大兴安岭北段雅鲁河断裂晚更新世活动记录

钱 程¹, 陆 露^{2,3}, 秦 涛¹, 李林川¹, 江 斌¹, 杨晓平¹, 陈会军¹, 汪 岩¹, 杨雅军¹ QIAN Cheng¹, LU Lu^{2,3}, QIN Tao¹, LI Linchuan¹, JIANG Bin¹, YANG Xiaoping¹, CHEN Huijun¹, WANG Yan¹, YANG Yajun¹

1.中国地质调查局沈阳地质调查中心,辽宁沈阳110034;

2.沈阳师范大学古生物学院,辽宁 沈阳 110034;

3.东北亚古生物演化重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

1. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. College of Paleontology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, Liaoning, China;

3. Key Laboratory of Evolution of Past Life in Northeast Asia, Ministry of Land and Resources, Shenyang 110034, Liaoning, China

摘要:大兴安岭北段雅鲁河断裂为典型的活动断层,对区域晚更新世地质和地貌演化及现代地震具有控制意义。在扎兰屯市 成吉思汗镇北雅鲁河东侧发现雅鲁河断裂活动记录,以野外资料为基础,通过相关松散堆积物的光释光测年,厘定断层活动特 征和活动时限,并结合相关经验公式,估测该记录反映的古地震特征。研究结果显示,雅鲁河断裂晚更新世在扎兰屯南部地区 存在断层活动,断层走向近SN向、倾向265°、倾角约55°,性质为逆断层;断层活动错断了中生代流纹岩和晚更新世早-中期洪 冲积物,并被晚更新世晚期残积和冲积物覆盖,断层活动发生在距今53.4±6.7~39.1±3.6ka之间;活动记录所反映的古地震矩震 级(Ma)和面波震级(Ms)为6.7级,地震发生时地表破裂长度(SRL)约为30.2~37.8km。

关键词:雅鲁河断裂;活动断层;晚更新世;古地震

中图分类号:P542.3;P534.63⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)09-1748-07

Qian C, Lu L, Qin T, Li L C, Jiang B, Yang X P, Chen H J, Wang Y, Yang Y J. A study of the Late Pleistocene action of Yaluhe fault in northern Da Hinggan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(9):1748–1754

Abstract: The Yahuhe fault in northern Da Hinggan Mountains is a typical active fault, and it is of significance in the study of the Late Pleistocene regional geological and geomorphologic evolution and modern earthquake. The authors discovered the active records of Yaluhe fault on the east of Yalu River in northern Genghis Khan Town of Zhalantun City. In this paper, on the basis of detailed field data, the authors determined the fault activity characteristics and time limit through the OSL dating of loose deposits, and estimated the ancient seismic features of the fault active records combined with relevant experience formula. The study results show that the movement of Yaluhe fault in the south of Zhalantun occurred in the Late Pleisotocene. The fault is nearly SN-striking, with dip 55° and dip angle 265°, being a thrust fault. The fault dislocated Mesozoic rhyolite and early to middle Late Pleistocene pluvial-al-luvial deposits, and was covered by the Late Pleistocene eluvial and alluvial deposits. The fault happened at $53.4\pm6.7\sim39.1\pm3.6$ ka. As active record reflected, the ancient seismic moment magnitude (M₀) and surface wave magnitude (Ms) was about 6.7, and surface rupture length (SRL) was about $30.2 \sim 37.8$ km at the time of the earthquake.

Key words: Yaluhe fault; active fault; Late Pleistocene; palaeo-earthquake

收稿日期:2018-03-10;修订日期:2018-06-28

资助项目:中国地质调查局项目《大兴安岭成矿带突泉—翁牛特地区基础地质综合研究与片区总结》(编号:DD20160048-01)、《大兴安岭 区域地质调查片区总结与服务产品开发》(编号:DD20160345-17)和《东北基础地质综合研究与片区总结》(编号:1212011220435)

作者简介:钱程(1985-),男,硕士,工程师,构造地质学专业,从事区域地质与新构造研究。E-mail: qch1985123@163.com

通讯作者:陆露(1985-),女,博士,讲师,构造地质学专业,从事区域地质研究。E-mail:yangchunyoulu@163.com

雅鲁河断裂位于大兴安岭北段,由大兴安岭北 段主脊向东坡延伸与嫩江断裂交汇,北起内蒙古牙 克石市附近,沿免渡河和雅鲁河河谷展布,途经内蒙 古免渡河镇、博克图镇、哈拉苏镇、卧牛河镇、扎兰屯 市、成吉思汗镇,再向东南进入黑龙江省,经辗子山 区、龙江县,终止于雅鲁河与嫩江交汇处,全长约 300km,断裂总体走向NW-NNW,由多条NNW 向、近SN向和近EW向断裂首尾相接(图1-a)^[1]。区域 地质调查资料显示,雅鲁河断裂对免渡河和雅鲁河 两侧的地势地貌及晚更新世以来的冲洪积物展布具 有强烈的控制作用⁰²。现代地震资料显示,自1900 年以来,雅鲁河断裂及其周边地区发生了多次中强 度地震,均呈现浅源地震特征,震级主要分布在4~ 5.5级之间,发震时间主要为公元1923—1931年、 1956年、1980—1981年,发震断层性质为走滑-逆断 层^[2-4]。自2008年龙江县Ms5.0级地震以来,雅鲁河 断裂进入到新的活跃期,相继在扎兰屯市-牙克石市 交界、鄂温克族自治旗、扎兰屯市、碾子山区发生6次 小型浅源地震,2017年在扎兰屯市和碾子山区发生 3次地震(Ms3.0~3.8,震源深度10~18km)。因此,雅 鲁河断裂是大兴安岭地区典型的活动断层,其不仅 对免渡河和雅鲁河流域晚更新世地质和地貌演化 具有控制意义,也与现代地震活动密切相关。

前人对雅鲁河断裂周边的第四纪地质、古环境 变迁、构造地貌、新构造运动等进行了大量调查⁰²³ 与研究¹⁵⁻¹⁴,认为免渡河和雅鲁河发育2~3级阶地及 一系列断裂活动的地貌遗迹,且雅鲁河断裂和嫩江 断裂所夹的断块自中更新世以来存在3期抬升¹¹⁴。 目前,主要通过雅鲁河周边地貌和晚更新世地质的 调查与研究,推测雅鲁河断裂的活动特征,尚未找 到断裂活动错切晚更新世以来松散堆积物的直接 证据。近年来,笔者在内蒙古东部扎兰屯市附近开 展地质调查工作中,在雅鲁河东侧的高位松散砂砾 石层中发现雅鲁河断裂活动记录,该记录不仅可以 厘定断层活动特征、限定断层活动时代,且可以结 合相关经验公式,估测该记录反映的古地震特征, 对区域活动构造研究、地震活动规律探索、地质灾 害预警及重大工程规划意义重大。

1 区域概况

1.1 地貌、地质概况

雅鲁河断裂活动记录发现于扎兰屯市成吉思

汗镇北侧,位于雅鲁河断裂东南段(图1-b)。该段行政区属黑龙江省碾子山区—内蒙古自治区扎兰屯 一带,是大兴安岭东坡的山前地区,为松嫩平原与 大兴安岭NE—NNE向隆起带的盆山过渡区,是中 国东北地区盆山地貌形成、新构造运动、气候环境 研究的重要位置^[14]。区域地势整体呈西高东低、北 高南低的特征,雅鲁河主河道由北向南呈NNW— 近SN向展布。雅鲁河河谷两侧地势地貌和水系特 征略显不同:东侧为起伏较小的台地,分支水系发 育且延伸有限;西侧为起伏较大的丘陵,分支水系 较发育且延伸较远,呈NW向和近EW向展布,较大 的有雾大哈气河、库堤河、麒麟河等(图1-b)。

大地构造位置上,该区位于古亚洲洋构造域东 段与太平洋构造域的复合部位[10-12,15]。中生代以来, 受蒙古-鄂霍次克洋闭合及太平洋西向俯冲影响, 形成一系列的火山盆地,并伴有巨量的岩浆活动, 呈现了一系列近EW向、NE-NNE向、NW-NNW 向的断裂构造活动带^[9-10,15]。该区重要的断裂为嫩 江断裂、海拉尔断裂和雅鲁河断裂(图1-b):嫩江断 裂为 NE-NNE 向展布的岩石圈断裂,经历多期次 活动,强烈活动于燕山晚期¹¹¹,新生代仍有强烈活 动,为第四纪活动断裂,对区域地貌具有控制意 义^四;海拉尔断裂为海拉尔盆地北缘断裂,近EW— NEE向展布,强烈活动于燕山晚期,新生代仍有活动, 为第四纪活动断裂,对区域地貌具有控制意义;雅 鲁河断裂主要沿免渡河-雅鲁河分布,呈NW-NNW 向,形成于晚中生代,晚更新世以来活动强烈[1.14]。 区内前新生代地质体主要为晚中生代火山岩和晚 古生代一中生代花岗岩,分布有少量元古宙一早寒 武世浅变质岩系和晚古生代碎屑岩、火山岩⁰²⁴。

1.2 晚新生代地质概况

雅鲁河断裂周边晚新生代沉积物主要沉积于 晚更新世以来,是免渡河和雅鲁河流域冲积和冲洪 积作用的产物。区调资料将免渡河河谷中的松散 堆积物厘定为全新世冲积,将河谷两侧的高位冲 (洪)积统一划归为上更新统红旗沟组,沉积物主要 为含卵石粘土层和粉砂层^①。笔者调查发现,该套 高位沉积物总体分布于河谷两侧的 I、II级台地 上,地貌成因类型应分属于早全新世洪冲积和晚更 新世洪冲积。针对雅鲁河周边的晚新生代沉积物, 前人做了大量工作。20世纪70年代,华安公社幅 1:20万区调工作将雅鲁河河谷中的松散堆积物厘





定为全新世冲积,河谷两侧前新生代基岩之上的松 散沉积物厘定为下更新统白土山组、中更新统古里 金组、下更新统白土山组、上更新统北高台子组[®]; 近期完成的1:5万区域地质调查将该套沉积物厘定 的更加精细,划分为中晚全新世冲积、早全新世洪 冲积、早全新世风积、晚更新世洪冲积[®]。

雅鲁河断裂周边地貌差异抬升较强烈,大型河谷两侧发育断层三角面、河流阶地等。免渡河河谷两侧发育断层三角面和2级阶地,阶地T₁保存较好, T₂形成较老,局部地区有残存。雅鲁河阶地特征各 段略有差异,博克图-卧牛河镇段河谷东侧、北侧发 育断层三角面和3级阶地,阶地T₁保存较好,T₂、T₃ 形成较老,局部地区有残存;扎兰屯-辗子山段河谷 西侧发育断层三角面,东侧发育2级阶地,阶地T₁保 存较好,T₂形成较老,局部地区有残存。

2 断层活动记录及样品采集

断层活动记录发现于雅鲁河东侧的高位松散 砂砾石层中,坐标为北纬47°48′41.8″、东经122°49′ 20.2″(图1-b)。该处雅鲁河河谷平摊开阔,两侧地势 陡峭,整体呈"U"形,地势西侧于东侧,西侧发育断 层三角面,主要由前新生代地质体组成,其上未见 河流冲洪积物,东侧地势起伏不大,与河谷过渡地 带地势较陡,基岩之上发育松散砂砾石沉积,前人 将其厘定为晚更新世冲洪积(雅鲁河 T,阶地)¹⁴¹。

该断层活动记录显示,中生代流纹岩逆冲于松 散砂砾石层之上,并被后期的细砂粘土层-粉砂层 覆盖,呈现逆冲断层特征,露头上视逆冲断距大于 4.4m,计算得到逆冲断距大于2.2m(图2)。具体特征 如下。

(1) 露头上可见一断层, 宽 20~40 cm, 带内呈黄

白色,强风化、强粘土矿化,断层结构面产状为265° ∠55°,擦痕、阶步等特征不清。

(2)断层西盘为一套灰黄色高岭土化流纹岩, 风化较强,呈土状,新鲜面可见斑状结构,斑晶主要 为钾长石(3%~5%)和石英(<2%)。钾长石呈灰白色, 粘土矿化较强,半自形-自形短板状,大小0.5~ 1.5mm;石英呈他形粒状,大小0.5~1mm。内部发育 平行于上述断层结构面的断层,特征较一致。

(3)断层东盘地质体主要由两部分组成,分别 由下部的基岩(灰黄色高岭土化流纹岩)和上部的松 散砂砾石层组成,松散砂砾石层主体为锈黄色粉砂



 Fig. 2 The sketch map and photo of Yaluhe fault in the north of Genghis Khan Town

 1一强风化灰色流纹斑岩;2—锈黄色粉砂砾石层;3—锈黄色细砾粉砂层;4—砖红色细砂粘土层;5—灰黄色粉砂层;

 6—土壤层;7—逆断层;8—采样点及编号

砾石层,层面倾向NEE,倾角小于10°,锈黄色细砾粉 砂层呈透镜状不均匀分布于粉砂砾石层底部或中 部,砾石磨圆度中等-好、分选性较好、扁平面略显定 向。在松散砂砾石层底部的锈黄色细砾粉砂层中采 集光释光测年样品OSL2、OSL3、OSL4,在中部的锈 黄色细砾粉砂透镜体中采集光释光测年样品OSL5。

(4)断层及两盘地质体之上覆盖一套细砂粘土 层-粉砂层,接触面起伏不大,呈舒缓波状,主体由 两部分组成,分别为下部的砖红色细砂粘土层和上 部的灰黄色粉砂层。在砖红色细砂粘土层中采集 光释光测年样品 OSL1,在灰黄色粉砂层中采集光 释光测年样品 OSL6。

基于露头地质体特征及断裂构造发育,可将本 套地质体由老到新划分为四部分:①中生代灰黄色 流纹岩(图2中①);②晚更新世洪冲积(锈黄色粉砂 砾石层、图2中②③);③晚更新世残积(砖红色细砂 粘土层、图2中④);④晚更新世冲积(灰黄色粉砂层、 图2中⑤)。雅鲁河断裂活动于中生代流纹岩和晚 更新世洪冲积中(图2中①②③),晚更新世残积和冲 积(图2中④⑤)未受断裂活动影响,断层走向近 SN 向,倾向265°,倾角约55°,露头上表现为逆断层性 质,走滑特征不明。

3 断层活动时限厘定

3.1 测试方法及结果

本次通过光释光测年(OSL)方法对成吉思汗镇 北断层活动记录周边松散堆积物的沉积时代进行 年代学分析,进而厘定断层活动时代。测试工作在 山东省地震工程研究院实验室完成。该方法的测 试原理为:沉积物在沉积过程中石英、长石等矿物 的光释光信号被晒退归零,沉积后基本处于恒定的 电离辐射场中(即环境辐射剂量率恒定),石英、长石 等矿物的光释光信号强度与矿物吸收电离辐射剂

表1 样品光释光测年结果 Table 1 OSL dating results of the samples

样品编号	测试物	环境剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	等效剂量/Gy	光释光年龄/ka
OSL1	砖红色细砂粘土	2.4 ± 0.2	93.8±8.8	39.1±3.6
OSL2	锈黄色细砾粉砂	2.2 ± 0.2	150.1 ± 12.5	68.2±5.6
OSL3	锈黄色细砾粉砂	2.8±0.3	186.2±11.2	66.5±4.9
OSL4	锈黄色细砾粉砂	2.8±0.3	223.4±12.2	79.6±5.8
OSL5	锈黄色细砾粉砂	2.4 ± 0.2	127.5±14.5	53.4±6.7
OSL6	灰黄色粉砂	2.4±0.2	86.7±4.9	36.1±2.2

量的时间成正相关的函数关系,进而可以通过测定 石英、长石等矿物的天然光释光信号强度所对应的 电离辐射剂量获得沉积地层的沉积年龄,即年龄 A=等效剂量(*D*_E)/环境剂量率(*D*)(*D*_E为等效剂量,*D* 为环境剂量率)¹⁶。

前处理与测样制备在暗室进行,选择样品中心 部位未污染、曝光的样品,通过中低温烘干、有机质 和碳酸盐类去除、低温烘干、石英提纯等制成测片 供等效剂量测定,并取 20g可能曝光的样品烘干用 于环境剂量率测定。等效剂量(*D*_E)测试在丹麦 Risoe DA-20-C/D型热/光释光自动测量系统上进 行,采用单片再生法(SAR)^{II7-I8I}完成。环境剂量率 (*D*)测定通过等离子体质谱仪及全谱直读等离子体 发射光谱仪测量,获得样品U、Th、K及其衰变子体 对环境剂量率的贡献。假定实验室测定的样品U、 Th、K含量及含水量可以代表样品埋藏期间的实际 值,且样品采集和运输过程中未曝光或失水分,那 么样品的光释光年龄代表了样品最后一次曝光距 今的时间,结果见表1。

3.2 断层活动时代

前人在博克图镇一徐地营子一带对雅鲁河断 裂的活动特征进行了大量的调查³³。在南木村东变 电站北侧发现一条近SN向冲沟穿越雅鲁河断裂断 层陡坎,其内为冲洪积砂砾石层且未见断层错断现 象,测得沉积物的热释光年龄为距今25.13±2.14ka; 在扎兰屯市南徐地营子附近的燕山期花岗岩中识 别出雅鲁河断裂活动遗迹,由一系列次级逆冲断层 和断层破碎带组成,断层走向近SN,倾向E,倾角约 60°,断层被砂层和含砾砂层覆盖,其热释光年龄为 距今30.48±2.59ka。综合分析,雅鲁河断裂在晚更 新世早一中期活动明显,其后没有发生错断地表的 事件¹¹,本次在成吉思汗镇北发现的断层活动记录 进一步证实该结果。

> 此次,在成吉思汗镇北断层周边的 松散堆积物中共获得6个光释光(OSL)年 龄,年龄值分布于79.6±5.8~36.1±2.2ka 之间,指示该套松散堆积物沉积于晚更 新世,与前人厘定的时代一致¹¹⁴。其 中,晚更新世洪冲积(锈黄色粉砂砾石层) 中的4个OSL年龄显示其沉积开始于距 今79.6±5.8~66.5±4.9ka、结束于距今 53.4±6.7ka之后,为晚更新世早一中期洪

冲积的产物;晚更新世残积(砖红色细砂粘土层)中 获得的OSL年龄为39.1±3.6ka,限制了洪冲积沉积 结束的时代;晚更新世冲积(灰黄色粉砂层)中获得 的OSL年龄为36.1±2.2ka,暗示其为晚更新世晚期 冲积的产物。雅鲁河断裂在成吉思汗镇北活动错 断的最新地质体为晚更新世洪冲积(锈黄色粉砂砾 石层),指示其活动时间发生在距今53.4±6.7ka之 后,未被断裂活动影响的最老地质体为晚更新世残 积(砖红色细砂粘土层),指示其活动时间发生在距 今39.1±3.6ka之前,由此较准确地限定雅鲁河断裂 在成吉思汗镇北活动发生在距今53.4±6.7~39.1± 3.6ka之间。

4 古地震参数估算

地震参数主要包括发震断层性质、震级、破裂、 位移参数等,其中发震断层性质是指正断层、逆断 层、平移断层、平移正断层、平移逆断层等,震级指 面波震级(Ms)、矩震级(Mo)、里氏震级(ML)、体波震级 (M_b)等,破裂和位移参数指地表破裂长度(Surface Rupture Length, SRL)、隐伏破裂长度(Subsurface Rupture Length, RLD)、破裂宽度(Rupture Width, RW)、破裂范围(Rupture Area, RA)、最大地表位移 (Maximum Displacement, MD)、平均地表位移(Average Displacement, AD)等[19-20]。大量研究表明,在发 震断层性质确定的基础上,地表破裂长度(SRL)、隐 伏破裂长度(RLD)、破裂宽度(RW)、破裂范围(RA)、 最大地表位移(MD)、平均地表位移(AD)等破裂和位 移参数之间,及其与震级之间均存在极好的相关关 系[19-24]。因此,活动断层的古地震研究往往侧重发 震断层性质、破裂、位移等相关地震参数的收集与 分析,进而估算震级的大小;反之,在发震断层性质 确定的基础上,通过震级亦可反推古地震发生时破 裂与位移等相关地震参数。Donald 等基于全球公 元1859—1993年之间的421个陆内浅源(<40km) 中强地震(>4.5级)的原始信息统计,针对不同性质 的发震断层,通过破裂与位移地震参数和矩震级的 回归分析,得到一系列的经验公式[24]。

结合前人对雅鲁河断裂晚更新世断层活动 性质的调查³³,本文将成吉思汗镇北发现的断层 活动性质厘定为逆断层,沿倾向断距大于2.2m。 Donald 等分析的逆断层指水平滑距(HZ)和垂直 滑距(VT)的比值小于1^[24],因此对于倾向断距 2.2m的活动记录而言,地表位移量应在2.2~3.1m之间。

对于逆断层,矩震级(M₀)与最大地表位移(MD) 和平均地表位移(AD)的相关公式为:M₀=6.52+ 0.44×log(MD)、M₀=6.64+0.13×log(AD),其中MD和 AD的单位为m,适用范围分别为0.11~6.5m和0.06~ 2.6m。若将前文的地表位移量(2.2~3.1m)作为最大 地表位移(MD),得到的矩震级(M₀)为6.67~6.74;若 将其作为平均地表位移(AD),得到的矩震级(M₀)为 6.68~6.70。由此分析可知,成吉思汗镇北断层活动 记录反映的古地震矩震级(M₀)约为6.7级。对于 5.7~8.0级地震,面波震级(M₅)和矩震级(M₀)大致相 等^[24],因此,记录反映的面波震级(M₅)也约为6.7级。

地震发生时破裂与位移相关地震参数较多,本 文重点对地表破裂长度(SRL)进行估算,估算可以通 过其SRL与地表位移(MD或AD)的关系公式完成, 也可以通过其SRL与矩震级(M₀)的关系公式完成。 对于逆断层,地表破裂长度(SRL)与最大地表位移 (MD)和平均地表位移(AD)的经验公式为:log $(SRL) = 1.36 + 0.35 \times \log(MD) \log(SRL) = 1.45 + 0.26 \times \log(SRL)$ log(AD),其中MD和AD的单位为m,适用范围分别 为0.11~6.5m、0.06~2.6m, SRL的单位为km, 而地表 破裂长度(SRL)与矩震级(M₀)的经验公式为log (SRL)=-2.86+0.63*M₀,其中M₀的适用范围分别为 5.4~7.4m、SRL的单位为km。若将前文的地表位移 量(2.2~3.1m)作为最大地表位移(MD),基于SRL-MD 经验公式算得的地表破裂长度(SRL)为 30.2~ 34km;若将其作为平均地表位移(AD),基于SRL-AD 经验公式算得的地表破裂长度(SRL)为34.6~ 37.8km;而基于震级(M。=6.7)算得的地表破裂长度 (SRL)为31.3km。由此分析可知,成吉思汗镇北断 层活动记录反映的古地震地表破裂长度(SRL)为 30.2~37.8km

5 结 论

雅鲁河断裂晚更新世在扎兰屯市成吉思汗镇 附近存在断层活动,断层走向近 SN向,倾向 265°, 倾角约 55°,性质为逆断层。断层活动错断了中生 代流纹岩和晚更新世早一中期洪冲积物(沉积物 OSL测年为79.6±5.8~53.4±6.7ka),并被晚更新世晚 期残积和冲积物覆盖(沉积物 OSL测年分别为 39.1± 3.6ka 和 36.1±2.2ka),由此限定断层活动发生于距今 53.4±6.7~39.1±3.6ka之间。利用相关经验公式计算,成吉思汗镇北断层活动记录反映的古地震矩震级(Ms)和面波震级(Ms)约为6.7级,地震发生时的地表破裂长度(SRL)为30.2~37.8km。

参考文献

[1]邓起东.中国活动构造图(1:400万) [M].北京:地震出版社,2007. [2]孙文斌,王晓峰,常征,等.我国东北地区地震时空演变特征及其

动力学研究[J]. 东北地震研究, 2005, 21(2): 1-8.

- [3]张萍,孙文福,苗春兰,等.东北地区中强地震震源机制解分析[J].地震地磁观测与研究,2009,30(1):12-19.
- [4]张萍, 焦明若, 李芳, 等. 东北地区 ML≥4.0 地震地震机制特征分析 []]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(5): 9-14.
- [5]夏玉梅, 汪佩芳. 松嫩平原晚第三纪一更新世孢粉组合及古植被 与古气候的研究[J]. 地理学报, 1987, 42(2):166-173.
- [6]万波,钟以章.东北地区的新构造运动特征分析及新构造运动分区[J].东北地震研究,1997,13(4):64-75.
- [7]林年丰,汤洁,卞建民,等.东北平原第四纪环境演化与荒漠化问题[J].第四纪研究,1999,5:448-455.
- [8]张殿发,林年丰.松嫩平原生态地质环境变迁构造-气候旋回机 制探讨[J].世界地质,2000,19(1):73-74.
- [9]李锦轶,莫申国,和政军,等.大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约[]].地学前缘,2004,11(3):157-168.
- [10] 葛肖红, 马文璞. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓[J]. 中国 地质,2007, 34(2): 212-228.
- [11]张兴洲,杨宝俊,吴福元,等.中国兴蒙一吉黑地区岩石圈三维结构及演化[M].北京:地质出版社,2011.
- [12]王五力, 付俊彧, 杨雅军.中国东北晚中生代一新生代盆山体系 构造演化及其成因探讨[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 17-26.
- [13] 钱程, 崔天日, 李林川, 等. 基于 ASTER-GDEM 数据的大兴安 岭北段地貌形态分析[J]. 地质力学学报, 2013, 19(1): 82-92.
- [14]钱程,秦涛,李林川,等.大兴安岭北段东坡扎兰屯地区高位砂砾 石层研究及其地质意义[J].地质与资源,2016,25(5):424-435.
- [15]李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构 造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009, 39(4):

584-605

- [16]Aitken M J. ThermoluminesceneDating[M]. London Academic Press, 1985.
- [17]Murray A S, Wintle A.G.Luminescence Dating of Quartz using an Improved Single-aliquot Regenerative- dose Protocol[J]. Radiation Measurements, 2000,32(1):57-73.
- [18]王旭龙,卢演俦,李晓妮.细颗粒石英光释光测年:简单多片再生 法[].地震地质,2005, 27(4):615-623.
- [19]Tocher D. Earthquake Energy and Ground Breakage[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 1958, 48(2): 147–153.
- [20]Iida K. Earthquake Energy and Earthquake Fault[J]. Journal of Earth Sciences Nagoya University, 1959, 7:98–107.
- [21]Ohnaka M. Earthquake-source Parameters related to Magnitude[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1978, 55 (1):45–66.
- [22]Acharya H K. Regional Variations in the Rupture-length Magnitude Relationships and their Dynamical Significance[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(6):2063–2084.
- [23]Bonilla M G, Mark R K, Lienkaemper J J. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74(6):2379–2411.
- [24]Donald L W, Kevin J C. New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 1994, 84(4): 974–1002.
- ①内蒙古自治区地质调查院.1:250000扎兰屯市幅(M5C004002)区 域地质调查报告.2006.
- ②中国地质大学(北京)地质调查研究院. 1:250000 苏格河幅(M5 C 004 001)区域地质调查报告. 2013.
- ③中国地震局地质研究所.中俄原油管道(满洲里-大庆)工程场地 地震安全性评价报告. 2002.
- ④吉林大学地质调查研究院.1:250000 蘑菇气幅(L51C001002)区域 地质调查报告.2012.
- ⑤黑龙江省地质区域地质测量第二队.1:200000华安公社幅区域地 质调查报告(地质部分).1976.
- ⑥中国地质调查局沈阳地质调查中心.内蒙古1:50000徐地营子等 4幅区域地质调查报告.2016.