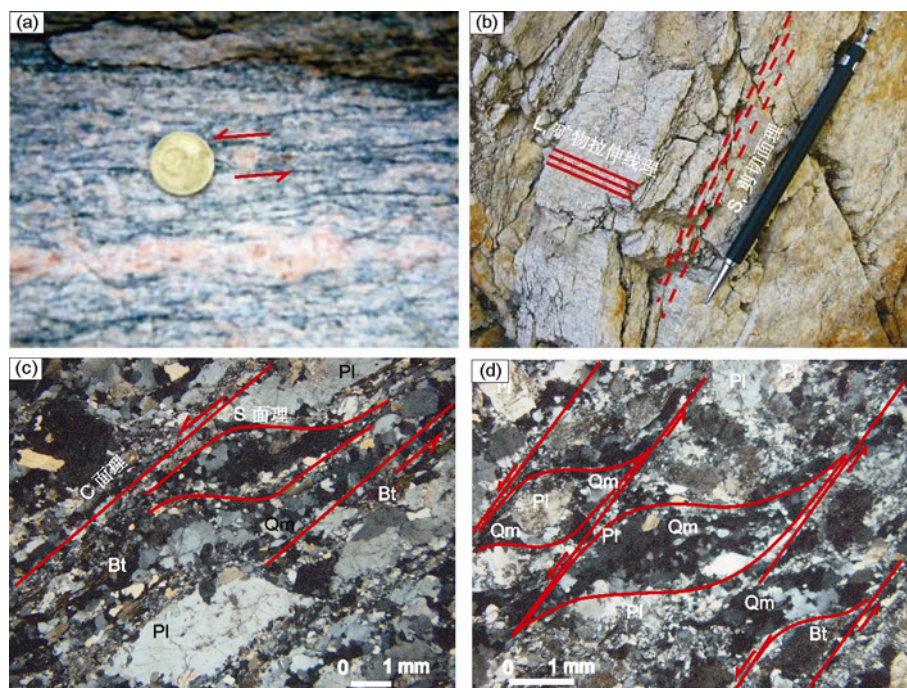


图3 松辽盆地西缘边界断裂带中南段糜棱岩野外和镜下照片

(a) 楼子店地区糜棱岩野外照片, 钾长石 σ 型旋转残斑, 指示左行剪切; (b) 岭下地区糜棱岩野外照片, 发育明显的糜棱面理和拉伸线理, 且沿面理后期裂开构造发育; (c), (d) 楼子店和岭下地区糜棱岩镜下 S-C 组构及长石旋转残斑, 指示左行剪切作用. Qm 为石英, Pl 为斜长石, Bt 为黑云母

2 岩石组构特征

2.1 显微镜下特征

对楼子店地区和岭下地区变形岩石进行岩石组构研究, 由于其原岩均为花岗质岩石, 变形后岩石组合主要由粗粒残斑(0.5~3 mm)和细粒基质组成, 残斑以长石为主, 主要为斜长石, 并有不同程度的绢云母化, 少量石英, 黑云母; 基质以长石, 石英为主, 少量白云母, 另外还有少量的硬绿泥石, 绿帘石等蚀变矿物. 楼子店地区和岭下地区残斑和基质所占比例分别为 55%~60%, 35%~40%和 60%~65%, 30%~35%, 按照钟增球和郭宝罗^[23]的命名方案, 定为初糜棱岩-糜棱岩. 石英普遍发育波状消光, 带状消光现象, 长石部分发育弱波状消光; 长石出溶构造明显, 具体表现为应力条纹, 出溶页理, 蠕英构造等; 石英动态重结晶现象表现为膨凸(BLG)和亚晶粒旋转(SR), 偶见颗粒边界迁移(GBM), 长石动态重结晶现象不显著, 主要为膨凸(BLG)现象. 长石和石英的结晶学特征指示, 楼子店与岭下地区出露的初糜棱岩-糜棱岩的变质条件为绿片岩相^[24], 估计变形温度在 400℃左右^[25,26];

长石旋转残斑, S-C 组构均指示其具有左行剪切特征(图 3(c), (d)).

2.2 有限应变类型判别

2.2.1 长石残斑 Fry 法有限应变测量

对于不同的测试对象, 选择的有限应变测试方法有所不同, 其中 Fry 法的间接性和优越性支持其用于广泛的岩石类型^[27~31]. Fry 法要求变形前的颗粒中心为非泊松型的随机分布, 有限应变的测量结果反映“全岩应变”^[27]. 通常作为糜棱岩原岩的花岗岩定向构造不发育, 其中的结晶长石近于随机非泊松分布, 因此可用 Fry 法测量^[4,31,32].

本文依据 Fry 法的测量原理, 进行了适当的改进. 首先对楼子店南小城子地区和岭下地区韧性变形岩石切制定向薄片(X-Z 和 Y-Z 面), 在显微镜下对颗粒分布较为均匀的区域采集显微照片; 在 Corel DRAW 软件上对显微照片中长石残斑中心进行标定, 选取图片中心为原点, 将原点移至某一残斑中心, 按照上述传统方法标定其余长石残斑的中心, 往复标定至覆盖全部残斑中心. 由于韧性变形岩石的粒度较大,

表 1 楼子店乡小城子地区和岭下地区韧性剪切带有限应变测量数据表

位置	样品号	X/Z	Y/Z	X/Y	Ln (X/Y)	Ln (Y/Z)	K
岭下	322LX-1	2.37	1.42	1.67	0.51	0.35	1.46
岭下	J123G	2.59	1.62	1.60	0.47	0.48	0.98
岭下	J123A	2.46	1.54	1.59	0.46	0.43	1.07
岭下	CJ123	2.51	1.53	1.64	0.49	0.43	1.16
小城子	204XC-1Y	2.91	1.48	1.96	0.67	0.39	1.72

加之显微镜放大倍数所限, 测量数量在 30 个左右, 但结果较为理想.

长石残斑中心平移后的图像中心空白区域代表了应变椭圆, 对其长短轴进行测量, 测量结果见表 1.

2.2.2 Flinn 图解有限应变类型判别

对楼子店地区和岭下地区有限应变测量结果用 Flinn 图解进行判别, 从图 4 可以看出, 两地区应变类型一致, 均属于拉长型剪切, K 值略高于 1, 岩石类型表现为 L, L-S 构造岩, 且初糜棱岩应变类型特征倾向于 L 构造岩, 糜棱岩应变类型倾向于 L-S 构造岩的特征.

2.3 EBSD 组构分析

EBSD 组构分析所选样品为花岗质初糜棱岩-糜棱岩, 样品位置见图 1(b)和(c). 首先根据岩石的宏观矿物线理和面理严格定向, 即 X 轴平行于矿物的拉伸线理方向, Z 轴平行于岩石面理的法线方向, Y 轴在面理面内垂直线理方向. 沿垂直面理和平行线理的方向切制光学薄片, 厚度约为 30 μm . EBSD 分析在

中国地质大学(北京)地质过程重点实验室进行, 具体实验流程及相关参数见参考文献[33].

楼子店和岭下地区变形岩石原岩为花岗质岩石, 其粒度较粗, 变形程度为初糜棱岩-糜棱岩, 其中大颗粒残斑长轴粒径可达 2~3 mm, 客观上影响了 EBSD 分析的效果, 故在分析过程中结合扫描电镜下 (SEM) 图像对薄片基质和残斑进行区别对待, 岭下地区构造岩残斑和基质的 EBSD 分析结果差异的详细描述见参考文献[21]. 楼子店地区和岭下地区多个扫描区域的综合 EBSD 分析结果见图 5, 可见两地区岩石组构特征基本一致, 细小石英基质颗粒的<C>轴极密区主要位于 Y 轴和 Z 轴之间并靠近 Z 轴的区域, 组构特征为低温底面组构为主, 少部分具有中低温菱面组构特征, 滑移系以 {0001} 为主, 变形温度为 400℃ 左右(图 5)^[34~37], 其与石英, 长石显微构造特征所指示的变形温度基本一致.

3 走滑时间

上文对松辽盆地西缘边界断裂带南段楼子店地区和中段岭下地区进行了野外构造要素和镜下变形特征研究, 证实两地区具有相同的变形特征——左旋走滑剪切, 为了进一步确定楼子店和岭下地区韧性剪切带是否为同一断裂带同一时期的产物, 对岭下地区糜棱岩内新生白云母颗粒分别进行了激光加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和电子轰击炉阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年, 并同楼子店地区已报道的剪切带年龄数据进行对比, 样品位置见图 1(c).

3.1 测试方法

测试样品 322LX-1(采样点 GPS 读数: 45°48'54.5"N, 122°27'45.5"E)选自白城市岭下地区花岗质糜棱岩, 镜下观察显示, 细小白云母颗粒呈鳞片状, 沿长石和石英等矿物缝隙定向排列(图 3(d)), 与早期成岩过程中形成的黑云母颗粒大小有着显著的不同, 表明其

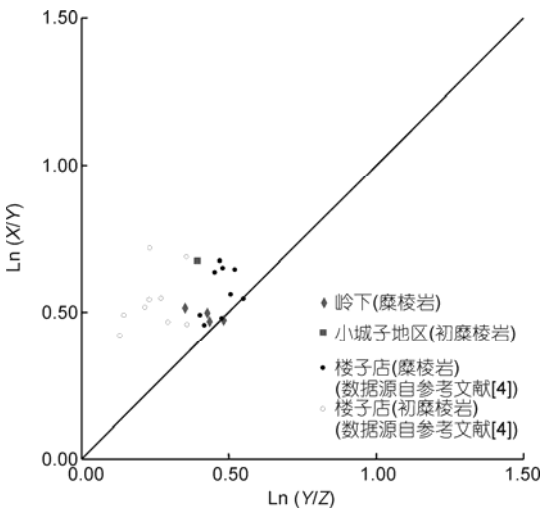


图 4 楼子店和岭下变形岩石 Flinn 图解

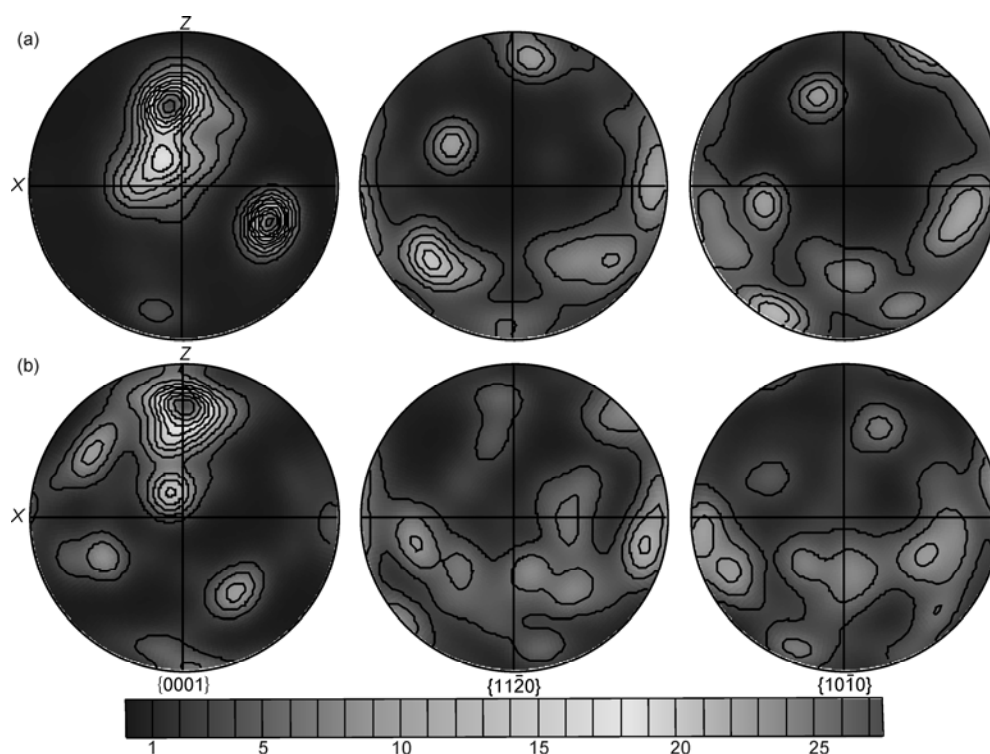


图5 EBSD测量的石英结晶学优选方位极点密度图等面积下半球投影

(a) 楼子店地区; (b) 岭下地区

为后期变质变形期间形成的新生白云母。人工将岩石样品用铁质研钵粉碎至40目以下,经不同粒径筛子对岩石粉末分离,对适合粒级岩石粉末用水反复浮选,初选的白云母矿物最后在双目镜下人工提纯。

激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测试工作在奥地利萨尔茨堡大学地质地理系激光ARGONAUT同位素测年实验室完成,样品(322LX-1a)的照射工作在匈牙利布达佩斯MTA KFKI反应堆进行,照射时间为16 h,校正参数及计算过程见Wijbrans等^[38],本文选用的修正值来源于Hinsbergen等^[39],实验仪器及流程详见Liu等^[40,41];电子轰击炉阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年工作在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成,样品(322LX-1b)的照射工作在中国原子能研究院的原子反应堆完成,累积照射剂量约为 $(1\sim2)\times 10^{17}\text{ n/cm}^2$,详细实验流程见Lo和Lee^[42]。

3.2 分析结果

样品每个温度阶段的原始数据经过K、Ca同位素校正和大气氩校正,再通过年龄公式计算出每个温度阶段的阶段年龄。根据样品各阶段的 ^{39}Ar 析出

量(表2,3)和阶段年龄做该样品的年龄谱(图6)。激光阶段加热方法,样品(322LX-1a)在12个加热阶段中有9个加热阶段,析出 ^{39}Ar 累计为91%,并给出一个稳定的年龄坪为 $(128.35\pm0.59)\text{ Ma}$;电子轰击炉阶段加热方法,样品(322LX-1b)在10个加热阶段中有6个加热阶段年龄十分接近,对连续的5个加热阶段的年龄值进行加权平均,获得平均年龄为 $(136.7\pm6.6)\text{ Ma}$,析出 ^{39}Ar 累计为89%。电子轰击炉阶段加热法获得年龄较激光阶段加热法获得的年龄误差略大,可能与电子轰击炉方法需要样品量大,为满足测试需要难免混入一些原生云母碎片有关,导致测试结果略高。

3.3 年代学讨论

有关松辽盆地西缘边界断裂带形成时间的报道主要集中在断裂带的南部——红山-八里罕断裂,其中走滑阶段年龄主要集中在早白垩世,详见表4^[14,17~20]。笔者在松辽盆地西缘边界断裂带中段岭下地区获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 (128.35 ± 0.59) 和 $(136.7\pm6.6)\text{ Ma}$ 在误差范围内与楼子店地区同种方法获得断裂带走滑年龄 $(126\sim134\text{ Ma})$ 一致^[17,19],结合上文对楼子店

表 2 岭下地区剪切带糜棱岩白云母激光加热法 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析数据^{a)}

阶段	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ⁴⁰ Ar) _m	F	³⁹ Ar (10 ⁻⁵ , mol)	³⁹ Ar (cum.) (%)	年龄(Ma)	±1σ (Ma)
样品号: 322LX-1a, 20 个颗粒, J-value = 0.007274									
1	0.0372	-1.2245	20.4374	0.0018	9.3276	0.57	0.57	118.4	8.4
2	0.0049	-0.0261	11.5977	0.0004	10.1340	5.47	6.04	128.3	1.4
3	0.0027	-0.1079	10.9062	0.0002	10.0933	24.13	30.17	127.8	0.9
4	0.0001	0.0679	10.2328	0.0000	10.1976	4.54	34.70	129.1	1.4
5	0.0015	-0.0780	10.6101	0.0001	10.1313	27.83	62.53	128.3	0.9
6	0.0004	0.0080	10.2533	0.0000	10.1275	15.95	78.48	128.2	1.0
7	0.0003	0.1016	10.2672	0.0000	10.1735	7.82	86.30	128.8	1.0
8	0.0011	0.0588	10.4646	0.0001	10.1248	9.35	95.65	128.2	1.0
9	0.0011	0.0711	10.4422	0.0001	10.1211	1.30	96.95	128.2	2.7
10	0.0009	0.1116	10.4394	0.0001	10.1536	2.01	98.96	128.6	1.7
11	0.0018	-0.2498	11.4441	0.0002	10.8850	0.53	99.49	137.5	5.9
12	0.0076	-0.0177	13.1308	0.0006	10.8583	0.51	100.0	137.2	4.4

a) 表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; $F = {}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}_k$, 为放射性成因的 ⁴⁰Ar 和 ³⁹Ar_k 的比率; ³⁹Ar 为经过空白本底水平校正过的氩气的释放量

表 3 岭下地区剪切带糜棱岩白云母电子轰击炉加热法 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析数据

阶段	<i>T</i> (°C)	时间(min)	⁴⁰ Ar (mv)	³⁹ Ar (mv)	³⁸ Ar (mv)	³⁷ Ar (mv)	³⁶ Ar (mv)	³⁹ Ar (cum.)(%)	年龄(Ma)	±1 <i>σ</i> (Ma)
样品号: 322LX-1b, 样品量: 8.80mg, <i>J</i> -value = 0.001008, 照射时间(h): 4.717, 出堆后时间(a): 272–274										
1	500	10	281.454	0.814	0.264	0.022	0.728	1.2	146.8	22.7
2	600	10	296.132	2.302	0.108	–	0.408	4.61	134.7	5.4
3	700	10	524.128	1.996	0.302	–	1.18	7.56	155	8.5
4	800	10	769.564	8.412	0.212	0.008	0.434	20.1	134.1	2.5
5	850	10	943.528	11.752	0.232	0.014	0.29	37.5	128.5	2.1
6	900	10	914.848	11.02	0.162	–	0.264	53.9	133.5	2.2
7	950	10	618.32	7.412	0.132	–	0.178	64.9	134.2	2.4
8	1050	10	849.696	7.412	0.178	–	0.228	79.6	139.3	2.3
9	1150	10	692.332	7.412	0.21	0.018	0.318	90.6	141.8	2.6
10	1250	10	671.862	7.412	0.162	–	0.358	99.2	170.3	3.2
11	1320	10	230.736	7.412	0.058	0.008	0.196	100	511.4	27.8

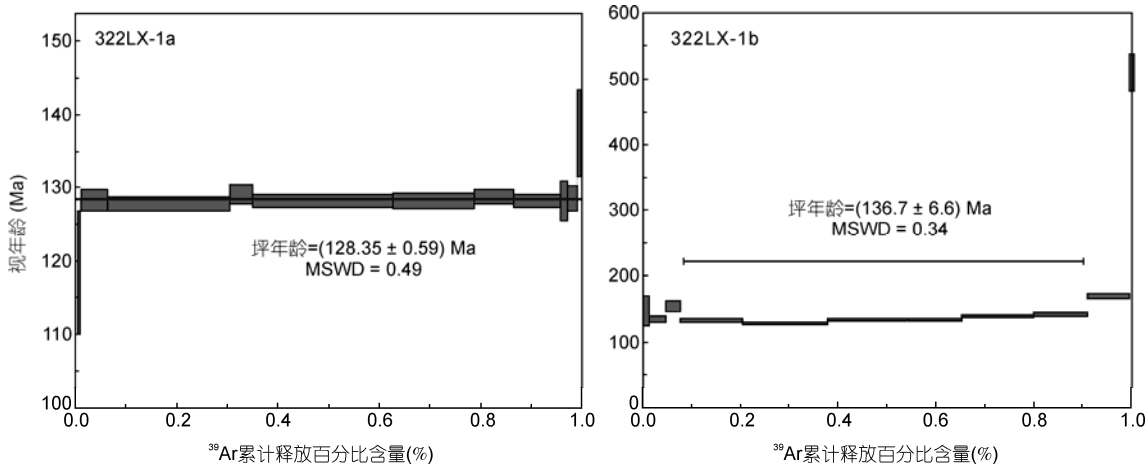


图 6 岭下地区剪切带糜棱岩白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄图谱
322LX-1a, 激光加热法; 322LX-1b, 电子轰击炉加热法

表 4 红山-八里罕断裂同位素测年数据

采样位置	断裂性质	构造岩	测试方法	年龄(Ma)	资料来源
楼子店-大城子	东侧的基底剥离断层	断层泥	K-Ar	65.3 和 71.1	[14]
姜子店-大城子	左行走滑韧性剪切	糜棱岩	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	133	[17]
小城子-八里罕	左行走滑韧性剪切	糜棱岩	Rb/Sr	127~117	[18]
楼子店	走滑韧性剪切	糜棱岩	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	126~134	[19]
楼子店	拆离断层系	绿泥石化带	K-Ar	始于~121, 114~112 转向	[20]

地区和岭下地区剪切带野外构造要素和构造变形特征的对比结果,证实松辽盆地西缘边界断裂带南段(楼子店)和中段(岭下)共同经历的 NE-NNE 向早白垩世早期(~130 Ma)的走滑剪切事件。

4 走滑位移量

4.1 松辽盆地南部的走滑位移量

松辽盆地西缘边界断裂带控制着松辽盆地中、新生代的沉积,在其东侧盆地沉积覆盖区寻找可对比的标志体确定其走滑位移量困难很大。西拉木伦河缝合带为华北克拉通与西伯利亚克拉通东南缘碰撞过程中形成的重要缝合带之一^[43~46],其闭合时间在晚二叠世-早三叠世^[47~51],而松辽盆地西缘边界断裂带中南段走滑时间为早白垩世中期(~130 Ma),其将势必对西拉木伦河缝合带进行左行错断。笔者前期工作对松辽盆地南部基底锆石年龄数据进行总结,发现松辽盆地南部地区白城-通榆一线以南地区存在类似华北板块性质基底,故根据基底性质差异松辽盆地南部地区应分为南北两部分。结合松辽盆地中央断裂左行走滑性质的认识,以及松辽盆地及其周缘的地球重力异常,MT 剖面结构,地壳和岩石圈厚度等值线等地球物理特征差异,确定了西拉木伦河缝合带在松辽盆地南部的展布,即开鲁-通辽-科尔沁左翼中旗-长春一线,呈左行错移样式^[22]。对松辽盆地西缘边界断裂带两侧西拉木伦河缝合带在断裂走向方向上位移的测量,确定其位移量约为 40 km。

4.2 松辽盆地北部的走滑位移量

在松辽盆地西缘边界断裂带两侧扎兰屯地区和尼尔基地区出露一套韧性,韧-脆性变形强烈的构造岩,前人定名为倭勒根岩群¹⁾。野外地质考察证实两

地区倭勒根岩群变形特征一致,至少遭受三期变形。地球化学及碎屑锆石年代学分析显示,倭勒根岩群原岩为一套早古生代的沉积岩,沉积-火山岩组合^[52,53]。岩群总体展布方向近 EW,并 EW 走向的片理尤其发育,松辽盆地西缘边界断裂带西侧的扎兰屯地区的倭勒根岩群在靠近断裂带一侧片理走向发生 NE 向偏转¹⁾,反映了松辽盆地西缘边界断裂带走滑作用对其的改造。在阿荣旗幅(1:25 万)数字地质图上,沿断裂走向方向对两地倭勒根岩群的中心线距离进行测量(图 7),确定其走滑位移量可达 50 km。

综上所述,松辽盆地西缘边界断裂带累计走滑位移量应该在 40~50 km 之间,与鸭绿江断裂,佳-伊断裂走滑位移量相当^[54],但比敦-密断裂走滑位移量小很多^[54~58],可能反映了敦-密断裂为中国东部走滑断裂系郯庐断裂的主支,松辽盆地西缘边界断裂带中南段走滑作用也受同一构造应力场影响,即早白垩世西太平洋板块向欧亚大陆的斜向俯冲,致使 NE 向走滑断裂在中国东部广泛发育,且走滑位移量具有由东向西逐渐减少的趋势。

5 讨论

中国东部中生代以来发育大量 NE-NNE 向走滑断裂,其中最为著名的是郯庐断裂带。近年来对郯庐断裂带的性质及演化阶段等方面的研究已取得了重要的进展^[59~66],报道了大量走滑相关的年龄数据,时间跨度从中三叠世-晚白垩世早期(240~90 Ma),但其中部分数据指示走滑剪切带后期的抬升冷却事件,并非走滑剪切变形时代。结合测年矿物封闭温度理论和走滑相关构造岩变形温压的判别,对现有年龄数据进行初步分析,可确定郯庐断裂带至少存在三期左旋走滑事件和一期右行走滑事件:1) 中三叠世

1) 黑龙江省地质调查研究总院. 地质调查项目成果报告——阿荣旗幅(1:25 万). 2005

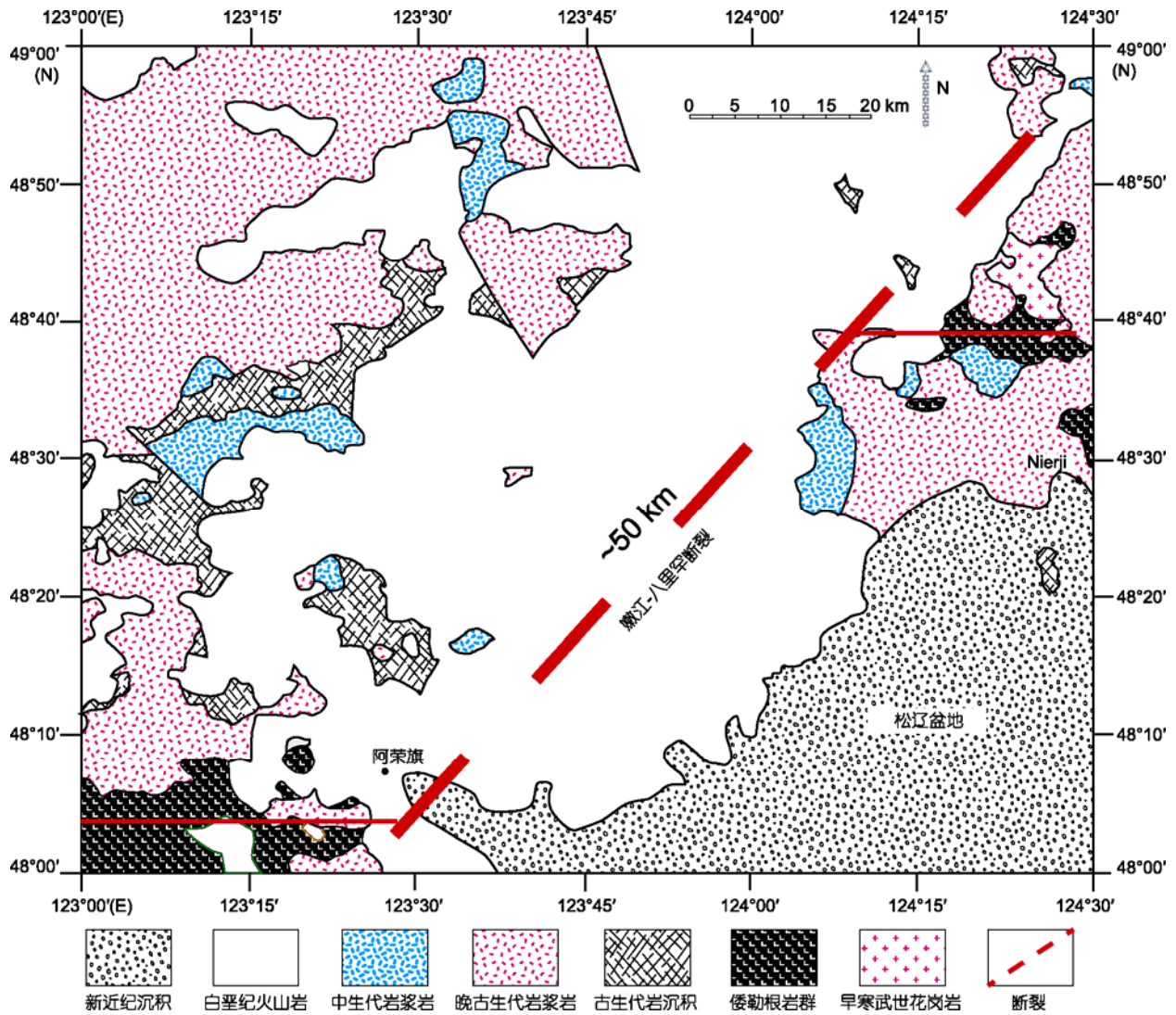


图 7 阿荣旗地区侏罗纪岩群分布图(据脚注 1)修改)

236~238 Ma, 华北与华南板块碰撞的深俯冲阶段, 可能起源于陆内转换断层, 并延续到三叠纪末期^[60,62,63]; 2) 中、晚侏罗世 155~165 Ma, 左行挤压走滑期^[64]; 3) 早白垩世早期 137~143 Ma, 左行走滑剪切期^[61,65,66]; 4) 晚白垩世-古新世, 右旋走滑期^[60,63]。

目前, 对于东北地区作为郯庐断裂北延的佳-伊断裂和敦-密断裂的走滑时间的研究, 由于野外出露的局限, 报道的年龄数据很有限: 窦立荣等^[67]对佳-伊断裂带内云母石英片岩的黑云母和辉绿岩辉石进行单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分析获得坪年龄为 (100 ± 2.3) 和 105 Ma, 其年龄值可能反应了断裂带后期伸展事件; 殷长建等^[68]在佳-伊断裂带内乐山镇达子沟获得压碎中

细粒黑云母二长花岗岩中黑云母单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 (133.13 ± 0.31) Ma, 靠山镇北口获得中细粒碎裂白云母/二云母花岗岩白云母单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 (135.66 ± 0.11) Ma, 其年龄值与郯庐断裂第三期左行走滑时间相当, 但碎裂花岗岩云母年龄可能反映花岗岩岩体形成后的隆升事件, 是否与断裂带走滑相关值得需要进一步确定; 孙晓猛等^[69]在敦-密断裂带北段密山县知-镇左行走滑型糜棱岩剪切带获得黑云母单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (161 ± 3) Ma, 并认为其代表了郯庐断裂第二期左行走滑事件在东北地区的响应。笔者在松辽盆地西缘边界断裂带中北段尼尔基地区的具有左行剪切性质的 L 构造岩中也获得了 ~160 Ma

的激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 白云母坪年龄^[70], 在误差范围内与郯庐断裂第二期走滑挤压时间, 以及敦-密断裂的走滑事件一致。此外, 在佳木斯地块西缘, 牡丹江, 依兰, 萝北等地相继报道了大量与板块俯冲相关的蓝片岩多硅白云母单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄数据, 集中在 160~180 Ma 之间^[71~73], 指示西太平洋板块的俯冲在晚侏罗世已经开始作用于欧亚大陆, 并导致一系列相关构造事件的出现。本文报道的松辽盆地西缘边界断裂在~130Ma 的走滑阶段在时间上与郯庐断裂带第三期走滑事件相当, 可能是 135~127 Ma 西太平洋伊泽纳崎板块以 30 cm/a 的速度向欧亚大陆俯冲运动由 NWW 向 NNW 转向^[74,75], 致使郯庐断裂带为代表的 NE 向走滑体系向北延伸, 向西扩展事件的响应。

通过上文的阐述, 可以发现中国东部主要发生四期走滑事件(即三期左行走滑期, 包括中三叠世(236~238 Ma)陆内转换断层期^[60,62,63], 中、晚侏罗世(155~165 Ma)挤压走滑期^[64]和早白垩世早期(137~143 Ma)走滑剪切期^[61,65,66]), 以及晚白垩世-古新世右行走滑期等^[60,63]。这些事件在郯庐断裂带内均有显示, 而其北延断裂(敦-密和佳-伊断裂)只对后三期事件有不同程度的响应^[76], 其中至少两期走滑事件(~160, ~130 Ma)已在松辽盆地西缘边界断裂有所指示。故本文所计算的走滑位移量应为现今的累计位移量, 即两期左行走滑位移量的叠加和可能的晚期右行走滑位移量的消减。至于各个时期走滑作用对位移量大小的贡献, 以及各期走滑事件的影响范围有待深入研究。松辽盆地被困限在西缘边界断裂(嫩江-八里罕断裂带)和东缘边界断裂(哈尔滨-德惠断裂带或佳木斯-伊通断裂)两条走滑断裂带之间,

盆地内部也发育着不同程度的走滑断裂(如孙吴-双辽断裂带), 指示松辽盆地的形成可能并非传统认识的单一陆内裂谷盆地或弧后裂谷盆地成因模式^[77,78], 而是形成于西太平洋板块俯冲背景下, 板块俯冲角度和速度的变化导致松辽盆地地区除了俯冲弧后拉张作用外, 走滑剪切作用对盆地的空间展布及其形成与演化也起到了重要的作用。

6 结论

通过对松辽盆地西缘边界断裂带中南段楼子店地区和中段岭下地区韧性剪切带的野外及室内的综合研究, 可以发现两地区剪切带具有如下共性:

(1) 剪切带均呈 NE-NNE 向展布, 具有左行剪切特征, 带内构造岩变形为初糜棱岩-糜棱岩; Fry 法有限应变测量结果表明, 韧性剪切带的应变类型属于拉长型简单剪切; EBSD 组构分析指示, 石英组构特征以低温底面组构为主, 少部分具有中低温菱面组构特征, 形成温度应为 400℃左右, 滑移系以{0001}为主, 反映剪切带所代表的后期走滑动力变质事件变形层次较低, 为中低温韧-脆性变形, 近底面或菱面滑移特征;

(2) 在岭下地区不同加热方法获得白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(~130 Ma)与断裂带南段红山-八里罕断裂带报道的走滑年龄一致, 证实松辽盆地西缘边界断裂带南段红山-八里罕断裂带早期走滑阶段至少可以向北延伸至中段岭下地区, 该断裂带对松辽盆地的空间展布及其形成和演化具有重要的影响和控制作用;

(3) 松辽盆地西缘边界断裂带的现今累计走滑位移量为 40~50 km。

致谢 感谢中国地质大学(北京)刘俊来教授在 EBSD 分析方面给予的帮助, 中国地震局地质研究所李大明和古元珠研究员在 Ar-Ar 年代学测试方面给予的帮助; 此外, 对两位匿名评审人对本文给予诸多有益的建议和帮助表示真挚的感谢。

参考文献

- 1 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 2 谢鸣谦. 拼贴板块构造及其驱动机理——中国东北及邻区的大地构造演化. 北京: 科学出版社, 2000
- 3 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 等. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征. 中国地质, 2006, 33: 816~823
- 4 王新社, 郑亚东, 王涛. 内蒙赤峰南部楼子店韧性剪切带应变与剪切作用类型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 160~166
- 5 Sengör A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A, Harrison M, eds. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 486~641

- 6 王成文, 金巍, 张兴洲, 等. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识. 地层学杂志, 2008, 32: 119–136
- 7 傅维洲, 贺日政. 松辽盆地及周边地带地震构造特征. 世界地质, 1999, 18: 95–100
- 8 秦志宏. 嫩江断裂两侧九峰山组特征对比及找煤方向. 煤炭技术, 1999, 18: 31–33
- 9 张振法, 葛昌宝. 内蒙古东部区深部构造特征和大地构造问题浅议. 内蒙古地质, 2000, (3): 6–18+37
- 10 赵文智, 李建忠. 基底断裂对松辽南部油气聚集的控制作用. 石油学报, 2004, 25: 1–6
- 11 陈洪洲, 余中元, 许晓艳, 等. 嫩江断裂构造及其与地震活动的关系. 东北地震研究, 2004, 20: 43–49
- 12 杨承先, 王贵华, 陈健. 内蒙红山-八里罕断裂断裂地质特征及其地震活动性. 地震研究, 1984, 7: 391–398
- 13 王玉芳, 崔文元, 孙承志. 内蒙赤峰南部娄子店-大城子拆离断层及其构造演变. 见: 钱祥麟, 编. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 1994. 99–108
- 14 Han B F, Zheng Y D, Gang J W, et al. The louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: Master fault of a quasi-metamorphic core complex. *Int Geol Rev*, 2001, 43: 254–264
- 15 邵济安, 张履桥, 贾文, 等. 内蒙古喀喇沁变质核杂岩及其隆升机制探讨. 岩石学报, 2001, 17: 283–290
- 16 方曙, 朱洪森, 朱慧忠, 等. 华北地台北缘喀喇沁断隆隆升机制. 中国地质, 2001, 28: 5–11
- 17 张晓晖, 李铁胜, 薄志平, 等. 内蒙古赤峰娄子店-大城子韧性剪切带的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其构造意义. 科学通报, 2002, 47: 951–956
- 18 刘伟, 杨进辉, 李潮峰. 内蒙赤峰地区若干主干断裂带的构造热年代学. 岩石学报, 2003, 19: 717–728
- 19 王新社, 郑亚东. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 地质论评, 2005, 51: 574–582
- 20 王新社, 郑亚东, 刘玉琳, 等. 内蒙赤峰南部楼子店拆离断层系绿泥石化带的形成时代. 自然科学进展, 2006, 16: 902–906
- 21 韩国卿, 刘永江, 金巍, 等. 西拉木伦河断裂在松辽盆地下部的延伸. 中国地质, 2009, 36: 1010–1020
- 22 韩国卿, 刘永江, 温泉波, 等. 嫩江-八里罕断裂带岭下韧性剪切带变形特征. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39: 397–405
- 23 钟增球, 郭宝罗. 构造岩与显微构造. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991
- 24 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件. 地学前缘, 2008, 15: 226–233
- 25 Stipp M, Stunitz H, Heilbronner R, et al. The eastern Tonale fault zone: A ‘natural laboratory’ for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *J Struct Geol*, 2002, 24: 1861–1884
- 26 杨天南, 徐宏顺. 通过构造岩鉴别岩石动态重结晶的机制. 地质通报, 2008, 27: 1459–1467
- 27 Fry N. Random point distributions and strain measurements in rocks. *Tectonophysics*, 1979, 6: 89–105
- 28 Stone D, Schwerdtner W M. Total strain within a major mylonite zone, southern Canadian Shield. *J Struct Geol*, 1981, 3: 193–194
- 29 Siddans A W, Henry B, Kligfield R. Finite strain patterns and their significance in Permian rocks of the Alpes Maritimes (France). *J Struct Geol*, 1984, 6: 339–368
- 30 郑亚东, 常志忠. 岩石有限应变测量及韧性剪切带. 北京: 地质出版社, 1985
- 31 郑亚东, 王涛. 中蒙边界区中生代推覆构造与伸展垮塌作用的运动学和动力学分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 291–303
- 32 王云斌, 梁明宏, 霍勤知, 等. 利用变形花岗岩体中的长石矿物进行有限应变测量初探. 西北地质, 2004, 37: 19–24
- 33 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 2008, 27: 1638–1645
- 34 嵇少丞. 主要造岩矿物中位错分解及其流变学意义. 现代地质, 1988, 2: 516–523
- 35 嵇少丞. 部分熔融的构造地质意义(1): 变形机制转变的实验研究. 地质科学, 1988, 4: 347–356
- 36 齐金忠, 戚学祥, 陈方远. 南苏鲁高压变质带南岗-高岛韧性剪切带特征及 EBSD 石英组构分析. 中国地质, 2005, 32: 287–298
- 37 Passchier C W, Trouw R A J. *Micro-tectonics*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 25–111
- 38 Wijbrans J R, Pringle M S, Koppers A A P, et al. Argon geochronology of small samples using the Vulkana argon laserprobe. *Proc Ned Akad v Wetensch*, 1995, 98: 185–218
- 39 Hinsbergen D J J van, Straathof G B, Kuiper K F, et al. No vertical axis rotations during Neogene transpressional orogeny in the NE Gobi Altai: coinciding Mongolian and Eurasian early Cretaceous apparent polar wander paths. *Geophys J Int*, 2008, 173: 105–126
- 40 Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the blueschist facies pelitic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, Western China. *Island Arc*, 2006, 15: 187–198
- 41 Liu Y J, Genser J, Neubauer F, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 2005, 398: 199–224
- 42 Lo C H, Lee C Y. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method of K-Ar age determination of geological samples using the Tsing-Hua Open-Pool Reactor (THOR). *J Geol Soc China* 1994, 37: 143–164
- 43 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社, 1980. 1–124
- 44 Wang H Z. The main stages of crustal development of China. *Earth Science: J Wuhan College Geol*, 1982, 7: 155–178
- 45 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 等. 亚洲大地构造图(1/800 万)说明书. 北京: 中国地图出版社, 1982. 1–49

- 46 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 中国华夏与安哥拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社, 1991. 1-151
- 47 王玉净, 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 1997, 36: 58-69
- 48 王友, 樊志勇, 方曙, 等. 西拉木伦河北岸新发现地质资料及其构造意义. 内蒙古地质, 1999, (1): 6-28
- 49 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 2007, 23: 565-582
- 50 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34: 174-181
- 51 Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. J Asian Earth Sci, 2007, 30: 542-556
- 52 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 科学通报, 2007, 52: 591-561
- 53 杨现力. 扎兰屯浅变质岩系地质特征及碎屑锆石年代学研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2007. 1-110
- 54 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996. 144-201
- 55 姚大全. 中朝地台北缘东段的平移剪切和推覆构造. 中国区域地质, 1989, (3): 262-268
- 56 张宏. 敦-密断裂带平移问题讨论. 中国地质科学院 沈阳地质矿产研究所集刊, 1993, (2): 35-43
- 57 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带. 北京: 地质出版社, 2000
- 58 赵英利, 刘永江, 韩国卿, 等. 敦-密断裂左行走滑三维有限元模拟. 世界地质, 2009, 28: 310-317
- 59 Wang Y. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: Constraints from zircon (SHRIMP) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. Terra Nova, 2006, 18: 423-431
- 60 陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2000, 30: 215-220
- 61 王勇生, 朱光, 宋传中, 等. 大别山东端郯庐断裂带由走滑向伸展运动转换的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学记录. 地质科学, 2006, 41: 242-255
- 62 张青, 朱光, 刘国生, 等. 郯庐断裂带张八岭隆起北段的左旋走滑挤压变形及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. 地学前缘, 2008, 15: 234-249
- 63 张岳桥, 董树文. 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识. 地质通报, 2008, 27: 1371-1390
- 64 朱光, 谢成龙, 王勇生, 等. 郯庐高压走滑韧性剪切带特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. 岩石学报, 2005, 21: 1687-1702
- 65 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 等. 郯庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年. 地质学报, 2005b, 79: 303-316
- 66 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31: 250-256
- 67 窦立荣, 宋建国, 王瑜. 郯庐断裂带北段形成的年代学及其意义. 地质论评, 1996, 42: 508-513
- 68 殷长建, 彭玉鲸, 王彦生, 等. 伊舒断裂带年代学新证据. 吉林地质, 2005, 24: 6-15
- 69 孙晓猛, 刘永江, 孙庆春, 等. 敦密断裂带走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38: 965-972
- 70 韩国卿, 刘永江, Neubauer F, 等. 松辽盆地西缘边界断裂带中北段尼尔基 L 型构造岩构造年代学及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 出版中
- 71 Li W M, Takasu A, Liu Y J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the high-P/T metamorphic rocks of the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, northeastern China. J Mineral Petrol Sci, 2009, 104: 110-116
- 72 Wu F Y, Yang J H, Lo C H, et al. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. Island Arc, 2007, 16: 156-172
- 73 赵英利, 刘永江, 李伟民, 等. 佳木斯地块南缘牡丹江地区高压变质作用: 黑龙江杂岩的岩石学和地质年代学. 地质通报, 2010, 29: 243-253
- 74 Maruyama S, Seno T. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese Islands. Tectonophysics, 1986, 127: 305-329
- 75 Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. Island Arc, 1997, 6: 121-142
- 76 孙晓猛, 王书琴, 王英德, 等. 郯庐断裂带北段构造特征及构造演化序列. 岩石学报, 2010, 26: 165-176
- 77 刘德来, 陈发景, 关德范, 等. 松辽盆地形成、发展与岩石圈动力学. 地质科学, 1996, 31: 397-408
- 78 Ma L, Yang J L, Ding Z G. Songliao Basin—An intercontinental sedimentary basin of the combination type. In: Zhu X, ed. Chinese Sedimentary Basins. Amsterdam: Elsevier, 1989. 78-87