

松辽盆地长岭断陷火山岩锆石 U-Pb 测年及其地质意义

李瑞磊^{1,2}, 朱建峰², 刘 玮³, 刘曼丽², 陆建林⁴, 王保华⁴, 陈光宇²

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化 东北分公司, 吉林 长春 130062;

3. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130062; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126]

摘要:火山岩是松辽盆地断陷期盆地充填的主体,其年龄的精确标定是认识盆地裂陷启动时间和地层划分对比的基础。系统采集了长岭断陷 20 件火山岩样品,进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析。锆石 U-Pb 测年结果显示,原定火石岭组的火山岩形成于 110~119 Ma,应划归为营城组一段;原定营城组的火山岩形成于 100~109 Ma,应划归为营城组三段。所选火山岩样品鉴定为安山岩、粗面岩、流纹质凝灰岩和流纹岩;在 TAS 图解中落入流纹岩、粗面岩以及粗面英安岩区域。两个年龄区间的火山岩具有相似的地球化学特征,如铕负异常和稀土分配曲线都为轻稀土富集的右倾斜型,进一步暗示了二者的亲缘性。作为松辽盆地南部最大的深层构造单元,长岭断陷的火山岩地层序列需要重新厘定;松南地区火山-裂谷作用起始于早白垩世晚期而非晚侏罗世,相应的盆地构造-沉积史和油气形成演化史也需要进一步认识。

关键词:锆石 U-Pb 年龄;地层划分;裂陷启动期;火山岩;长岭断陷

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Zircon U-Pb dating of volcanic rocks of Changling Fault Depression in the southern Songliao Basin and its geological significance

Li Ruilei^{1,2}, Zhu Jianfeng², Liu Wei³, Liu Manli², Lu Jianlin⁴, Wang Baohua⁴, Chen Guangyu²

(1. College of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Northeast Branch Corporation, SINOPEC, Changchun, Jilin 130062, China; 3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China; 4. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Volcanic rocks are the main basin fillings during the formation of fault depression in the Songliao Basin, and their accurate dating is the basis of the rifting timing and layer subdivision. Twenty volcanic rocks samples were collected from the Changling Fault Depression and dated with LA-ICP-MS zircon U-Pb ages. Zircon U-Pb dating shows that the previous recognized Huoshiling Fm volcanic rocks formed between 110~119 Ma and should be grouped into the 1st Member of the Yingcheng Fm. While the previously recognized Yingcheng Fm volcanic rocks formed between 100~109 Ma and should be grouped into the 3rd Member of the Yingcheng Fm. Petrologically, the volcanic rocks are composed dominantly of andesite, trachyte, rhyolitic tuff and rhyolite, which are displayed in TAS diagram. Geochemical data show that the volcanic rocks have similar features such as light rare earth elements enrichment and negative Eu anomalies, indicating their affinity. As the deepest structure unit in the southern Songliao Basin, new layer subdivision and correlation strategy need to be proposed. And the results also indicate that the syn-rift stage of the southern Songliao Basin started at the Early Cretaceous rather than the previously believed Late Jurassic, which means the corresponding structure-sedimentary and hydrocarbon formation history need to be further recognized.

Key words: zircon U-Pb dating, layer subdivision, initiation of fault depression, volcanic rock, Changling Fault Depression

松辽盆地是我国较大的中生代陆相含油气盆地,具有断陷-拗陷双层结构。上部拗陷层主要是后裂谷期形成的沉积盖层,下部断陷层为同裂谷期的火山岩夹煤系地层^[1]。长岭断陷位于松辽盆地南部,面

积为 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,是松辽盆地南部面积最大、埋藏最深的断陷^[2-3]。自 1960 年代开始油气勘探和研究工作,早期主要集中在盆地隆起区和浅层,在 2000 年后火山岩的油气勘探取得了重大突破,火山岩成为深层

收稿日期:2014-12-24;修订日期:2015-03-05。

第一作者简介:李瑞磊(1970—),男,博士、高级工程师,油气地质勘查。E-mail:liuilei99@163.com。

基金项目:国家基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB82000);国家自然科学基金项目(41472304,41202072);中国石化科技项目(P14020)。

天然气勘探的主要目的层位^[4-5]。火山岩层位的准确厘定是层位对比、盆地充填以及油气藏勘探开发等相关研究的基础。然而长岭断陷火山岩的地层划分和各组、各层位的年代还存在争议。基于以往油气勘探地质分层的结果显示,长岭断陷的断陷期充填始于晚侏罗世火石岭组,发育沙河子组和营城组,自下而上的火石岭组二段、营城组一段(营一段)和营城组三段是火山岩发育的3个主要层段^[2,6-12]。然而,近几年随着勘探的进展本区勘探地层界线已进行了调整,原定火石岭组的大量火山岩是否均为火石岭组,原定营城组的火山岩具体属于营一段还是营三段,这些问题制约了地层、盆地和油气等相关问题的研究与认知进程。同位素年龄的测定,无疑为研究盆地火山岩层位归属提供了一种有效的方法。本文在钻井、测井和地震层位对比的基础上,开展针对性的火山岩系统采样,研究长岭断陷火石岭组和营城组火山岩的岩石学、地球化学、同位素年代特征。研究结果对厘定区内火山岩地层及年代归属有重要意义,也为盆地充填和油气勘探提供了新的基础资料。

1 地质概况和样品采集

长岭断陷是一个复合式中生代断陷,可以划分为8个构造区带,包括乾安次凹、查干花次凹、长岭次凹、苏公坨断坡带、北正断坡带、所图低凸带、达尔罕断凸带和东岭构造带。本文主要对长岭断陷查干花次凹、东岭构造带、达尔罕断凸带和北正断坡带4个区块进行采样(图1),采样层位为断陷层,集中分布在原层位划分的火石岭组和营城组。经岩矿薄片鉴定,采集的火山岩主要有流纹岩、粗面岩、流纹质凝灰岩和安山岩(图2)。

2 火山岩测年和地球化学

2.1 火山岩测年结果

对采自长岭断陷的20件火山岩样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析,CL图像显示,所测岩石样品的锆石颗粒晶形较好,具环带或条带状结构,锆石的Th/U值均大于0.1,为典型岩浆成因的锆石,年龄谱和曲线如图3所示。

测年结果显示,长岭断陷火山岩形成于101~119 Ma的早白垩世晚期(表1),与前人在松辽盆地南部所测断陷层火山岩锆石的U-Pb年龄一致^[13-22],但地质层位归属有较大调整。具体表现为:原定为火石岭组样品,测年结果111~118 Ma,应划归到营城组一段;原定营城组的火山岩可进一步细分为营城组一段(110~119 Ma)和营城组三段(100~109 Ma)。

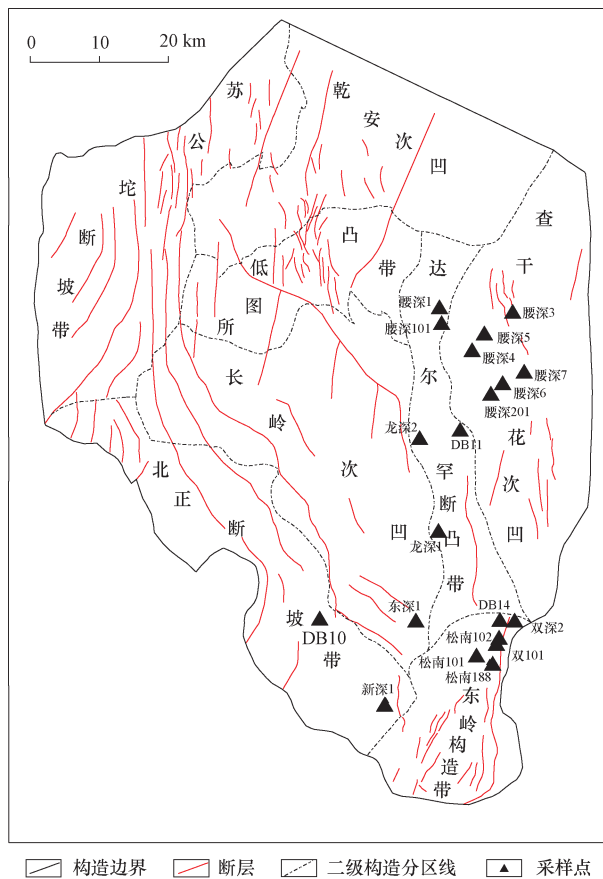


图1 松辽盆地长岭断陷构造分区及采样位置

Fig. 1 Structure division and sampling locations of the Changling Fault Depression, Songliao Basin

2.2 火山岩地球化学

选择不同构造带和不同层位的代表性火山岩进行元素地球化学特征对比,研究不同期次火山岩的地球化学属性,并为火山岩层位对比提供佐证。长岭断陷原定火石岭组和营城组火山岩具有相同的地球化学特征,在TAS图解中落入流纹岩、粗面岩以及粗面英安岩区域(图4)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线显示(图5),铈负异常和稀土配分曲线都为轻稀土富集的右倾斜型。相似的地球化学特征,进一步暗示了二者的亲缘性。

3 讨论

3.1 长岭断陷地层划分对比

松辽盆地南部断陷层火山沉积序列的层位对比一直有较大争议,其焦点之一是营城组火山碎屑岩之下中性火山岩的归属问题^[7,11-13]。由本文测年结果可知,长岭断陷火山岩的形成时代为100~119 Ma,属早白垩世晚期,并呈现出两个年龄峰值。第一个年龄峰值区间为100~109 Ma,第二个年龄峰值区间为110~

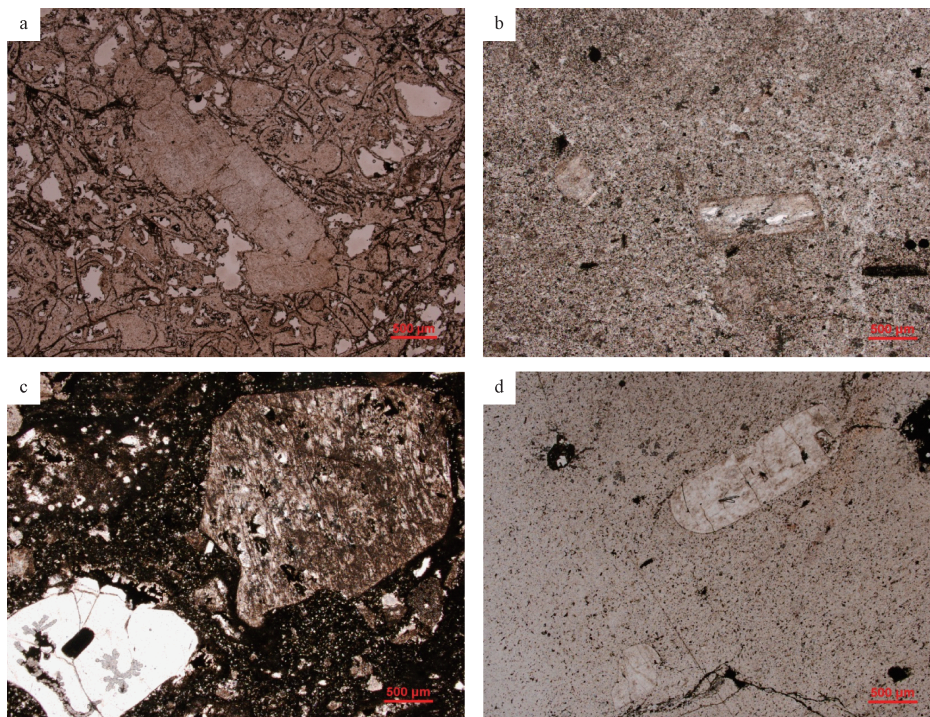


图2 长岭断陷测年样品典型火山岩类显微照片

Fig. 2 Micrograph showing features of typical volcanic rocks for dating in the Changling Fault Depression

a. 流纹岩,玻基斑状结构,斑晶主要为石英和碱性长石,基质主要为火山玻璃及隐晶质长英质集合体,气孔发育,见珍珠构造,LS2,埋深 4 114.27 m,单偏;b. 粗面岩,少斑斑状结构,斑晶主要碱性长石,基质为交织结构或毡状结构,YS6,埋深 4 265.5 m,单偏;c. 流纹质含角砾凝灰岩,晶屑主要为石英和碱性长石,见岩屑;基质为细粒火山灰,YS7,埋深 3 213.55 m,正交;d. 流纹岩,斑状结构,斑晶主要为钾长石,基质为微晶及隐晶质石英,YS4,埋深 4 166.75m,单偏

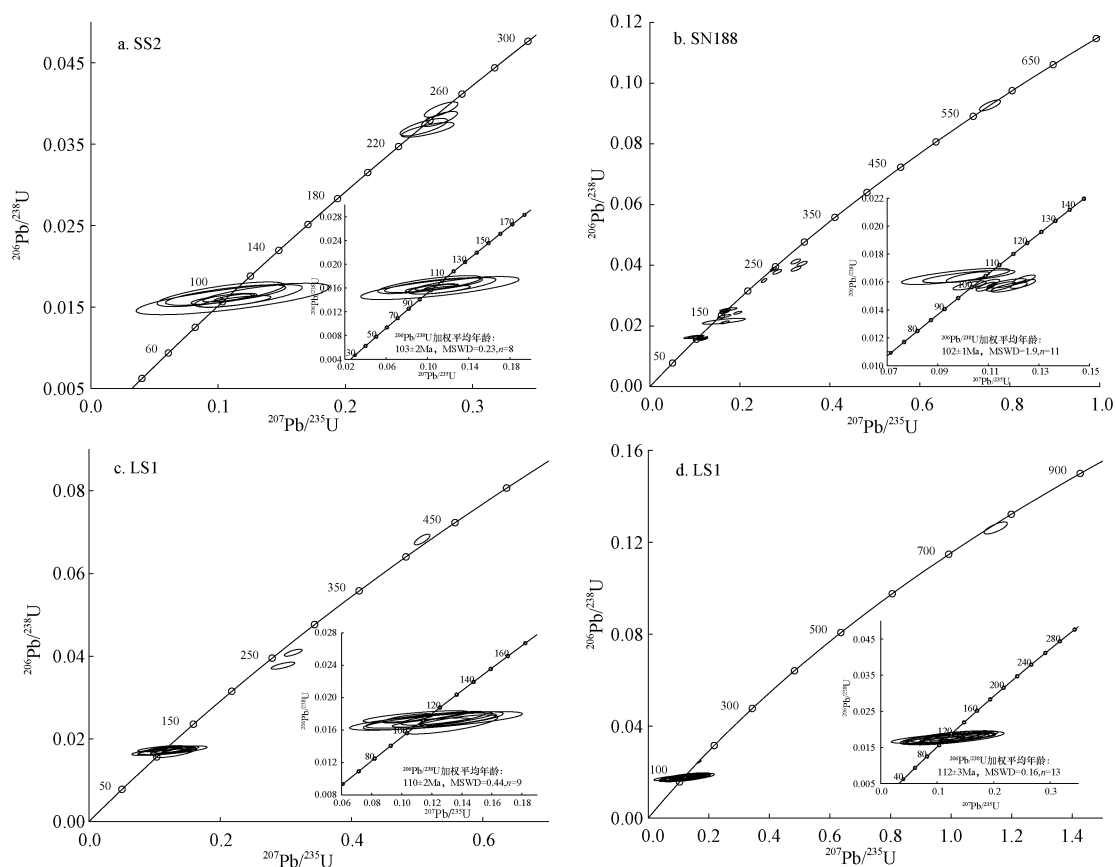
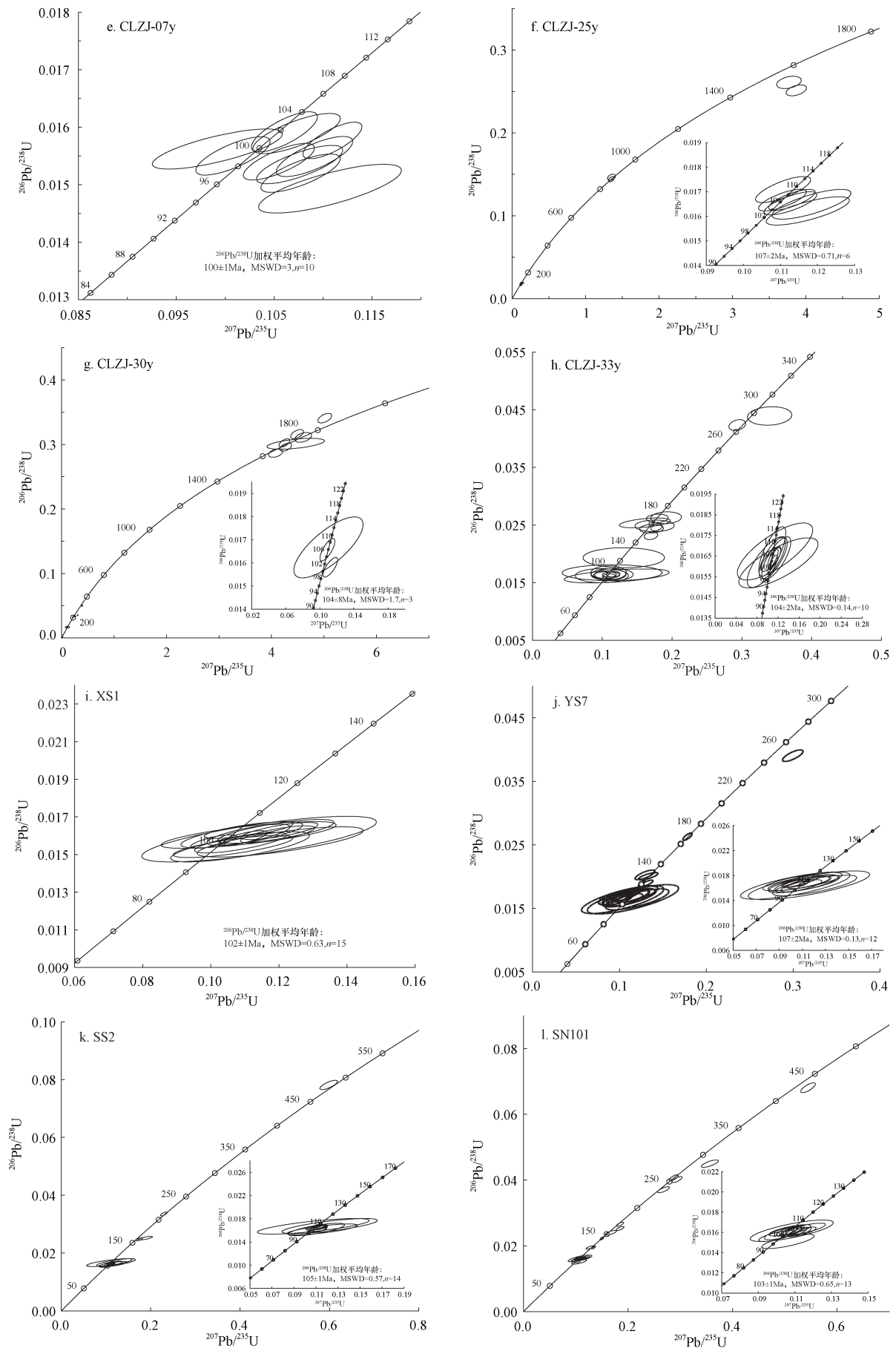


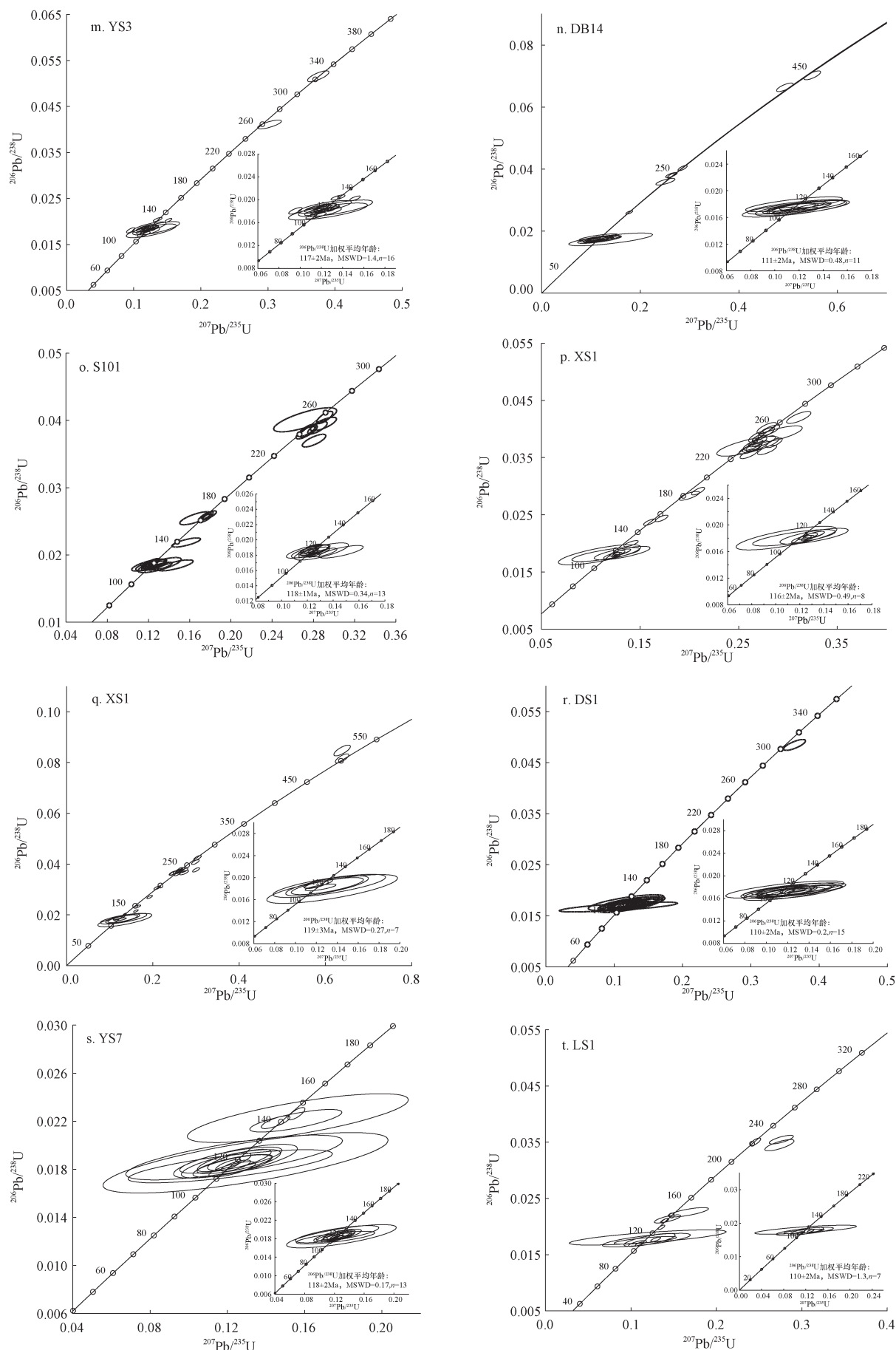
图3 长岭断陷火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordance diagrams of volcanic rocks in the Changling Fault Depression



续图 3 长岭断陷火山岩锆石 U - Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordance diagrams of volcanic rocks in the Changling Fault Depression



续图3 长岭断陷火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordance diagrams of volcanic rocks in the Changling Fault Depression

表 1 长岭断陷火山岩锆石 U - Pb 测年结果

Table 1 Zircon U-Pb dating of volcanic rocks in the Changling Fault Depression

采样地点	井号	取样深度/m	样号	岩性	年龄/Ma	原层位	现层位	资料来源
查干花次凹	腰深 3	3 529.75 ~ 3 529.90	YS3 - 1	流纹质凝灰岩	107 ± 6	营城组	营三段	数据引自 文献[19 - 20]
	腰深 4	4 167.30 ~ 4 168.50	YS4 - 1	角闪粗面岩	112 ± 1	营城组	营一段	
	腰深 5	3 873.50 ~ 3 873.65	YS5 - 2	流纹岩	104 ± 3	营城组	营三段	
	腰深 201	4 104.10 ~ 4 104.30	YS201 - 1	碱性流纹岩	106 ± 2	营城组	营三段	
	腰深 7	3 212.55 ~ 3 212.65	YS7	流纹质凝灰岩	108 ± 3	营城组	营三段	本文
	腰深 7	3 560.00	YS7	凝灰岩	107 ± 2	营城组	营三段	
	腰深 7	3 213.55	CLZJ - 33y	流纹质凝灰岩	104 ± 2	营城组	营三段	
	腰深 6	4 166.00	CLZJ - 30y	凝灰岩	104 ± 8	营城组	营三段	
达尔罕 断凸带	腰深 4	4 166.75	CLZJ - 25y	流纹岩	109 ± 3	营城组	营三段	数据引自 文献[20,22]
	腰深 1	3 569.00 ~ 3 569.20	YS1	流纹质熔结凝灰岩	105 ± 2	营城组	营三段	
	龙深 1	4 218.00	LS1	粗面质凝灰岩	101 ± 5	营城组	营三段	
	龙深 2	4 114.27	CLZJ - 07y	流纹岩	100 ± 1	营城组	营三段	
	DB10	2 569.00		含角砾安山岩	102 ± 1	营城组	营三段	
东岭 构造带	达 2	3 613.00		流纹岩	105 ± 1	营城组	营三段	数据引自 文献[18]
	松南 188	2 119.00 ~ 2 129.00	SN188	安山岩	101 ± 1	营城组	营三段	本文
	松南 101	2 417.00 ~ 2 422.00	SN101	流纹岩	103 ± 1	营城组	营三段	
北正 断坡带	新深 1	3 570.00	XS1	安山岩	102 ± 1	营城组	营三段	本文
	双深 2	1 680.00	SS2	安山岩	105 ± 1	营城组	营三段	
	双深 2	1 870.00	SS2	流纹斑岩	103 ± 2	营城组	营三段	
查干花次凹	腰深 3	4 320.00	YS3	流纹质凝灰岩	117 ± 1	火石岭组	营一段	本文
	腰深 7	4 260.00	YS7	流纹质凝灰岩	118 ± 2	火石岭组	营一段	
达尔罕 断凸带	龙深 1	4 504.00	LS1	流纹质凝灰岩	111 ± 2	火石岭组	营一段	本文
	龙深 1	4 565.00	LS1	安山岩	111 ± 2	火石岭组	营一段	
	龙深 1	4 700.00	LS1	流纹质凝灰岩	112 ± 3	火石岭组	营一段	
	DB14	2 100.00	DB14	安山岩	111 ± 2	火石岭组	营一段	
东岭 构造带	松南 180	2 469.00	SN180 - 1	杏仁安山岩	106 ± 3	火石岭组	营三段	数据引自 文献[21]
	松南 180	2 708.00	SN180 - 2	杏仁安山岩	116 ± 1	火石岭组	营一段	
北正 断坡带	新深 1	4 410.00	XS1	安山岩	116 ± 2	火石岭组	营一段	本文
	新深 1	4 570.00	XS1	粗面岩	119 ± 3	火石岭组	营一段	
	东深 1	4 630.00	DS1	安山岩	110 ± 2	火石岭组	营一段	
	双 101	2 292.00 ~ 2 304.00	S101	流纹质凝灰岩	118 ± 1	火石岭组	营一段	

注:测试方法为 LA - ICP - MS。

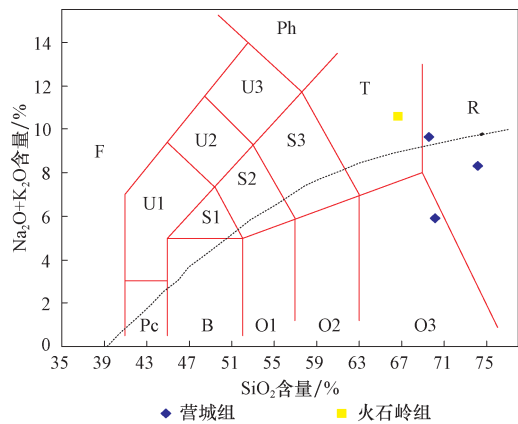


图 4 长岭断陷火山岩 TAS 分类

Fig. 4 TAS diagram of volcanic rocks in the Changling Fault Depression

F. 似长岩; Pc. 苦橄质玄武岩; U1. 碱玄岩, 碧玄岩; U2. 响岩质碱玄岩; U3. 碱玄响岩; Ph. 响岩; B. 玄武岩; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武质粗面安山岩; S3. 粗面安山岩; T. 粗面岩, 粗面英安岩; O1. 玄武质安山岩; O2. 安山岩; O3. 英安岩; R. 流纹岩

119 Ma。由表 1 可知, 第一个年龄区间对应于营城组三段, 第二个年龄区间对应于营城组一段。依据本文

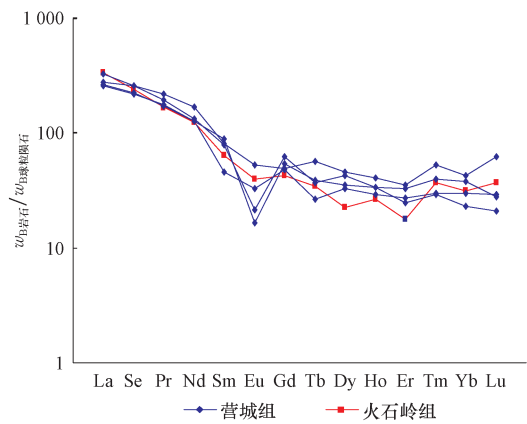


图 5 长岭断陷稀土元素配分模式^[23]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution model of volcanic rocks in the Changling Fault Depression^[23]

火山岩测年结果和井间测井 - 地震火山地层对比, 对前人测年结果进行统一的层位调整(表 1)。该分层方案使得井间和断陷间地层对比关系更加明晰, 也使得地质层位与地震反射层之间更趋于一致, 显示出更好的客观性和可操作性(图 6)。

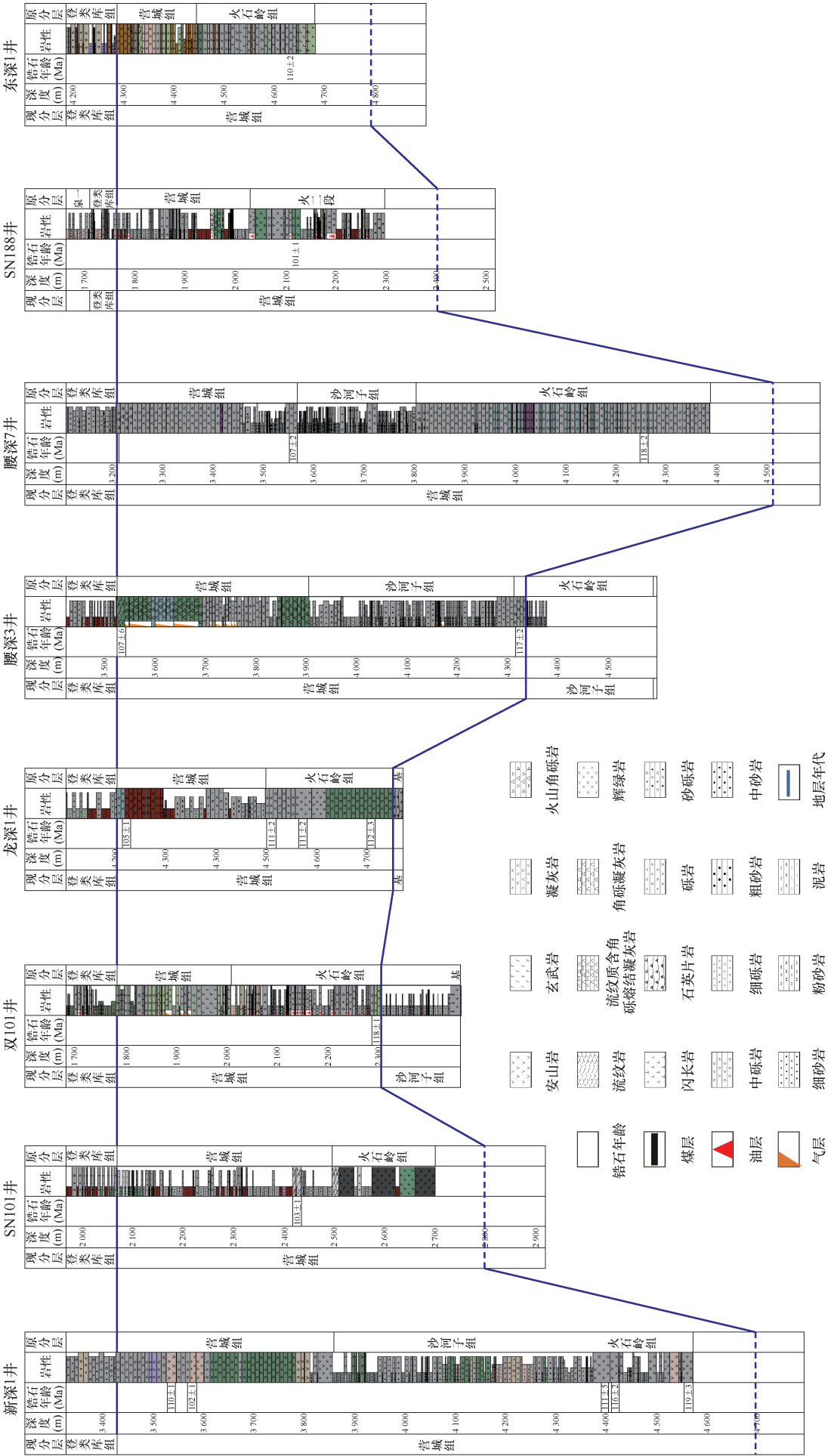


图6 重新厘定的长岭断陷地层划分对比方案
Fig.6 Redefined layer subdivision of the Changling Fault Depression

原定为火石岭组和营城组的火山岩在常量和稀土元素特征方面均具有相似性。以往研究表明,松辽盆地火石岭组与营城组火山岩在地球化学特征方面存在显著差异^[24-26],这就进一步暗示了原定火石岭火山岩应该属于营城组火山岩。

3.2 松辽盆地南部深层勘探前景

从目前钻井揭示情况看,松南长岭断陷沙河子组直接覆盖在基底浅变质岩之上。本区盆地充填特征为,以沙河子组细碎屑岩开始,接着为营城组一段火山岩、营二段火山碎屑岩夹煤、营三段火山岩。本区第一期大规模火山作用发生在 119 Ma 前后,属于营城组一段,说明长岭断陷的火山-裂谷作用起始于早白垩世晚期而非晚侏罗世。在区域上松辽盆地初始裂陷往往表现为火山裂谷型盆地充填^[6,27]。松南长岭断陷以沙河子组细粒沉积开始,可能代表着裂陷期松辽盆地及邻区在成盆作用方面的时空差异性。

长岭断陷天然气的分布特征受到烃源岩分布范围及生烃强度的控制^[28]。长岭断陷沙河子组和营城组湖沼相暗色泥岩和含煤泥岩具有分布范围广、厚度较大和有机质丰度较高等特征,是深层天然气生成主要的烃源岩^[29-30]。本区营城组发育完整的火山沉积序列,可与沙河子组细粒沉积构成多套原生气藏的生储盖组合^[31-32]。沙河子组泥岩生烃,营城组一段火山岩作为储层,营城组二段泥岩作为盖层的一个成藏组合;沙河子组泥岩和营城组二段煤系烃源岩,营城组三段作为主要储层,营城组上段及登娄库组泥岩作为盖层的成藏组合;沙河子自生自储、营城组自生自储的成藏组合,显示出乐观的勘探前景。

4 结论

1) 长岭断陷火山岩测年结果显示年龄分为两个峰值区间,分别是 100~109 Ma 和 110~119 Ma,分别对应地层为营城组三段和一段。

2) 本区营城组发育完整的火山-沉积序列,由两套火山岩和营二段碎屑岩含煤层序构成。沙河子组发育以细碎屑岩为主的沉积层序,通常直接覆盖在基底浅变质岩之上。

3) 长岭断陷启动时间应为早白垩世,而非晚侏罗世。初始断陷表现为沙河子组细碎屑岩沉积,形成快速沉降的非补偿型向上变深变细变薄序列,烃源岩发育。其盆地充填为沙河子组碎屑岩,营城组一段和三段以火山岩为主,营城组二段以碎屑岩为主,可形成多套生储盖组合的原生油气藏,深层勘探前景广阔。

参 考 文 献

- [1] Wang Pujun, Chen Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 98, (In Press).
- [2] 张玮,李洪革,李明杰. 松辽盆地南部长岭断陷区深层构造特征与天然气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 120-127. Zhang Wei, Li Hongge, Li Mingjie. Structural characteristics and gas accumulation in the deep of the Changling Fault Depression, the South Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 120-127.
- [3] 郑曼,李建忠,王立武,等. 松辽盆地长岭断陷营城组火山岩储集空间特征及演化[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 135-141. Zheng Man, Li Jianzhong, Wang Liwu, et al. Reservoir space characteristics and evolution of the volcanic rocks in Yingcheng Formation of Changling fault depression, Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 135-141.
- [4] 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 1-5. Feng Zhiqiang. Exploration potential of large Qingshen Gas Field in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 1-5.
- [5] 侯启军. 南北辉映气贯松辽——吉林油田公司长岭断陷长深 1 井发现纪略[J]. 中国石油企业, 2006, (3): 45-46. Hou Qijun. Gas through out the Songliao Basin: Discovery of well CSI in Changling Fault Depression of Jinlin Oilfield Company[J]. China Petroleum Enterprise, 2006, (3): 45-46.
- [6] Wang Pujun, Xie Xiao'an, Mattern Frank, et al. The Cretaceous Songliao Basin: Volcanogenic succession, sedimentary sequence and tectonic evolution, NE China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 1002-1011.
- [7] 贾军涛,王璞珺,邵锐,等. 松辽盆地东南缘营城组地层序列的划分与区域对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1110-1123. Jia Juntao, Wang Pujun, Shao Rui, et al. Stratigraphical sequence and regional correlation of Yingcheng Formation in the Southern of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1110-1123.
- [8] 陈孔全,陆建林,张玺,等. 松辽盆地南部长岭断陷火山岩储层的特征与勘探潜力[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 228-234. Chen Kongquan, Lu Jianlin, Zhang Xi, et al. Volcanic reservoir features and exploration potential of Changling fault depression in the southern Songliao Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 228-234.
- [9] 孙凯,宋立斌,李本才,等. 松辽盆地南部深层地层划分与对比[J]. 地层学杂志, 2013, 37(4): 472-478. Sun Kai, Song Libin, Li Bencai, et al. The deep sequence characteristics of the southern Songliao Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37(4): 472-478.
- [10] 王力圆,唐华风,王璞珺,等. 松辽盆地长岭断陷火山岩相地震特征及其响应关系[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 271-278. Wang Liyuan, Tang Huafeng, Wang Pujun, et al. The seismic reflection characteristics and response relationship of volcanic rocks lithofacies in Changling fault depression, Songliao Basin[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2012, 27(1): 271-278.
- [11] 瞿雪姣,王璞珺,姚瑞士,等. 松辽盆地南部火石岭组地层序列划分与区域对比[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2716-2727. Qu Xuejiao, Wang Pujun, Yao Ruishi, et al. Stratigraphical sequence and regional correlation of Huoshiling Formation in the southern of Songliao Basin[J]. Journal of Central South University(Science and

- Technology), 2014, 45(8): 2716–2727.
- [12] 瞿雪姣, 王璞珺, 高有峰, 等. 松辽盆地断陷期火石岭组时代归属探讨[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 234–250.
- Qu Xuejiao, Wang Pujun, Gao Youfeng, et al. Chronostratigraphy of the Huoshilin Formation in the Songliao Basin, NE China: An Overview[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 234–250.
- [13] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(5): 603–617.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yang Debin, et al. Mesozoic volcanic rocks in the southern Songliao Basin: zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of basin basement[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(5): 603–617.
- [14] 高妍. 松辽盆地东南缘中生代火山岩的年代学和地球化学特征[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- Gao Yan. Chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in southeastern Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [15] 陈井胜. 松辽盆地南部营城组火山岩成因[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- Chen Jingsheng. The genesis of volcanic rocks of Yingcheng Formation in southern Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [16] 章凤奇, 程晓敢, 陈汉林, 等. 松辽盆地东南缘晚中生代火山事件的锆石年代学与地球化学制约[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 39–54.
- Zhang Fengqi, Cheng Xiaogan, Chen Hanlin, et al. Zircon chronological and geochemical constraints on the late Mesozoic volcanic events in the southeastern margin of the Songliao Basin, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 39–54.
- [17] 王璞珺, 陈树民, 李伍志, 等. 松辽盆地白垩纪火山期后热液活动的岩石地球化学和年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 33–46.
- Wang Pujun, Chen Shumin, Li Wuzhi, et al. Chronology, petrology and geochemistry of the Cretaceous crypto-explosive breccia-bearing volcanic rocks: Implication for volcanic reservoir and tectonic of the Songliao Basin, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 33–46.
- [18] 吴群, 蒲仁海, 韩敏强, 等. 长岭凹陷白垩系火山岩的锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2010, 30(2): 111–119.
- Wu Qun, Pu Renhai, Han Minqiang, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for the volcanic rocks in Changling Depression, and its geological implication[J]. Mineral Petrol, 2010, 30(2): 11–119.
- [19] 刘玮, 孙德有, 李瑞磊, 等. 松辽盆地长岭断陷营城组火山岩的时代与岩石成因[J]. 世界地质, 2013, 32(3): 522–530.
- Liu Wei, Sun Deyou, Li Ruilei, et al. Chronology and petrogenesis of volcanic rocks in Yingcheng Formation from Changling Depression in Songliao Basin[J]. Global Geology, 2013, 32(3): 522–530.
- [20] 刘玮. 松辽盆地长岭断陷营城组酸性火山岩的时代、地球化学特征及岩石成因[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Liu Wei. Age, geochemistry and petrogenesis of the Yingcheng Formation from Changling Depression in the Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [21] 温升福, 刘曼丽, 刘玮, 等. 松辽盆地长岭断陷中基性火山岩的时代与其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1762–1771.
- Wen Shengfu, Liu Manli, Liu wei, et al. Geochronology and petrogenesis of intermediate-basic volcanic rocks from Changling Depression in the Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1762–1771.
- [22] 胡纯心. 长岭断陷构造特征及白垩纪以来的构造演化[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 229–235.
- Hu Chunxin. Structural characteristics and post-Cretaceous tectonic evolution of the Changling Rift[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 229–235.
- [23] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C] // Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [24] Wang Pujun, Liu Wanzhu, Wang Shuxue, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao Basin, NE China: constraints on stratigraphy and basin dynamics[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91: 331–340.
- [25] Wang Pujun, Ren Yanguang, Shan Xuanlong, et al. The Cretaceous volcanic succession around the Songliao Basin, NE China: relationship between volcanism and sedimentation[J]. Geological Journal, 2002b, 37: 97–115.
- [26] 宋立忠, 赵泽辉, 焦贵浩, 等. 松辽盆地早白垩世火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1182–1194.
- Song Lizhong, Zhao Zehui, Jiao Guihao, et al. Geochemical characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks from Songliao Basin, Northeast China, and its tectonic implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1182–1194.
- [27] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(2).
- Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao Basin: Dynamic background from volcanic rift to interior sag basin[J]. Earth Science Frontier, 2015, 22(2).
- [28] 谢忱, 胡纯心. 松辽盆地长岭断陷南部天然气成藏与富集特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 381–385.
- Xie Chen, Hu Chunxin. Gas accumulations and distribution features in the south of the Changling fault depression in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 381–385.
- [29] 王洪江, 吴聿元. 松辽盆地长岭断陷火山岩天然气藏分布规律与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 33(3): 360–367.
- Wang Hongjiang, Wu Yuyuan. Distribution patterns and controlling factors of volcanic gas pools in the Changling fault depression, the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 33(3): 360–367.
- [30] 闫鹏伟, 李建忠, 王立武, 等. 松辽盆地长岭断陷深层天然气资源潜力分析[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 902–907.
- Yan Pengwei, Li Jianzhong, Wang Liwu, et al. Prediction of the deep natural gas potential of Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 902–907.
- [31] 唐华凤, 李瑞磊, 吴艳辉, 等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620–627.
- Tang Huafeng, Li Ruilei, Wu Yanhui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620–627.
- [32] 王璞珺, 张功成, 蒙启安, 等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 597–610.
- Wang Pujun, Zhang Gongchang, Meng Qian, et al. Application of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 597–610.