

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*

王璞珺¹ 陈树民² 李伍志¹ 陈汉林³ 郎元强¹

WANG PuJun¹, CHEN ShuMin², LI WuZhi¹, CHEN HanLin³ and LANG YuanQiang¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

3. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Institute of Exploration and Development of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

3. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2009-08-01 收稿, 2009-11-01 改回.

Wang PJ, Chen SM, Li WZ, Chen HL and Lang YQ. 2010. Chronology, petrology and geochemistry of the Cretaceous crypto-explosive breccia-bearing volcanic rocks: Implications for volcanic reservoir and tectonics of the Songliao Basin, NE China. Acta Petrologica Sinica, 26(1):33-46

Abstract Hydrothermal breccias have been recognized within a Cretaceous volcanic center in the stratotype succession of Yingcheng Formation (K₁y) outcropped in southeast uplift of the Songliao basin. The autobreccias are composed of two counterparts, in-situ volcanic fragments cemented by hydrothermal deposits. The former is trachyte and rhyolite and the latter is very fine-grained red deposits precipitated from the Fe-rich silica hydrothermal fluids. We separated the red deposits from two kinds of in-situ volcanic breccias (4 samples) and analyzed them respectively on Ar/Ar age, major and trace elements and REE. Four underlying basaltic trachyandesites and two overlying rhyolites were simultaneously determined on all the elements above and SHRIMP for one rhyolite. The precise ³⁹Ar/⁴⁰Ar age of the in-situ trachyte fragment is 113.4 ± 0.7Ma, and that of the corresponding red deposit is 112.9 ± 19.6Ma, suggesting a time span of ca. 1Ma between trachy-lava event and the subsequent hydrothermal activity. Zircon SHRIMP age of the overlying rhyolite is 110.6Ma. The common signatures for all these 10 samples are rich in LREE((La/Yb)_N = 4.91 ~ 11.45) and P as well as such incompatible elements as Cs, Th and Zr but depleted in some other incompatible elements like Sr and Pb. Main differences among them are, (1) Eu and Ba show positive anomaly for the in-situ trachyte fragment and 4 underlying basaltic trachyandesites, but negative for the five other ones; (2) only the two red deposits filled in the hydrothermal breccias show negative K-anomaly while the other 8 ones show positive K-anomaly; (3) the 4 underlying basaltic trachyandesites show positive Ti anomaly and low Rb/Sr ratios(0.04 ~ 0.05) while the 6 other samples show negative Ti anomaly and high Rb/Sr ratios (0.62 ~ 2.83). They are bimodal rift volcanics as a whole. The hydrothermal deposits show intimate geochemical prints with the following rhyolite, and are significant different from the pre-existed trachyte and basaltic trachyandesite. Therefore the crypto-explosion coupled with Fe-rich silica hydrothermal fluids are preferred to be explained as forerunner of the subsequent rhyolitic lava, and the thermal fluids gained Fe-bearing materials by leaching all the penetrated rocks while ascending. The subsequent crypto-explosion occurred preferentially within volcanic centers because of their structural weakness, and created many cracks and inter-granular space resulting in increase in porosity and permeability of the volcanic rocks. These can explain the fact that near volcano facies are favorable for the Cretaceous volcanic reservoir exploration in the basin. However, possible hydrothermal-derived natural gases of this period could not contribute to the present gas traps because they were formed before the formation of overlying seals.

Key words Cretaceous; Volcanic rocks; Magmatic hydrothermal fluids; Chronology and geochemistry; Songliao Basin

摘要 在松辽盆地东南隆起区营城组标准剖面营三段古火山口附近识别出岩浆期后热液活动的地质记录。岩石学特征

* 本文受国家 973 项目(2009CB219303)资助。

第一作者简介: 王璞珺,男,1959 年生,博士、教授,博士生导师,从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学,E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

表现为隐爆角砾岩,即,原有的近火山口相岩石(原岩)被高压流体炸碎形成原地角砾,之后又被灌入的富含矿物质“岩汁”胶结形成的原地角砾岩。采集隐爆角砾岩及其上覆和下伏三个层位共10个样品进行地球化学和年代学对比研究,包括两套4个对应的原岩和岩汁、下伏4个玄武粗安岩和上覆2个流纹岩。原岩高精度 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄 $113.4 \pm 0.7\text{Ma}$;岩汁为含铁酸性流体的隐晶质析出物,其 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄 $112.9 \pm 19.6\text{Ma}$;二者的年龄差反映岩浆主期与期后热液活动的时代间隔(1Ma之内)。10个样品的共性是:(1)稀土总量中-高($\sum\text{REE} = 81 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$)且轻重稀土分异明显($(\text{La}/\text{Yb})_n = 4.91 \sim 11.45$);(2)MORB 标准化蛛网图上P和部分不相容元素(Cs,Th,La和Zr)正异常,而另一部分不相容元素(Sr和Pb)负异常。整体表现为双峰式裂谷火山岩特点。主要差别在于:(1)铀和钍表现为两种情况,下伏玄武粗安岩和隐爆角砾岩中的粗面岩具正异常,而隐爆角砾岩中的流纹岩和岩汁及其上覆的流纹岩具负异常;(2)只有2个岩汁样品显示K负异常,其它8个岩石样品均为K正异常;(3)下伏玄武粗安岩(4个样)显弱的Ti正异常且Rb/Sr比低(0.04~0.05),而其它6个样品为Ti负异常且Rb/Sr比高(0.62~2.83),其中的2个岩汁样品Ti负异常最强。岩汁与其下伏粗面质原岩差别显著,而其上覆流纹岩(SHRIMP 年龄110.6Ma)的地化特征相似(见正文)。该火山期后热液活动是深源热流体萃取壳源物并沿古火山通道(构造薄弱带)运移到近地表的,可能是后续流纹质火山活动的先驱。这种高压的岩浆期后热液导致围岩炸裂、发生角砾岩化、形成大量角砾间孔和裂缝。这是造成火山口-近火山口相带成为优质储层的重要因素。该类火山岩储层改善作用早于烃类运移,可构成有利于成藏的时空配置。与该期热液活动相伴生的深源天然气早于上覆圈闭的形成,因此对成藏没有贡献。

关键词 白垩系;火山岩;岩浆热液流体;年代学和地球化学;松辽盆地;

中图分类号 P595; P597.3

1 引言

松辽盆地岩浆期后热液活动十分发育,通常表现为隐爆角砾岩(王璞珺等,2003)、流体包裹体(Wang *et al.*, 2007a)、孔缝充填和碳酸盐化及硅化(高有峰等,2007),有时还与深源的次火山岩脉伴生(郑常青等,2007),它们是影响火山岩储层物性的重要因素。通常岩浆期后热液温度 $50 \sim 700^\circ\text{C}$,以低于 400°C 为主;压力1到3kb(若岩石平均密度设为 $3\text{g}/\text{cm}^3$ 则相当于3.3km到10km厚的岩层静压力)(Jackson, 1997)。以往国内外关于岩浆热液流体的研究主要是探讨其组成及其与元素富集矿化的关系(如,Rusk *et al.*, 2004; Landtwing, 2005)。本文通过松辽盆地东南隆起区营城组标准剖面上部的营三段火山机构典型剖析,研究对比宿主岩(原岩)与灌入流体物质析出物(岩汁)的年代学和地球化学特征,探讨岩浆热液活动与古火山口的关系、岩浆热液性质和来源、宿主火山岩和岩浆热液的时代关系,进而探索本区火山期后热液活动与火山岩成储、成藏的时空关系。

2 地质背景

松辽盆地中、新生代盆地充填可厚达万米,其中的火山岩主要见于断陷层的火石岭组和营城组(Wang *et al.*, 2002a),亦见于拗陷层的青山口组(王璞珺等,2009)。其中的营城组火山岩是3000m以下深层天然气的主要储层(冯志强等,2007)。早白垩世到新近纪松辽盆地经历了盆地中心自东南向西北持续迁移的过程,Campanian 晚期的嫩江运动致使盆地东南部普遍隆升遭受剥蚀(Wang *et al.*, 2007b),使得该区出露了较为完整的白垩系盆缘剖面(王淑英,1989; Wang *et al.*, 2002b)。本课题组曾于2005-2006年间在位于

松辽盆地东南隆起区的九台市城子街镇石场村的营城组标准剖面,进行剖面钻探和地层岩相综合研究(闵悦琼等,2007;吴颜雄等,2007),发现于营三段上部发育一套玄武质火山集块岩、粗面质隐爆角砾岩、流纹质火山碎屑岩和柱状节理流纹岩,它们构成完整的近火山口岩相组合。本文在此基础上重点是对比研究隐爆角砾岩中的原岩和岩汁的岩矿、地球化学和年代学特征,并与其上覆流纹岩和下伏玄武安山岩对比,以期探讨火山作用与相关热液活动的时序关系和成因联系。

3 样品采集、处理和分析测试

样品采自吉林省九台市城子街镇石场村二队西侧约500m处,营城组标准剖面上部单元的营三段地层(表1)。

样品处理步骤:(1)用岩石切割机在岩石上分别切取足够量的原岩和岩汁,用碎样机分别粗碎后,挑出纯净的样品(原岩和岩汁在颜色上有较明显差异),剩下的用65目筛子除去最细的(装袋保存)。(2)对粒度 >65 目的样品用牙签类工具在实体显微镜下挑选,对既有原岩又有岩汁的颗粒用铁钵碎开(应掌握力度,避免使之太细而不能进行目视样品分离,此外作测年的需要颗粒大一些,至少大于45目),继续挑选,如此反复数次,挑够需要的量(保留副样的须多挑选)。(3)对纯净的大颗粒,可直接碎至40目。(4)选样完成后,对在显微镜下对应样品薄片可观察到碳酸盐矿物的样品要进行酸泡处理。酸为10%盐酸(一定不能超过10%,因为一些造岩矿物会在较高浓度酸中溶解),酸浸时间为24小时,有较多碳酸盐的样品在此期间要酌量添酸,保证其完全反应溶解。酸泡完成后要用蒸馏水把酸洗去,PH试纸显示为7。每换一次水要等浑浊溶液完全沉淀(大约1~2小时)。(5) 60°C 烘干样品,接着把烘干后样品用65目和45目

表 1 样品位置和特征描述(与图 2 和图 3 对应)

Table 1 Location and description of the samples (corresponding to figures 2 and 3)

序号	样品号	层位和岩性描述	采 样 位 置	序列
1	PSC-CN-24	营城组三段,灰白色柱状节理流纹岩	N:44°22'48.9",E:126°6'32.7",H:239m;九台市城子街镇石场村二队西山头西侧冲沟中柱状节理剖面	
2	PSC-CN-23	营城组三段,灰紫色流纹质角砾岩(火山弹)	N:44°22'43.4",E:126°6'31.3",H:235m;九台市城子街镇石场村二队玄武岩之上,西山头西侧冲沟	
3	PSC-Ys9-JL	营城组三段,灰紫色流纹质隐爆角砾岩之原岩角砾	N:44°22'37.7",E:126°6'38.9",H:234m;九台市城子街镇石场村二队西北山冲沟(掌子面西);两样品为同一块样品的不同部分	
4	PSC-Ys9-YZ	营城组三段,灰紫色流纹质隐爆角砾岩之灌入“岩汁”		
5	LT-B-3AC	营城组三段,灰紫色粗面质隐爆角砾岩之原岩角砾	N:44°22'38.1",E:126°6'42.2",H:238m;吉林省九台市城子街乡石场村二队北西西 500m;两样品为同一块样品的不同部分	上 ↑
6	LT-B-3BC	营城组三段,灰紫色粗面质隐爆角砾岩之灌入“岩汁”		下 ↓
7	PSC-CN-22	营城组三段,灰黑色致密块状玄武粗安岩	N:44°22'37.1",E:126°6'44.5",H:234m;九台市城子街镇石场村二队西山头玄武岩掌子面第四期	
8	PSC-CN-21	营城组三段,灰黑色致密块状玄武粗安岩	N:44°22'37.4",E:126°6'47.7",H:239m;九台市城子街镇石场村二队西山头玄武岩掌子面第三期	
9	PSC-CN-20	营城组三段,灰黑色致密块状玄武粗安岩	N:44°22'37.6",E:126°6'48.5",H:237m;九台市城子街镇石场村二队西山头玄武岩掌子面第二期	
10	PSC-CN-19	营城组三段,灰黑色致密块状玄武粗安岩	N:44°22'37.9",E:126°6'49.6",H:238m;九台市城子街镇石场村二队西山头玄武岩掌子面第一期	

套筛筛选出 Ar/Ar 测年样品。用于成分分析的样品对选样粒度没有严格要求,最终碎至 <200 目即可。

表 1 中 10 个样品分别在吉林大学分析测试中心、国家地震局地质所和澳大利亚 Curtin 大学实验室进行分析测试。其中常量元素用 XRF(亚铁和灼减分别用容量法和重量法单测)、微量元素和稀土元素用 ICP-MS。对隐爆角砾岩中的原岩角砾(LT-B-3AC)和灌入岩汁(LT-B-3BC)分别进行 Ar/Ar 年龄谱测试。对隐爆角砾岩之上的柱状节理流纹岩(PSC-CN-24)进行锆石 SHRIMP 测年。测试结果见表 2、表 3 和表 4。

4 岩浆期后热液活动的岩石学记录

研究区火山期后高压流体活动的岩石学/岩相学记录可以归纳为以下三方面。第一,表现为与热液活动同期形成的隐爆角砾岩。即,先存围岩被炸裂形成大量原地角砾,角砾位移量通常很小,有些角砾甚至可以按炸裂碴口复原,角砾间充填富含矿物质的流体(可称之为“岩汁”),它们中的析出物会充填或部分充填角砾间孔隙中起到“胶结”作用,形成热液角砾岩(hydrothermal breccia)(图 1)。第二,岩浆期后热

液活动主要集中在火山口和近火山口地区,平面和纵向的常见岩相组合为喷溢相、火山通道相的火山颈亚相和隐爆角砾岩亚相、爆发相空落亚相(且含火山弹)、火山通道相次火山岩亚相;自下而上其岩性岩相序列反映出距火山口越来越远的趋势,即,从下部块状熔岩(距火山口可近可远)向上变为角砾/集块熔岩(近火山口)、隐爆角砾岩(火山口边缘)、含火山弹角砾/凝灰岩(火山口)、柱状节理流纹岩(火山口)。第三,从岩浆作用的化学序列上,热液流体活动出现在从基性到酸性演变的时期,即,自下而上为基性→中基性偏碱性→隐爆角砾岩(热液角砾岩)→酸性火山岩。相关特征参见图 2、图 3 和图 4。

5 宿主火山岩(原岩)和灌入“岩汁”的年代学

将图 1 中所示火山岩原岩(宿主岩)和裂隙灌入物(岩汁沉淀物)分别挑选出纯净组分进行 Ar-Ar 年龄谱测定(表 2,图 5),测试方法见李大明等(2005)。对热液角砾岩之上柱状节理流纹岩进行锆石铀铅年龄测定,结果如图 6 所示(SHRIMP 分析测试由陈汉林课题组在澳大利亚 Curtin 大学

表2 营城组三段宿主火山岩(上)和岩汁(下)的⁴⁰Ar/³⁹Ar分析结果

Table 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar data pair on the hydrothermal deposits (lower) hosted in the in-situ basaltic trachyandesite (upper) of K₁y³

Ref.	TEMPC	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar (E-3)	³⁹ Ar (E-15 mol)	% ³⁹ Ar released	⁴⁰ Ar* %	$\frac{{}^{40}\text{Ar}^*}{{}^{39}\text{Ar}_k}$	AGE ± 1 s. d. (Ma)
Sample: LT-B-3AC (SHI-2008-71) W = 54.65mg; J = 0.001111	500	110.8	3.798	192.6	36.6	6.84	48.9	58.34	105.7 ± 3.4
	600	64.84	3.595	23.82	38.6	14.1	89.6	58.24	113.1 ± 2.0
	700	62.07	2.217	14.37	62.6	25.8	93.4	58.10	112.8 ± 1.8
	750	60.79	2.174	6.198	63.9	37.7	97.3	59.22	115.0 ± 1.7
	800	60.32	1.297	7.096	107	57.8	96.7	58.38	113.4 ± 1.6
	900	60.76	1.111	9.507	125	81.1	95.5	58.08	112.8 ± 1.6
	1000	65.39	2.453	23.82	56.6	91.7	89.5	58.65	113.9 ± 1.9
	1100	80.91	6.171	81.06	22.5	95.9	71.0	57.71	112.1 ± 2.8
	1250	93.24	7.934	132.6	17.5	99.2	58.7	55.03	107.1 ± 3.4
	1320	127.6	33.02	268.3	4.20	100	40.0	52.34	102.0 ± 9.8
Sample: LT-B-3BC (SHI-2008-70) W = 57.70mg; J = 0.001117	500	9797	52.86	31219	2.43	11.3	5.89	599.7	925.0 ± 264
	600	849.5	53.13	2566	2.32	22.2	11.3	99.42	190.0 ± 42.8
	700	342.7	68.50	939.7	1.87	30.9	20.6	74.34	143.9 ± 27.4
	800	238.7	55.69	566.0	2.30	41.7	31.8	79.21	153.0 ± 19.7
	900	194.6	57.20	479.6	2.24	52.1	29.6	60.07	117.2 ± 18.6
	1000	191.6	67.20	492.3	1.91	61.0	27.0	54.31	106.3 ± 21.4
	1100	179.4	60.04	434.2	2.14	71.0	31.2	58.55	114.3 ± 19.1
	1250	233.7	43.00	544.3	2.98	85.0	32.7	78.81	152.2 ± 15.4
1320	254.5	39.80	573.2	3.22	100	34.7	91.05	174.7 ± 15.0	

注: *⁴⁰Ar表示放射性成因同位素值, 1σ为一倍标准偏差, 同位素测定仪器: MM1200 质谱计; 测试单位: 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

表3 营城组三段火山岩常量(wt%)、微量和稀土元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 3 Major elements(wt%), rare earth and trace elements(×10⁻⁶) analyses of the volcanic rocks from K₁y³

样品号	PSC-CN-24	PSC-CN-23	PSC-Ys9-JL	PSC-Ys9-YZ	LT-B-3BC	LT-B-3AC	PSC-CN-22	PSC-CN-21	PSC-CN-20	PSC-CN-19
SiO ₂	72.81	74.07	71.60	95.47	93.24	66.99	51.72	52.22	51.92	53.77
TiO ₂	0.21	0.25	0.26	0.02	0.05	0.32	2.35	2.06	1.92	1.98
Al ₂ O ₃	12.40	12.31	14.63	1.37	1.79	16.56	18.33	18.37	16.66	17.97
Fe ₂ O ₃	1.86	0.79	1.95	0.71	3.11	2.69	9.63	6.63	6.91	5.71
FeO	0.41	1.60	0.05	0.09	0.10	0.22	0.58	1.93	3.20	2.58
MnO	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.03	0.17	0.16	0.12	0.13
MgO	2.38	0.57	0.07	0.09	0.02	1.40	1.66	3.30	3.12	2.90
CaO	0.48	0.47	0.80	0.17	0.11	0.87	5.22	6.67	7.01	7.12
Na ₂ O	4.31	4.07	4.59	0.22	0.63	4.76	4.59	4.43	4.24	4.17
K ₂ O	4.74	4.49	5.28	0.13	0.21	5.23	1.86	1.49	1.58	1.69
P ₂ O ₅	0.04	0.05	0.05	0.01	0.11	0.03	0.51	0.41	0.37	0.39
LOI	0.21	1.09	0.64	1.68	0.57	0.99	3.25	2.07	2.54	1.28
Total	99.89	99.82	99.94	99.97	99.96	100.09	99.87	99.74	99.59	99.69
A/NK	1.01	1.06	1.10	2.72	1.41	1.23	1.92	2.06	1.92	2.07
A/CNK	0.95	0.99	0.99	1.69	1.22	1.10	0.96	0.87	0.78	0.83
SI	17.37	4.95	0.59	7.26	0.61	9.77	9.06	18.56	16.38	17.01
σ	2.75	2.36	3.41	0.002	0.01	4.16	4.77	3.80	3.80	3.19
τ	38.52	32.96	38.62	57.50	22.38	36.73	5.85	6.77	6.47	6.97
Oxo	0.79	0.30	0.96	0.86	0.96	0.91	0.92	0.74	0.65	0.65

续表 3

Continued Table 3

样品号	PSC-CN-24	PSC-CN-23	PSC-Ys9-JL	PSC-Ys9-YZ	LT-B-3BC	LT-B-3AC	PSC-CN-22	PSC-CN-21	PSC-CN-20	PSC-CN-19
MDI	26.15	28.14	28.28	31.70	31.16	25.30	12.22	8.93	8.76	9.59
Mg*	0.67	0.31	0.07	0.18	0.02	0.49	0.24	0.43	0.37	0.40
La	43.03	23.20	23.68	34.48	20.47	34.40	26.64	23.82	38.62	30.46
Ce	76.14	45.81	49.13	73.66	27.48	58.43	55.46	48.37	79.98	58.30
Pr	9.81	5.55	5.02	7.30	4.25	7.12	6.67	5.57	7.02	7.04
Nd	40.27	23.99	20.63	28.68	16.15	25.83	30.30	24.89	30.57	30.56
Sm	7.62	5.02	3.77	5.00	2.62	4.35	6.28	4.95	5.91	5.87
Eu	0.21	0.32	0.54	0.83	0.13	1.32	1.92	1.56	1.77	1.74
Gd	4.89	3.10	2.67	4.27	2.54	3.91	3.98	2.84	3.67	3.68
Tb	0.92	0.62	0.45	0.55	0.42	0.58	0.87	0.69	0.70	0.69
Dy	6.57	4.53	3.01	3.83	2.74	3.25	5.98	3.96	4.79	4.68
Ho	1.53	1.09	0.61	0.76	0.57	0.67	1.14	0.75	0.91	0.89
Er	4.68	3.07	1.74	2.37	1.62	2.02	3.16	1.96	2.52	2.45
Tm	0.71	0.53	0.32	0.38	0.27	0.36	0.48	0.32	0.38	0.37
Yb	4.52	3.19	1.92	2.37	1.60	2.36	2.97	1.80	2.28	2.18
Lu	0.72	0.50	0.30	0.37	0.23	0.36	0.46	0.27	0.35	0.33
ΣREE	202	121	114	165	81	145	146	122	179	149
ΣLREE/ΣHREE	7.21	6.23	9.29	10.01	7.11	9.62	6.58	8.55	10.38	8.66
δEu	0.10	0.25	0.52	0.55	0.15	0.97	1.18	1.28	1.16	1.15
δCe	0.87	0.95	1.06	1.09	0.69	0.87	0.98	0.98	1.14	0.93
(La/Yb) _N	6.43	4.91	8.33	9.83	8.65	9.85	6.06	8.94	11.45	9.44
Sm/Nd	0.19	0.21	0.18	0.17	0.16	0.17	0.21	0.20	0.19	0.19
Li	14.35	22.87	12.56	7.26	68.42	27.77	15.23	16.55	11.72	12.16
Sc	3.27	5.12	5.59	6.13	4.83	11.29	23.93	18.27	19.13	19.63
V	8.33	26.47	11.67	9.01	5.80	14.15	314.03	284.68	284.43	295.93
Cr	67.92	65.78	16.01	3.49	200.05	17.08	26.30	52.49	31.53	24.07
Co	1.19	4.62	1.57	1.47	2.25	7.44	27.21	34.56	35.01	36.47
Ni	1.45	17.88	0.46	0.66	53.22	7.94	12.59	23.67	23.70	23.03
Cu	30.47	12.01	3.09	2.48	280.46	139.36	30.17	27.39	28.13	25.13
Zn	112.37	23.13	23.39	21.51	18.79	75.31	99.47	84.33	240.66	96.39
Rb	115.26	69.12	146.00	188.40	17.16	126.08	18.24	18.52	31.15	31.24
Sr	40.75	79.27	127.31	302.97	22.30	84.30	437.14	520.20	690.07	664.98
Y	42.81	25.98	16.84	23.67	15.84	18.29	30.68	18.29	26.97	27.52
Zr	669.85	641.44	236.71	252.63	80.14	445.20	248.76	185.90	175.67	182.89
Nb	29.61	26.72	14.84	14.02	7.18	18.02	21.85	14.51	14.24	14.69
Cs	2.50	1.78	5.60	5.68	6.32	7.11	0.89	0.69	2.15	1.08
Ba	57.60	218.30	160.90	213.30	100.00	1070.12	617.10	723.90	551.00	479.80
Hf	11.86	11.59	6.38	6.63	2.76	11.21	6.37	4.94	4.56	4.39
Ta	1.80	2.30	1.34	1.30	0.45	2.44	1.66	1.03	1.00	0.98
Tl	0.42	0.48	0.86	1.18	0.47	1.00	0.21	0.17	0.13	0.13
Pb	14.49	12.09	7.61	10.84	8.31	38.01	10.91	10.52	10.25	8.67
Th	3.90	3.53	5.16	7.01	2.11	11.43	3.15	2.19	2.20	1.54
U	1.30	1.45	1.23	1.94	0.71	1.77	0.88	0.66	0.64	0.44
Rb/Sr	2.83	0.87	1.15	0.62	0.77	1.50	0.04	0.04	0.05	0.05

注: LREE = La-Eu; HREE = Gd-Lu; δEu = $Eu_N / [(Sm_N)(Gd_N)]^{1/2}$, δCe = $Ce_N / [(La_N)(Pr_N)]^{1/2}$ (Taylor and McLennan, 1985), N 为球粒陨石标准化值; 固结指数 $SI = MgO \times 100 / (MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O)$; 里特曼指数 $\sigma = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43)\tau = (Al_2O_3 - Na_2O) / TiO_2$ (Rittmann *et al.*, 1973); 氧化度 $Ox^\circ = Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn)$ 摩尔比 (Rittmann *et al.*, 1973); 岩浆分异系数 (MDI = $(SiO_2/3 + K_2O) - (CaO + MgO)$ (Gast, 1964); $Mg^* = MgO / (MgO + FeO + Fe_2O_3)$ 摩尔比 (Hess, 1989)

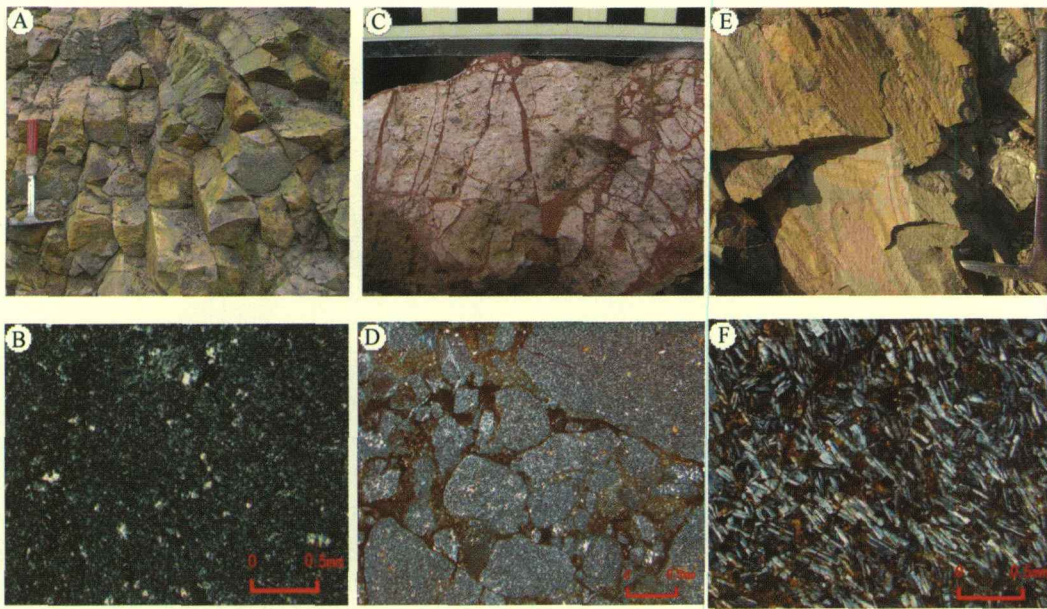


图1 隐爆角砾岩(中)与其上覆柱状节理流纹岩(左)和下伏玄武粗安岩(右)
 上:野外照片;下:对应的薄片显微镜照片,均为正交偏光。A、B-柱状节理流纹岩,多边形,柱体近平卧;内部隐晶-雏晶结构,基质由长英质微晶和玻璃质组成(PSC-CN-24);C、D-浅灰紫色粗面质隐爆角砾岩,隐爆角砾结构,先存粗面岩被炸裂,裂缝充填紫红色含铁酸性岩汁(LT-B-3);E、F-灰黑色致密块状玄武粗安岩,斑状、粗面结构;基质为正长石和斜长石板条,内充填辉石小颗粒(PSC-CN-19)
 Fig. 1 Hydrothermal breccia (middle) and its overlying columnar rhyolite (left) and underlying basaltic trachyandesite (right)

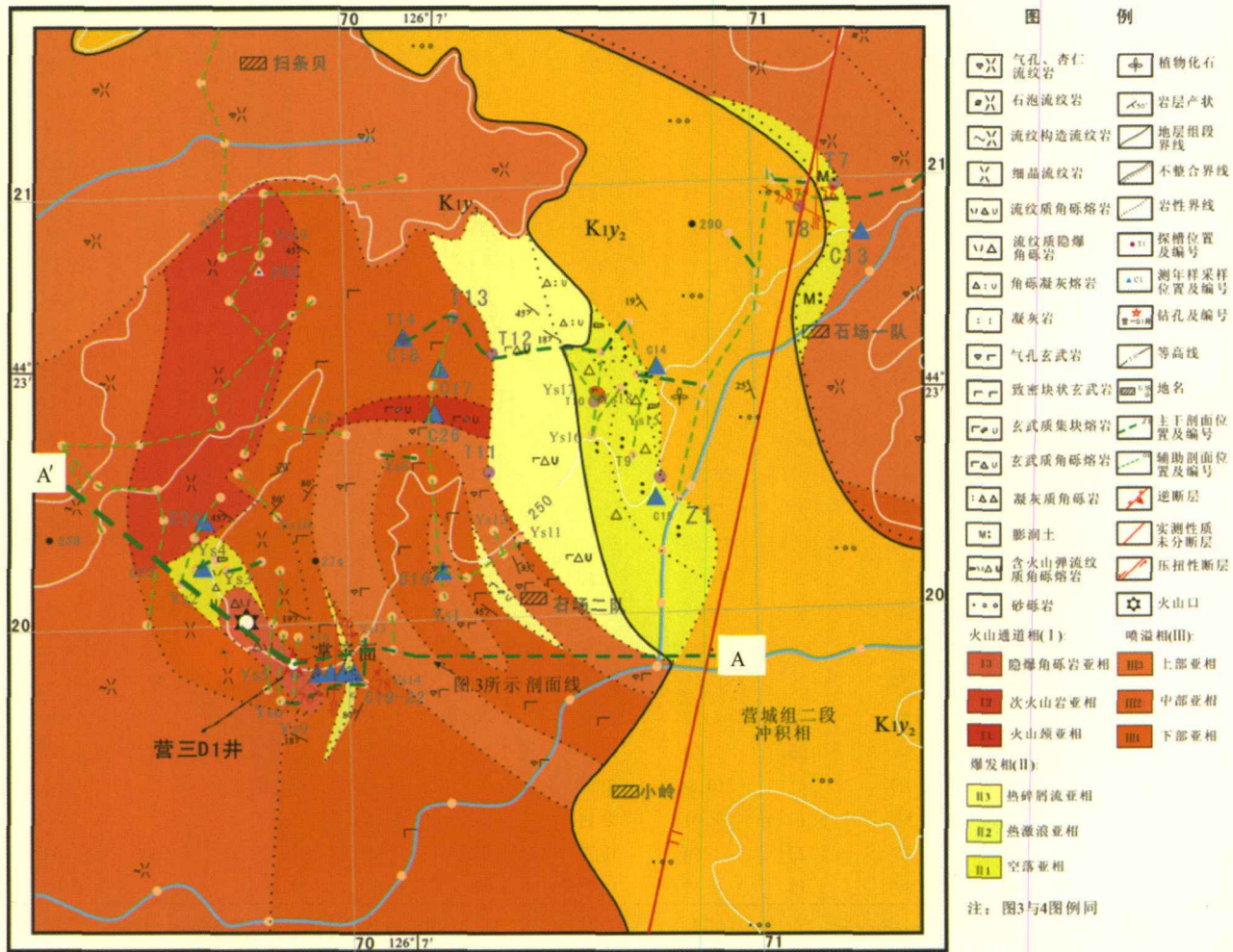


图2 松辽盆地东南隆起区营城组三段岩性岩相平面图
 Fig. 2 Plan view of lithology and facies of the volcanic rocks of the third member of Yingcheng Formation (K_{1y}^3) outcropped in the area of southeast uplift of the Songliao Basin

表4 已知同位素年龄的松辽盆地前营城组三段岩性和时代统计表

Table 4 Isotopic datings available on the pre-K₁y³ rocks of the Songliao Basin

地质时代(Ma)	岩性描述和样品来源	出处和测试方法	
晚志留世:419.1	营三段柱状节理流纹岩中捕获锆石;标准剖面	本文 SHRIMP	
中二叠世:263.1	营三段柱状节理流纹岩中捕获锆石;标准剖面		
营城组一段:121.7	营三段柱状节理流纹岩中捕获锆石;标准剖面		
晚石炭世:305 ± 2	花岗闪长岩;松北(泰来)	吴福元等(2000)	
中侏罗世:165 ± 3	花岗闪长质糜棱岩;松北(肇源)	锆石 U-Pb 年龄	
早元古代:1808 ± 21	变辉长岩;松南(梨树)	裴福萍等(2006) 锆石 U-Pb 年龄	
早元古代:1873 ± 13	变花岗岩(角砾);松南(梨树)		
早二叠世:274 ± 3.4	斜长角闪岩;松南(梨树)		
中二叠世:264 ± 3.2	绿泥片岩;松南(农安)		
中志留世:424 ± 4.5	变流纹质凝灰岩;松南(梨树)		
早二叠世:287 ± 5.1	绢云片岩;松南(梨树)		
志留纪到太古代(10组谱和年龄):427 ± 3.1, 455 ± 12, 696 ± 13, 1384 ± 62, 1649 ± 36, 1778 ± 18, 2450 ± 9, 2579 ± 10, 2793 ± 4 和 2953 ± 14	黑云母阳起石石英片岩;松南(梨树)		
早元古代:1839 ± 7	变闪长岩;松南(十屋)		王颖等(2006);(SHRIMP II)
晚泥盆世:368 ± 7	变安山岩;松南(大安)		王兴光和王颖(2007); (SHRIMP II)
早石炭世:331 ± 8	二长花岗岩;松南(扶余)		
中晚侏罗世:155 ~ 169	早白垩世火山岩中捕获锆石;松南(十屋)	裴福萍等(2008); LA-ICP-MS U-Pb 定年	
印支期(中晚三叠世):218 ~ 236	早白垩世火山岩中捕获锆石;松南(十屋)		
海西期(二叠纪):254, 294	早白垩世火山岩中捕获锆石;松南(十屋)		
加里东期(早泥盆世):413	早白垩世火山岩中捕获锆石;松南(十屋)		
前寒武纪(早元古代):1823 和 2542	早白垩世火山岩中捕获锆石;松南(十屋)		
早元古代:1848 ± 34	早白垩世火山岩中捕获锆石;松北(徐家围子)		章凤奇等(2008); SHRIMP
早-中元古代:1600 ± 29	早白垩世火山岩中捕获锆石;松北(徐家围子)		
中元古代:1293 ± 41	早白垩世火山岩中捕获锆石;松北(徐家围子)		

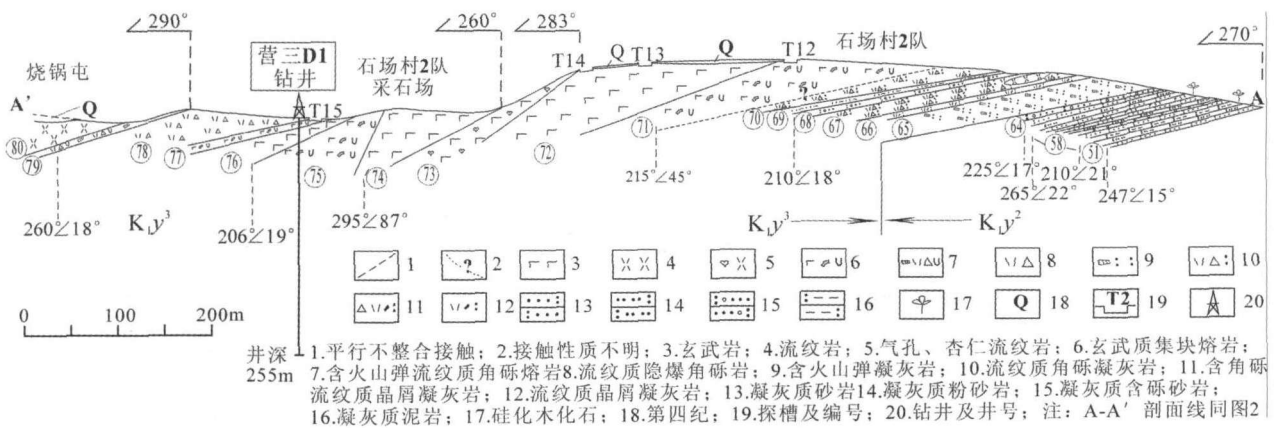


图3 营城组三段实测剖面图(对应图2中A-A')

Fig. 3 Measured section of K₁y³ corresponding to A-A' in Fig. 2

地层系统					层厚 /m	累厚 /m	岩性剖面	样品位置与编号	岩性描述	相	亚相	旋回	期次	冷凝单元
界	系	统	组	段										
中生界	白垩系	K ₁ y	营城组	泉头组					紫红色砂砾岩					
					80	>20		PSC-CN-24	灰紫色柱状节理流纹岩	喷溢相	下部亚相	旋回三 流纹质	期次2	4
					79	13.5		PSC-CN-23	灰紫色含火山弹流纹质凝灰角砾岩		火山颈亚相		期次1	3
					78	36.38		PSC-Ys9-JL PSC-Ys9-YZ	灰紫色流纹质隐爆角砾岩	火山颈亚相	隐爆角砾岩亚相		期次1	2
					77	3		LT-B-3BC LT-B-3AC	灰色粗面质角砾熔岩		火山颈亚相		1	
					76	18		PSC-CN-22	灰色块状玄武粗安岩	喷溢相	下部亚相	旋回二 玄武质	期次3	5
					75	11.07			灰色玄武质集块熔岩	火山颈亚相	火山颈亚相			4
					74	34.67		PSC-CN-21	灰色致密块状玄武粗安岩		下部亚相		期次2	3
					73	8		PSC-CN-20	灰色气孔玄武粗安岩	喷溢相	上部亚相	旋回一 流纹质	期次2	2
					72	54.39		PSC-CN-19	灰绿色块状玄武粗安岩		下部亚相		期次1	1
					71	60.79			灰绿色玄武质集块熔岩	火山颈亚相	火山颈亚相		期次1	1
					70	13			灰色流纹质角砾凝灰岩 夹透镜状流纹岩	爆发相	热基浪亚相	旋回一 流纹质	期次2	3
					68-69	4.3			灰白色泥质粉砂岩 黄绿色凝灰质含砂砾岩	火山颈亚相	含外碎屑火山碎屑流沉积物		期次2	3
					67	13.1			灰绿色含角砾流纹质凝灰岩	爆发相	热基浪亚相		期次1	2
					66	4.3			浅灰绿色流纹质晶屑凝灰岩	爆发相	热基浪亚相		期次1	2
	65	20.5			灰绿含火山弹晶屑凝灰岩	爆发相	空落亚相	期次1	1					

图4 营城组三段实测剖面岩性岩相柱状图和采样位置,显示其酸性-基性-酸性双峰式序列特点

Fig. 4 Stratigraphic column corresponding to figure 3, showing bimodal succession and sampling

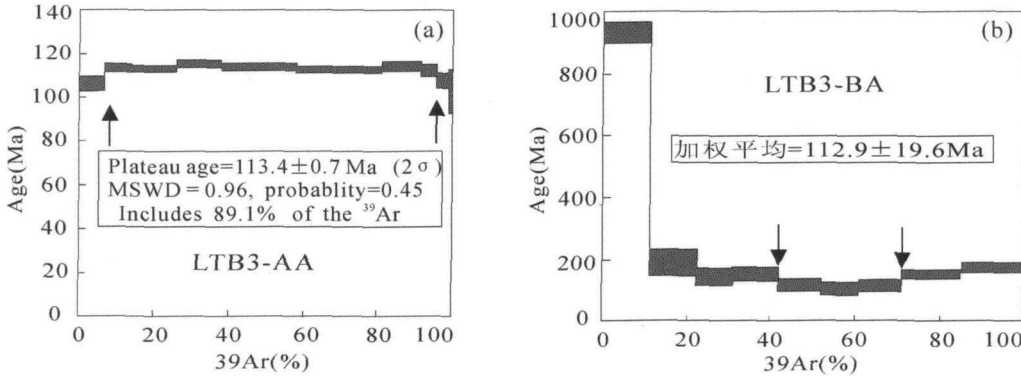


图5 营三段宿主火山岩(a)和灌入岩汁(b)的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄谱

Fig. 5 ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum of the in-situ basaltic trachyandesite (a) and hydrothermal deposits (b) of K₁y³

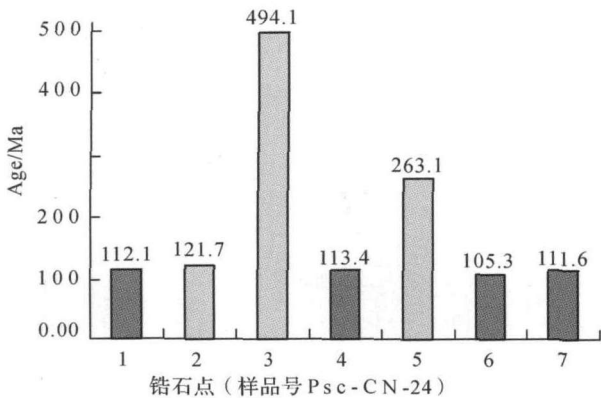


图6 隐爆角砾岩之上柱状节理流纹岩的锆石 U-Pb 年龄分布直方图

Fig. 6 SHRIMP age histogram of the columnar rhyolite overlying the hydrothermao breccia

实验室完成)。隐爆角砾岩中原岩的高精度 Ar-Ar 坪年龄为 113.4 ± 0.7Ma (图 5a)。岩汁的 Ar/Ar 年龄谱(图 5b)属于典型的低钾组分给出的马鞍形 Ar-Ar 分步加热谱,其中间部位的低年龄接近样品真实年龄(Kelley, 2002)。该年龄谱中于 900℃、1000℃和 1100℃三个温度阶段给出 3 个和谐连续谱,代表 30%的³⁹Ar 释放量,其坪年龄为 112.9 ± 19.6Ma(被认为是岩汁固结时代)。隐爆角砾岩上覆的柱状节理流纹岩锆石 SHRIMP 年龄中的 121.7Ma 可解释成捕获的下覆营城组一段的锆石年龄,将 263.1Ma 和 494.1Ma 解释成捕获的基底锆石年龄,将 113.4Ma 到 105.3Ma 的 4 个年龄解释为流纹岩岩浆冷却时代,取其平均值得该流纹岩的参考年龄为 110.6Ma。

6 宿主火山岩(原岩)和灌入“岩汁”的地球化学

6.1 常量元素

对隐爆角砾岩及其上覆和下伏3个层位的共10个相关样品进行常量、微量和稀土元素分析(表3)。分别采集和分析隐爆角砾岩之下玄武安山岩4个,流纹质和粗面质隐爆角砾岩和对应的岩汁各一对共4个样品,和隐爆角砾岩之上的流纹质火山角砾岩(火山弹)和柱状节理流纹岩各1个共2个样品。

营城组三段隐爆角砾岩之下的玄武粗安岩为偏碱性(碱性-亚碱性分界线处偏碱性一侧)、准铝质、中高钾,介于钙碱性与拉班系列之间,在Gottini-Rittmann构造背景判别图解中落于A、B、C三区之间,主要显示火山弧或活动陆缘岩浆特点,在碱度-氧化度 Ox° 图上表现出自下而上氧化度规律性增加的特点(图7a-f)。

营三段隐爆角砾岩中的岩汁为富高价铁的类型岩(图7a、d和f)。其原岩有粗面岩和流纹岩两种,均为碱性、高钾、过铝质,其中流纹岩见明显蚀变(图7b中 $A/CNK > 1.4$);构造背景图解显示火山弧或活动陆缘特点;与日本岛弧及夏威夷火山岩相比为高氧化度(图7a-f)。

营三段隐爆角砾岩之上的流纹岩为亚碱性、准铝质,高钾、钙碱性系列火山岩,构造背景图解亦显示火山弧或活动陆缘特点;其中的火山弹流纹岩为低氧化度($Ox^{\circ} = 0.3$),柱状节理流纹岩为高氧化度($Ox^{\circ} = 0.79$)(图7a-f)。

6.2 稀土和微量元素

隐爆角砾岩的原岩与岩汁及其下伏玄武粗安岩和上覆流纹岩的稀土和微量元素的特点是:(1)稀土总量中-高($\sum REE = 81 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$),为球粒陨石稀土总量(3.8908×10^{-6} , Taylor and McLennan, 1985)的21~52倍;(2)轻重稀土分异明显($\sum LREE/\sum HREE = 6.23 \sim 10.38$, $(La/Yb)_N = 4.91 \sim 11.45$),在球粒陨石标准化REE配分曲线上表现为HREE高斜率和LREE平缓;(3)MORB标准化蛛网图显示,P和部分不相容元素(Cs、Th、La和Zr)相对富集,而另一部分不相容元素(Sr和Pb)相对亏损。

隐爆角砾岩的原岩与岩汁及其下伏玄武粗安岩和上覆流纹岩,三个层位4种岩石样品的稀土和微量元素的主要差别在于:(1)铕表现为两种情况,下伏玄武粗安岩和隐爆角砾岩中的粗面岩角砾(原岩1)具Eu正异常($\delta Eu = 1.32 \sim 1.92$),隐爆角砾岩中的流纹岩角砾(原岩2)和岩汁及其上覆的流纹岩具Eu负异常($\delta Eu = 0.13 \sim 0.83$);(2)钡与钡很相似也表现为两种情况,下伏玄武粗安岩(4个样品)和隐爆角砾岩中的粗面岩角砾(原岩1)具Ba正异常,其它5个样品具Ba负异常;(3)只有2个岩汁样品显示K负异常,其它8个岩石样品均为K正异常;(4)下伏玄武粗安岩(4个样

品)显弱的Ti正异常,而其它6个样品为Ti负异常,其中的2个岩汁样品Ti负异常最强。

7 讨论与结论

7.1 火山期后热液活动与古火山通道的关系

作者对松辽盆地东南隆起区代表性剖面的大比例尺岩性岩相填图揭示^①,研究区火山期后热液活动所产生的隐爆角砾岩化现象主要见于古火山口附近,可见分布直径通常500~1000m左右,面积一般不超过1~2km²。本文研究区的岩性岩相图(图2)显示,古火山口在现今地形上处于山与谷交汇部位靠山一侧(或称之为次级高部位),岩相上表现为与近火山口各类岩相的密切共生,包括火山通道相的火山颈亚相(堆砌结构火山碎屑岩)和次火山岩亚相(柱状节理流纹岩)、爆发相空落亚相(火山弹)及侵出相(珍珠岩)。在距研究区北北东方向5km的上河湾黄土埃子采石场,可见揭示非常好的营城组三段隐爆角砾岩发育区,其分布和岩性、岩相组合特征与本文研究区的十分相似,此外,那里还发育数条北东向辉绿岩脉(郑常青等,2007)。由此可见,作为构造薄弱带的古火山通道不仅是后期热液活动的重要通道,也是后期岩浆侵位的易发生地带。

7.2 火山期后热液的性质和来源

岩浆期后热液活动的地质记录是充填于隐爆角砾岩的角砾之间和裂隙中的“岩汁”,即,热液流体的沉淀物(Audétat et al., 2008),其中包含自身的挥发份组分和从围岩中淬取的矿物质。隐爆角砾岩化作用本身也是高压热流体活动的直接证据。本研究实例中岩汁在手标本上表现为树枝状、细脉状、不规则炸裂纹状充填的红色隐晶长英质凝析物,岩汁与原岩炸碎而成的不同粒度的原地角砾混合在一起,二者之间界线截然(图1C)。岩汁在显微薄片下表现为富含微晶的隐晶质长英质集合体(图1D)。岩汁的常量组分主要是SiO₂(93.24%和95.47%)、Al₂O₃(1.79%和1.37%)、Fe₂O₃(3.11%和0.71%)、Na₂O(0.63%和0.22%)、K₂O(0.21%和0.13%)和灼减(0.57%和1.68%),其它组分均<0.20%。因此可以认为热液组分是富含高价铁和挥发份的硅酸盐质流体。从Na₂O/K₂O较高(3和1.7)推测流体是较深源的;从Fe₂O₃/FeO特高(31.1和7.9)推测其挥发份是富氧的;其隐晶质结构说明流体是快速运移(低粘度)、快速沉淀的,且后期没有经历明显的重结晶作用。岩汁的稀土和微量元素特点与其上覆流纹岩的显著相关,都表现为强的负Eu异常和负Ti异常(图8),都具有高Rb/Sr比(表3),暗示二者来源和成因的显著亲缘性。

^① 王璞珺,刘万洙,郑常青,单玄龙,程日辉,孙晓猛等. 2007. 营城组火山岩野外露头岩石分析及地质大剖面建立. 中石油大庆油田研究院科研项目报告和图册

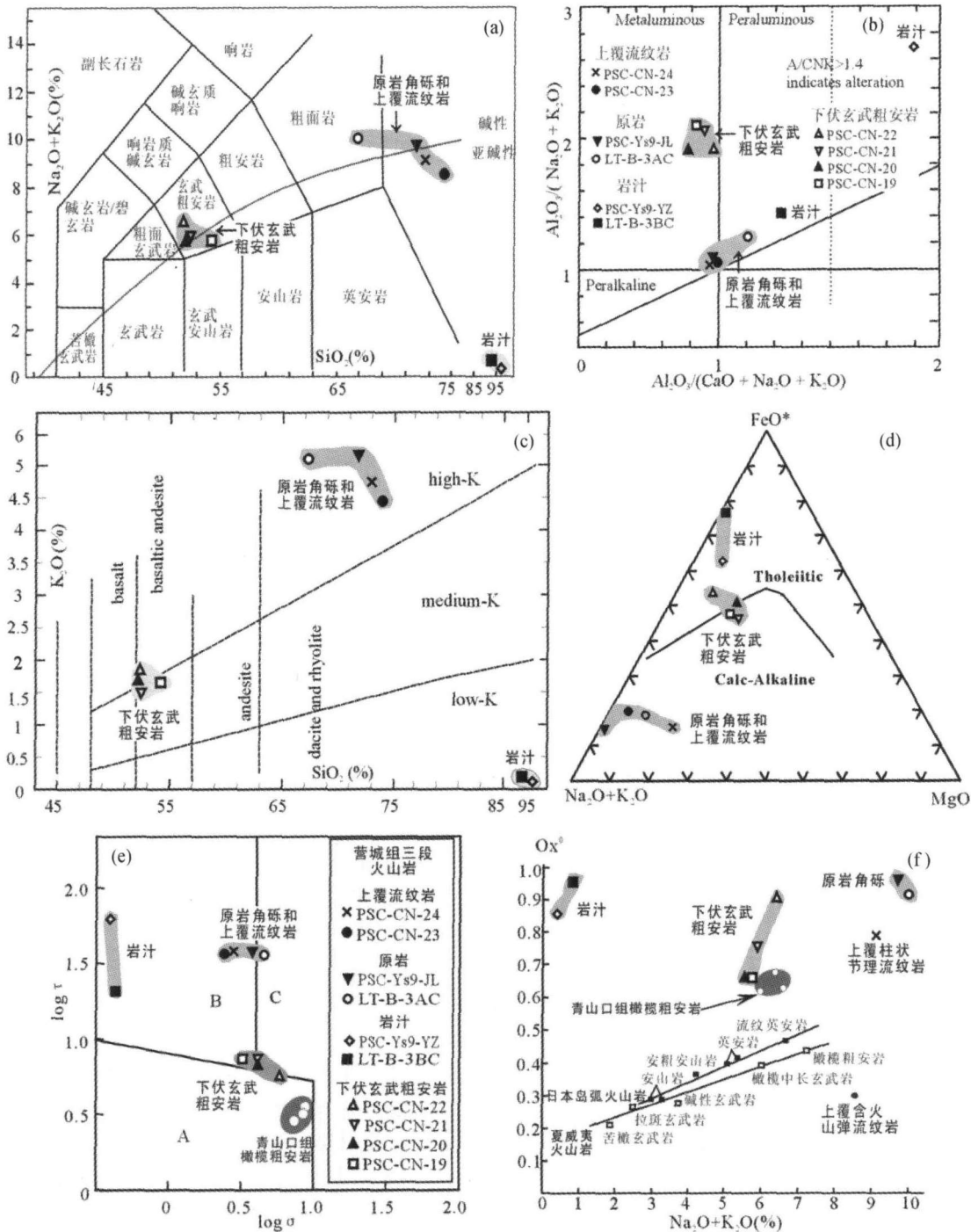


图7 营城组三段火山岩常量元素地球化学特征及其对比

(a)-营城组三段双峰式火山岩 TAS 图解(据 Le Maitre, 1989); (b)-Shand's 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989); (c)- K_2O - SiO_2 图解(据 Le Maitre *et al.*, 1989); (d)-AFM 图解(据 Irvine and Baragar, 1971); (e)-Gottini-Rittmann 图解(据 Rittmann *et al.*, 1973), 图中 a 区代表非造山带地区火山熔岩, b 区为造山带和岛弧的火山熔岩, c 区代表 a 区和 b 区两种情况下的碱性派生熔岩; (f) 氧化度 Oxo° ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 图解(据 Rittmann *et al.*, 1973)。青山口组橄辉粗安岩据王璞珺等(2009)

Fig. 7 Major element features of the volcanic rocks from $\text{K}_1\gamma^3$ and samples from Hawaii, Japan and Cانيacic mugearite of the Songliao Basin are also shown as reference

(a)-TAS diagram of the bimodal volcanic rocks from the third member of Yingcheng Formation (after Le Maitre, 1989); (b)-Shand's index of the volcanic rocks (after Maniar and Piccoli, 1989); (c)-series classification of the volcanic rocks (after Le Maitre *et al.*, 1989); (d)-AFM plot of the volcanic rocks ($A = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; $F = \text{FeO} + 0.8998\text{Fe}_2\text{O}_3$; $M = \text{MgO}$) (after Irvine and Baragar, 1971); (e)-Gottini-Rittmann diagram (after Rittmann *et al.*, 1973), in field A are falling only lavas of volcanoes situated in non-orogenic regions, in field B those of volcanoes in orogenic belts and island arcs, in field C enter the alkaline derivatives of both; (f)-Degree of oxidation as a function of the alkali content in lavas from $\text{K}_1\gamma^3$, Japanese island and Hawaii (after Rittmann *et al.*, 1973). Open dots in shade from Wang *et al.* (2009)

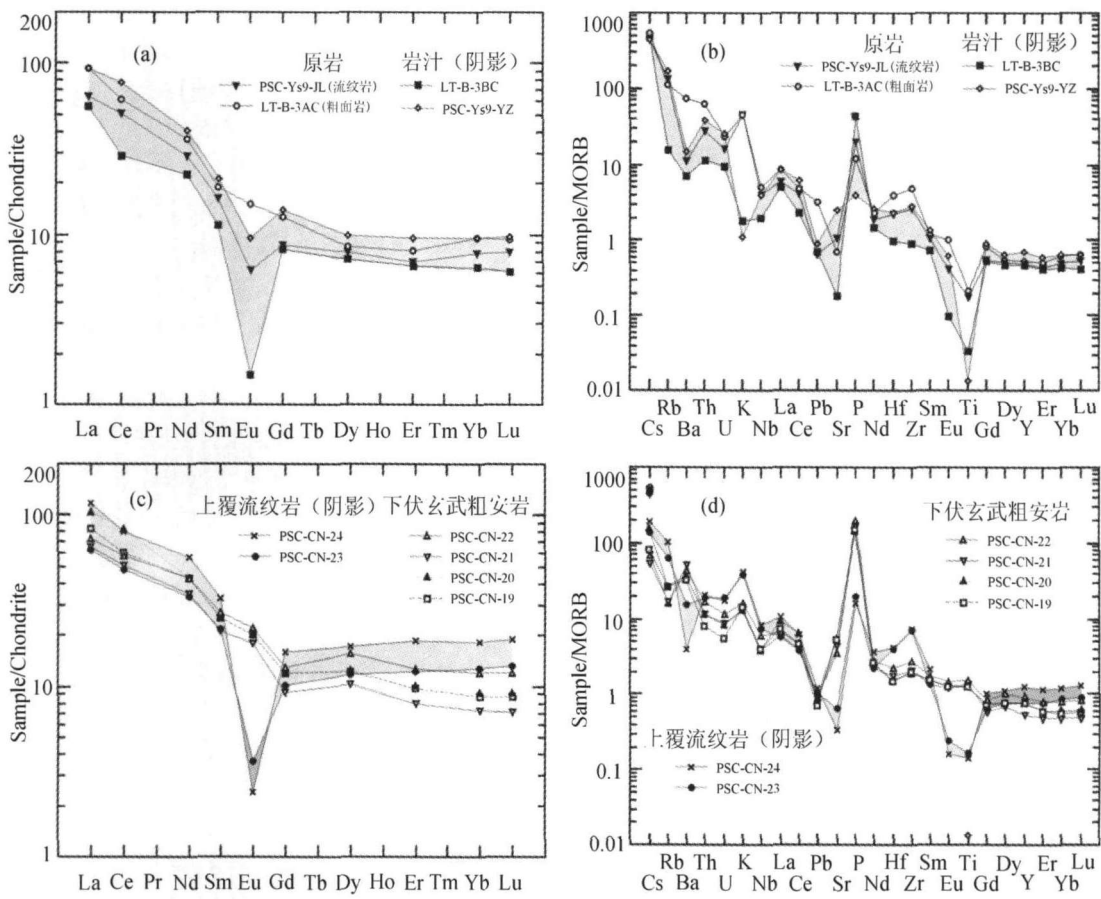


图8 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a和c, 据 Taylor and McLennan, 1985); MORB 标准化微量元素蛛网图(b和d, 据 Pearce, 1982)

Fig. 8 Chondrite normalized REE patterns (a and c, after Taylor and McLennan, 1985) and MORB-normalized trace element spider patterns (b and d, after Pearce, 1982) of the volcanic rocks from K_1y^3

基于上述结构构造和成分特点笔者认为,该岩浆期后热液活动是深源富氧富挥发份热流体在向上运输过程中萃取壳源物并沿古火山通道(构造薄弱带)运移到近地表的,高压是其主要特征,在隐爆角砾岩化过程中流体是快速运移和快速沉积于裂隙中的。

7.3 宿主火山岩与火山期后热液活动的时代关系

隐爆角砾岩中的岩汁(裂隙充填物)是由含有大量微晶($<0.05\text{mm}$)的隐晶质集合体构成的(图1D), K_2O 含量较低(0.21%), $Ar-Ar$ 年龄测定误差较大(表2下)。尽管如此,在其分步加热的年龄谱上还是给出了三段、 ^{39}Ar 累计释放量达30%的和谐坪年龄。我们认为该坪年龄($112.9 \pm 19.6\text{Ma}$)可以近似代表岩汁的冷凝时间,即,隐爆角砾岩化或火山期后热液活动的时代。隐爆角砾岩的原岩(粗面岩角砾)在分步加热 $Ar-Ar$ 年龄分析中给出 ^{39}Ar 累计释放量高达89.1%的高精度和谐坪年龄($113.4 \pm 0.7\text{Ma}$),这是较为确定的粗面质火山作用或粗面岩原岩的冷结晶年龄。考虑到营城组一段火山岩的时代在120Ma上下比较集中(贾军涛

等,2008);同时钻井中已经揭示,营城组火山岩之下的基底地层中见有早中生代、古生代及前寒武纪岩石,它们中的锆石可能被包括营三段在内的后续岩浆活动所捕获(综合说明见表4)。因此,作者将上覆柱状节理流纹岩的锆石 SHRIMP 年龄中(图6)大于120Ma 的年龄解释为捕获锆石,将年龄小于120Ma 的4颗锆石年龄解释为流纹岩形成年龄,并取其算术平均值。这样,从隐爆角砾岩的原岩到岩汁、再到上覆流纹岩的时代顺序似乎应大致为 $113.4\text{Ma} \rightarrow 112.9\text{Ma} \rightarrow 110.6\text{Ma}$ 。但考虑到岩汁的 Ar/Ar 年龄测定误差较大,并注意到其 Ar/Ar 年龄谱中的最小年龄($106.3 \pm 21.4\text{Ma}$)与其上覆柱状节理流纹岩的锆石 SHRIMP 最小年龄(105.3Ma)很接近。作者因此认为,该岩浆期后热液活动的时间可能更接近于其后的流纹质岩浆活动的时间,即,柱状节理流纹岩的形成时代。

7.4 岩浆期后热液与火山活动的成因联系

分步加热的马鞍形 Ar/Ar 年龄谱显示(图5b),岩浆期后热液流体的结晶析出物(岩汁)中存在过剩 Ar (excess argon),通常认为这类过剩氩是各种包裹体所致(Kelley,

2002)。结合其显微镜下特点作者将其解释为流体向上运移过程中带入的下伏各期地层中的微晶质混入物。与此同时, 隐爆角砾岩之上的柱状节理流纹岩的锆石 SHRIMP 年龄揭示, 该流纹岩中也含有从营一段到早古生代各时代的早期捕获锆石。近年随着勘探和研究的不断深入, 钻井样品已经揭示, 松辽盆地基底岩石类型复杂, 包括元古代变闪长岩、古生代变质岩和变火成岩; 中生代火山岩中常见从早元古代到中生代的各个时期捕获锆石(表4)。这说明, 无论是火山活动还是火山期后的热液活动, 在成分上对先期物质都存在不同程度的继承性。

另一方面, 从前面的讨论(7.2节和7.3节)可知, 该岩浆期后热液析出物(岩汁)无论从常量、微量和稀土元素特征, 还是地质时代上, 都与其上覆流纹岩更具亲缘性, 说明二者在来源和成因上的显著相关性, 暗示该火山期后热液活动可能就是后续流纹质火山作用的前驱。由此提示, 如长白山这样的现代火山其目前的热液活动性质对将来的可能喷发作用的类型和特征及其灾害应具有某种指示意义。

7.5 岩浆期后热液活动与火山岩成储、成藏的关系

火山口-近火山口地带通常是火山机构中岩性和岩相复杂多变的部位(如, 王璞珺等, 2007), 也是储层非均质性更强的部位。这些本来是对储层的不利因素。然而, 勘探实践证明古火山口附近是火山岩气藏的最有利探区之一, 那里不仅有较好的孔隙度, 而且渗透率尤其是垂直渗透率几乎是所有相带中最高的^①。这说明某种后期改造作用改善了该区的成储条件(Sruoga and Rubinstein, 2007)。本文研究表明, 古火山口附近是构造薄弱带, 也是后期流体和岩浆作用多发地带。火山期后的高压热液流体导致围岩炸裂、发生角砾岩化、形成大量角砾间孔和裂缝。由于这种炸裂-充填作用是短期完成的, 所以通常是不完全或不充分的充填, 即, 炸裂-充填作用的综合结果会使得储集空间增加、改善储层。这是造成火山口-近火山口相带成为优质储层的重要因素。

松辽盆地断陷期火山活动伴随着大量深源天然气产生, 包括深源稀有气体(Xu *et al.*, 1995)、CO₂(Dai *et al.*, 1996)和烃类气体(Guo *et al.*, 1997), 它们对天然气成藏具有一定贡献(Wang *et al.*, 2007a)。本区营城组火山岩中天然气的主要充注期是泉头组沉积末期到青山口组中晚期(丁日新等, 2007; 纪学雁等, 2007), 对应的地质时代大致为95~88Ma(Wang *et al.*, 2007b)。本文研究的火山期后热液导致的隐爆角砾岩化和改善成储条件的时间是112.9±19.6Ma。这就意味着, 其储层建造和改善作用早于烃类运移, 因此可构成有利于成藏的时空配置。但与该期热液活动相伴生的可能深源天然气早于上覆圈闭的形成, 因此对成藏不会有贡献。

7.6 关于营城组三段双峰式火山岩的构造意义

双峰式火山岩是指在以SiO₂或岩浆分异系数(DMI)为

横坐标的频率分布图上, 表现为两个峰值的样品分布状态(地球科学大辞典, 2006)。本区营城组三段自下而上由流纹质(55m)-玄武质(187m)-流纹质(73m)三个火山岩旋回组成, 厚度比为1:3.4:1.3, 总厚度315m; 纵向厚度和平面分布均是以玄武岩为主的双峰式(图2、3和4)。本文所测定的10个样品亦表现出明显双峰式火山岩特点。表3中岩浆分异系数(DMI)分为两群, 下伏玄武粗安岩 DMI = 12.22~8.76, 隐爆角砾岩及其上覆流纹岩 DMI = 25.30~31.70, 缺少中间过渡组分。常量元素地球化学特征也反映出双峰是火山岩特点(图7)。

就整个松辽盆地充填序列而言(火石岭组、沙河子组、营城组), 营三段可以认为是以玄武岩为主的典型双峰式火山岩首次出现期(参见 Wang *et al.*, 2002a, b; 贾军涛等, 2008)。营三段也是断陷充填末期, 经过其顶部的区域性不整合(T₄反射层)之后盆地进入整体拗陷充填阶段(登娄库组及其以上层序)。即, 营三段是盆地充填的预转型期。尽管不同地区和时代的双峰式火山岩的表现形式各有不同, 但通常被认为是大陆裂谷火山作用的主要证据之一(如, Boccaletti *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2003)。Trua *et al.* (2003)总结东非裂谷双峰火山岩的元素地化特征为轻稀土富集($(La/Yb)_N < 14$)、且富集程度随SiO₂含量增加而降低(当SiO₂ > 68%尤为如此); Sr和Ti通常为负异常; 长英质岩石具强的负Eu异常, 铁镁质岩石为正Ba异常。将研究区营三段双峰式火山岩地化特征(第6节)与上述东非裂谷 Main Ethiopian Rift 火山岩对比, 可见二者在主要的元素地化特征方面具有显著可比性。综合考虑营三段在盆地充填中的位置、火山岩地层序列和地球化学特征, 笔者将营三段双峰式火山岩解释为大陆裂谷初期的火山作用产物, 它在松辽盆地演化过程中, 处于此前的活动大陆边缘火山作用(营城组一段及之前, Wang *et al.*, 2006)与此后的裂谷深切割火山作用(青山口组, 王璞珺等, 2009)的过渡阶段。

致谢 本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和2009年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持。李全林参加了样品分离和前处理工作, 张斌、李金龙、贾军涛、侯景涛、吴颜雄、李喆、许中杰、张建光、王虎参加了野外工作。

References

- Audétat A, Pettke T, Heinrich CA and Bodnar RJ. 2008. The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5): 877-908

^① 王璞珺, 唐华风, 边伟华, 孙晓猛, 刘万洙等. 2008. 松辽盆地南部长岭、十屋断陷火山岩储层评价及勘探目标优选. 中石化勘探先导项目专题研究报告和图册

- Boccaletti M, Mazzuoli R, Bonini M, Trua T and Abebe B. 1999. Plio-Quaternary volcanotectonic activity in the northern sector of the Main Ethiopian Rift: Relationships with oblique rifting. *African Earth Sciences*, 29(4): 679-698
- Dai JX, Song Y, Dai CS and Wang DR. 1996. Geochemistry and accumulation of carbon dioxide gases in China. *AAPG Bulletin*, 80(10):1615-1626
- Ding RX, Shu P, Ji XY, Qu YM, Cheng RH and Zhang B. 2007. SHRIMP zircon U-Pb age and geological meaning of reservoir volcanic rocks in Qingshen gas field of the Songliao basin, NE China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(3): 525-530 (in Chinese with English abstract)
- Editorial Board of A Dictionary of Earth Geosciences. 2006. *A Dictionary of Earth Geosciences (Foundation Course)*. Beijing: Geological Publishing House, 1-448 (in Chinese)
- Feng ZQ, Wang YH, Lei MS and Feng ZH. 2007. Exploratory techniques and their advancement of deep volcanic gas reservoirs in the Songliao basin. *Natur. Gas Ind.*, 27(8):9-12 (in Chinese with English abstract)
- Gao YF, Liu WZ, Ji XY, Bai XF, Wang PJ, Huang YL, Zheng CQ and Min FQ. 2007. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6):1251-1258 (in Chinese with English abstract)
- Gast PW, Tilton GR and Hedge C. 1964. Isotopic composition of lead and strontium from Ascension and Gough islands. *Science*, 145: 1181-1185
- Guo ZQ, Wang XB and Liu WL. 1997. Reservoir-forming features of abiogenic origin gas in Songliao Basin. *Science in China (Series D)*, 40(6):621-626
- Hess PC. 1989. *Origins of Igneous Rocks*. London, England: Harvard University Press, 117
- Irvine TN, Barager WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548
- Jackson JA. 1997. *Glossary of Geology*. 4th edition. Virginia: American Geological Institute, 311
- Ji XY, Shu P, Qu YM, Ding RX, Guo ZH and Wang PJ. 2007. Fluid inclusion study and its application to tracing gas-trapping history in the Qingshen Gas Field of the Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(4): 739-743 (in Chinese with English abstract)
- Jia JT, Wang PJ and Wan XQ. 2008. Chronostratigraphy of the Yingcheng Formation in the Songliao basin, Cretaceous, NE China. *Geological Review*, 54(4): 439-448 (in Chinese with English abstract)
- Kelley S. 2002. Excess argon in K-Ar and Ar-Ar geochronology. *Chemical Geology*, 188:1-22
- Landtwing MR, Pettke T, Halter WE, Heinrich CA, Redmond PB, Einaudi MT and Kunze K. 2005. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry. *Earth and Planetary Science Letters*, 235:229-243
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre MJ, Lebas MJ, Sabine PA, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Wooley AR and Zanettin B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. London: Blackwell, 28
- Li DM, Li Q and Zheng DW. 2005. Accurate dating and test of K-Ar and Ar-Ar methods. *Seismology and Geology*, 27(4):609-614 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122: 85-109
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101:635-643
- Min FQ, Wang PJ, Yu SQ, Huang YL, Wu YX, Li J and Ren LJ. 2007. Meticulous depiction of lithology, lithofacies and reservoir porosity and permeability in the third and second Member of Yingcheng Formation: Based on Whole Coring Ying-3D1 Well Drilled in the standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1203-1216 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorps RS and Chichester (eds.). *Andesites*. New York: John Wiley & Sons, 525-548
- Pei FP, Xu WL, Yang DB, Zhao QG, L XM and Hu ZC. 2007. Zircon U-Pb geochronology of basement metamorphic rocks in the Songliao Basin. *Chinese Science Bulletin*, 52(7):942-948
- Pei FP, Xu WL, Yang DB, Ji WQ, Yu Y and Zhang XZ. 2008. Mesozoic volcanic rocks in the southern Songliao basin: Zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of basin basement. *Earth Science*, 33(5):603-617 (in Chinese with English abstract)
- Rittmann A, Gottini V, Hewers H and Stengelin R. 1973. *Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks*. Berlin, Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 9-25
- Rusk BG, Reeda MH, Dilles JH, Klemm LM and Heinrich CA. 2004. Compositions of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, MT. *Chemical Geology*, 210:173-199
- Sruoga P and Rubinstein N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina. *AAPG Bulletin*, 91(1):115-129
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London, England: Blackwell Scientific Publications, 298
- Trua T, Deniel C and Mazzuoli R. 1999. Crustal control in the genesis of Plio-Quaternary bimodal magmatism of the Main Ethiopian Rift/MER: Geochemical and isotopic ⁸⁷Sr, ¹⁴³Nd, Pb evidence. *Chemical Geology*, 155: 201-231
- Wang PJ, Liu WZ, Wang SX and Song WH. 2002a. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *International Journal of Earth Sciences*, 91:331-340
- Wang PJ, Ren YG, Shan XL, Sun SB, Wan CB and Bian WH. 2002b. The Cretaceous volcanic succession around the Songliao Basin, NE China: Relationship between volcanism and sedimentation. *Geological Journal*, 37(2): 97-115 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Chi YL, Liu WZ, Cheng RH, Shan XL and Ren YG. 2003. Volcanic facies of the Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4):449-456 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Chen FK, Chen SM, Siebel W and Satir M. 2006. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao basin, NE China. *Geochemical Journal*, 40(2):149-159
- Wang PJ, Hou QJ, Wang KY, Chen SM, Cheng RH, Liu WZ and Li QL. 2007a. Discovery and significance of high CH₄ primary fluid inclusions in reservoir volcanic rocks of the Songliao basin, NE China. *Acta Geologica Sinica*, 81(1):113-120
- Wang PJ, Xie XA, Mattern FRANK, Ren YG, Zhu DF and Sun XM. 2007b. The Cretaceous Songliao Basin: Volcanogenic succession, sedimentary sequence and tectonic evolution, NE China. *Acta Geologica Sinica*, 81(6):801-811
- Wang PJ, Pang YM, Tang HF, Huang YL and Zheng CQ. 2007. The characteristics of the Paleo-volcanic edifice of Yingcheng Formation, Cretaceous, Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1064-1073 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Gao YF, Ren YG, Liu WZ and Zhang JG. 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar age and geochemical features of mugearite from the Qingshankou Formation: Significances for basin formation, hydrocarbon generation and petroleum accumulation of the Songliao basin in Cretaceous. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1178-1190 (in Chinese with English abstract)

- Wang SY. 1989. Sporo-pollen assemblage from Yingcheng Formation in Jilin Province. *Journal of Stratigraphy*, 13(1): 34 - 39 (in Chinese)
- Wang XG and Wang Y. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of igneous rocks from the basement of north belt of the south Songliao basin and its geological significance. *Geological Science and Technology Information*, 26(1): 23 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Zhang FQ, Zhang DW, Miao LC, Li TS, Xie HQ, Meng QR and Liu DY. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of meta-diorite from the basement of the Songliao Basin and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 51(15): 1877 - 1883
- Wu FY, Sun DY, Li HM and Wang XL. 2000. Zircon U-Pb ages of the basement rocks beneath the Songliao basin, NE China. *Chinese Science Bulletin*, 45(16): 1514 - 1518
- Wu YX, Wang PJ, Qu LC, Min FQ, Li Z and Ren LJ. 2007. Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the lower Member of Yingcheng Formation: Based on the latest data of Ying-1D1 Well Cores in standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1192 - 1202 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Nakai S, Wakita H and Wang XB. 1995. Mantle-derived noble gases in natural gases from Songliao basin, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(22): 4675 - 4683
- Zhang FQ, Chen HL, Dong CW, Yu X, Xiao J, Pang YM, Cao RC and Zhu DF. 2008. Evidence for the existence of Precambrian basement under the northern Songliao basin. *Geology in China*, 35(3): 421 - 428 (in Chinese with English abstract)
- Zheng CQ, Xu ZS, Wang PJ, Sun XM and Wang H. 2007. Geological characteristics and hydrocarbon reservoir significance of the diabase prophirite at the Shanghewan area, southeast uplift of the Songliao basin, NE China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1097 - 1103 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 地球科学大辞典编委会. 2006. 地球科学大辞典(基础科学卷). 北京:地质出版社, 1 - 448
- 丁日新,舒萍,纪学雁,曲延明,程日辉,张斌. 2007. 松辽盆地庆深气田储层火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(3): 525 - 530
- 冯志强,王玉华,雷茂盛,冯子辉. 2007. 松辽盆地深层火山岩气藏勘探技术与进展. *天然气工业*, 27(8): 9 - 12
- 高有峰,刘万洙,纪学雁,白雪峰,王璞珺,黄玉龙,郑常青,闵飞琼. 2007. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1251 - 1258
- 纪学雁,舒萍,曲延明,丁日新,郭振华,王璞珺. 2007. 流体包裹体在庆深气田火山岩气藏研究中的应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(4): 739 - 743
- 贾军涛,王璞珺,万晓樵. 2008. 松辽盆地断陷期白垩纪营城组的时代归属. *地质论评*, 54(4): 439 - 448
- 李大明,李齐,郑德文. 2005. K-Ar 和 Ar-Ar 方法的精细测年及其检验. *地震地质*, 27(4): 609 - 614
- 闵飞琼,王璞珺,于世全,黄玉龙,吴颜雄,李喆,任利军. 2007. 营城组三段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营三 D1 井全取心钻孔资料. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1203 - 1216
- 裴福萍,许文良,杨德彬,赵全国,柳小明,胡兆初. 2006. 松辽盆地基底变质岩中锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *科学通报*, 51(24): 2881 - 2887
- 裴福萍,许文良,杨德彬,纪伟强,于洋,张兴洲. 2008. 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. *地球科学*, 33(5): 603 - 617
- 王璞珺,迟元林,刘万洙,程日辉,单玄龙,任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(4): 317 - 325
- 王璞珺,庞颜明,唐华风,黄玉龙,郑常青. 2007. 松辽盆地白垩系营城组古火山机构特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1064 - 1073
- 王璞珺,高有峰,任延广,刘万洙,张建光. 2009. 松辽盆地青山口组橄榄粗安岩: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、地球化学及其成盆、成烃和成藏意义. *岩石学报*, 25(5): 1178 - 1190
- 王淑英. 1989. 吉林省营城组孢粉组合. *地层学杂志*, 13(1): 34 - 39
- 王兴光,王颖. 2007. 松辽盆地南部北带基底岩浆岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质科技情报*, 26(1): 23 - 27
- 王颖,张福勤,张大伟,苗来成,李铁胜,顾强,孟庆任,刘敦一. 2006. 松辽盆地南部变闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 51(15): 1811 - 1816
- 吴福元,孙德有,李惠民,汪筱林. 2000. 松辽盆地基底岩石的 U-Pb 年龄. *科学通报*, 45(6): 656 - 660
- 吴颜雄,王璞珺,曲立才,闵飞琼,李喆,任利军. 2007. 营城组一段及下段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营一 D1 井全取心钻孔资料. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1192 - 1202
- 章凤奇,陈汉林,董传万,余星,肖骏,庞彦明,曹瑞成,朱德丰. 2008. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据. *中国地质*, 35(3): 421 - 428
- 郑常青,徐正顺,王璞珺,孙晓猛,王虎. 2007. 松辽盆地东南隆起区白垩系营城组火山岩中辉绿玢岩脉地质特征及其储层意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(6): 1097 - 1103