

松辽盆地深层碱流岩的确定及其在天然气勘探开发中的意义

童 英^{1,2}, 冯志强², 冯子辉², 洪大卫¹, 焦玉国²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 大庆油田责任有限公司, 黑龙江 大庆 163712)

摘 要: 火山口附近是多种岩性、岩相叠合的地区, 堆积厚度大、储层孔隙度大、储层物性好, 是天然气勘探开发的有利目标区。火山口位置的确定对天然气的勘探开发部署具有特殊意义。利用岩石薄片 X 衍射技术, 在松辽盆地深层富碱酸性火山岩中识别出特征的碱性暗色矿物——钠铁闪石, 从而确定其为碱流岩。碱流岩是富碱岩浆演化晚期的产物, 岩浆喷发到地表时粘度大, 流动性差, 往往堆积在火山口附近。碱流岩可以作为确定火山口存在的重要标志之一, 它的确定对提高深层火山岩天然气勘探开发的效率具有重要的指示意义。

关键词: 松辽盆地, 钠铁闪石, 碱流岩, X 衍射, 天然气勘探开发

中图分类号: P588.14; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)05-0459-06

The confirmation of pantellerite in Songliao Basin and its implications to gas exploration and development

TONG Ying^{1,2}, FENG Zhi-qiang², FENG Zi-hui², HONG Da-wei¹ and JIAO Yu-guo²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China;

2. Daqing Oilfield Company, Daqing 163712, China)

Abstract: Volcanic craters are favorable targets in gas exploration and development, because surrounding these craters there exists the superimposition of various types and facies of volcanic rocks which are characterized by relatively remarkable reservoir thickness, large reservoir porosity and fairly good reservoir properties. The determination of volcanic craters is hence very important in gas exploration and development. Using thin section X-ray diffraction techniques, his paper identified arfvedsonite in volcanic rocks from Songliao Basin, and thus confirmed that the volcanic rocks are composed of pantellerite. As the late evolutionary stage product of alkali-rich magma, pantellerite is always accumulated near the volcanic crater due to its high viscosity and poor mobility. As pantellerite can be used as important evidence for the existence of crater, it has an important significance in improving the efficiency of gas exploration and development in volcanic rock areas.

Key words: Songliao Basin; arfvedsonite; pantellerite; X-ray diffraction; gas exploration and development

近年,松辽盆地的深层火山岩天然气勘探获得重大突破,发现了中国东部最大的气田庆深大气田(冯志强,2006),带动了全国性的火山岩油气勘探突破,使得火山岩成为油气勘探开发的重要新领域

(Feng Zhiqiang, 2008; 邵才能等, 2008)。尽管松辽盆地各种岩性的火山岩都可以成为很好的储层,但是酸性端员的火山岩(流纹岩、流纹质凝灰岩等)往往具有较好的储集性能(王璞珺等, 2008; 冯子辉等,

收稿日期: 2009-07-15; 修订日期: 2009-08-10

基金项目: 国家重大基础科学问题研究项目(2009CB219308)

作者简介: 童 英(1974-),男,助理研究员,主要从事岩浆岩岩石学研究, E-mail: yingtong@cags.net.cn.

2008)。由于火山喷发具多期性、旋回性,火山口附近往往岩性变化大,多种岩相火山岩堆叠在一起,整体孔隙度大,储层厚度大,储层物性好,是天然气勘探的有利区(冯子辉等,2008),因此在火山岩天然气勘探开发过程中,确定火山口位置十分重要。

钠铁闪石作为一种少见的碱性暗色矿物,一般只出现在霞石正长岩和富碱的伟晶岩、花岗岩中,也可作为一种特征矿物出现在富碱酸性火山岩——碱流岩(包括钠闪碱流岩)中(Mahood and Hildreth, 1986; Avanzinelli *et al.*, 2004)。碱流岩是富碱岩浆演化到酸性端员晚期的产物(Nicholls and Carmichael, 1969)。由于岩浆喷发到地表时粘度大,流动性差,往往堆积在火山口附近,因此,碱流岩可以作为确定火山口是否存在的重要标志之一,可以通过碱流岩的分布有效地圈定深层天然气勘探的目标靶区,提高深层火山岩油气勘探开发的效率。但是,由于火山岩结晶程度差,在手标本上和显微镜下钠铁闪石有时不易识别,而在化学成分分类 TAS 图解中没有碱流岩分类位置(多落在粗面岩、流纹岩区)。所以,钠铁闪石的鉴别对于碱流岩的准确定名具有重要意义。本文通过岩石薄片 X 衍射技术在松辽盆地营城组富碱酸性火山岩中识别出钠铁闪石,从而确定该富碱酸性火山岩为碱流岩。

1 区域地质背景

松辽盆地作为中国东北部的一个大型中生代陆相含油气盆地(杨万里等,1982;高瑞琪等,1997;Feng Zhiqiang, 2008),总面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈北东向展布。盆地具有下部断陷、上部拗陷的二元结构(高瑞琪等,1997;刘和甫等,2000)。拗陷期为一套碎屑岩夹泥岩含油地层,断陷期为一套含煤沉积岩和火山岩交互的含气地层,埋深一般大于 3 000 m,包括火石岭组、沙河子组、营城组,分布在徐家围子、古龙、长岭等几十个断陷中。在断陷期形成的营城组中,火山岩普遍发育,具有分布广泛,喷发期次多的特点,是主要的天然气储集岩(蒙启安等,2002;刘万洙等,2003;Li *et al.*, 2006;曲延明等,2007),火山岩厚度为 50~1 000 m,最厚达 2 700 m。岩性以中酸性为主,局部有中基性岩分布,主要岩石类型

为喷溢相的流纹岩、英安岩、粗安岩和流纹质凝灰岩等(郭军等,2000;章凤奇等,2007;冯子辉等,2008)。

2 钠铁闪石的 X 衍射分析

由于火山岩从岩浆喷发到冷凝固晶、固结成岩的时间很短,大部分矿物的结晶程度差,特别是岩浆后期生长的矿物,在薄片鉴定上有时难度很大,尤其对一些疑难矿物,往往需要借助于电子探针、X 衍射分析等技术手段。钠铁闪石是一种少见的矿物,在火山岩中通常结晶较小,加之又比较容易发生溶蚀作用(图 1)①,电子探针测试成分有时也有困难,此时 X 衍射分析则不失为一个好的选择。采用粉末样进行 X 衍射分析虽然较为简单、直接,但针对性差,利用薄片 X 衍射分析则直观得多,尽管会受到薄片厚度及 X 射线损失的影响造成一定的误差,但通过机械补偿和软件校正及在薄片背面加防透射片处理后,强度上虽仍有一定的损失,基本可以消除薄片的影响,与粉末衍射的结果具有很好的一致性(图 2a)。本文薄片 X 衍射实验在大庆油田研究院地质实验室完成,采用日本理学公司生产的 D/MAX-2200X 射线衍射仪,工作环境 40 kV,30 mA,步长 0.02° ,扫描速度 $2^\circ/\text{min}$,采用 JADE5.0 软件分析,数据库采用 pdf2004。在进行薄片 X 衍射分析中,采用普通薄片时,需要在去掉盖玻片后稍稍打磨一下,以去掉粘附

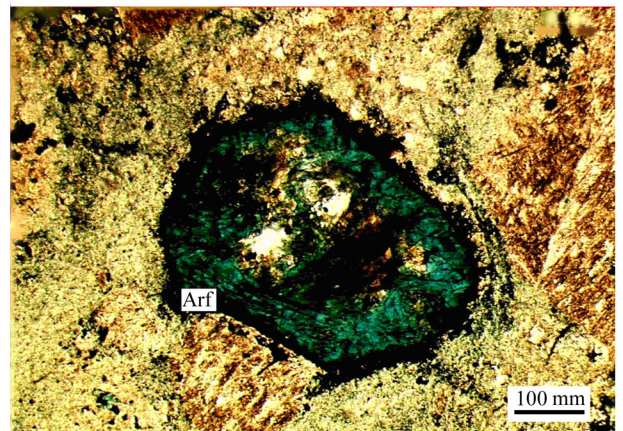


图 1 钠铁闪石溶孔(徐深 6-101 井,单偏光)

Fig. 1 Dissolved pores in arfvedsonite (well Xushen 6-101, plainlight)

① 赵海玲,杨霄,王盘喜,等. 2005. 火山岩储层孔隙特征及演化研究(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院内部研究报告).

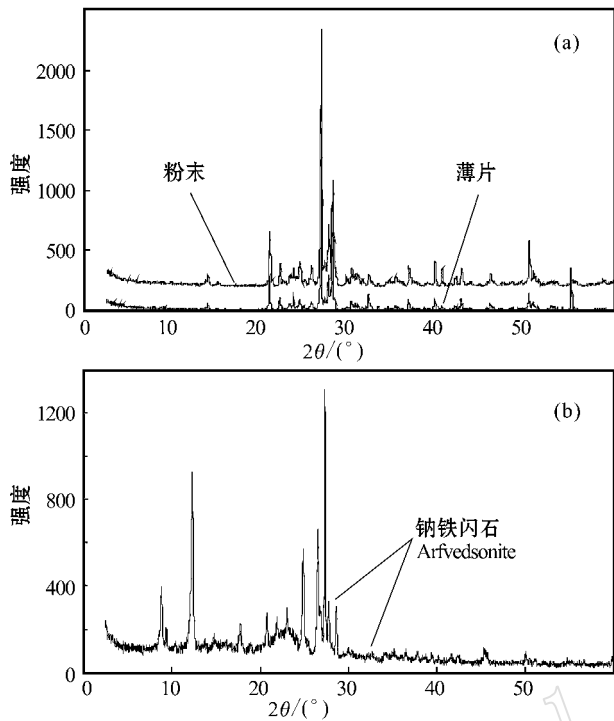


图2 徐深1井火山岩粉末X衍射与薄片X衍射对比图(a)和徐深6井钠铁闪石薄片X衍射图(b)

Fig. 2 Comparative diagram between powder X-ray diffraction and thin section X-ray diffraction of volcanic rock from well Xushen 1 (a); arfvedsonite thin section X-ray diffraction pattern of volcanic rock from well Xushen 6 (b)

物的影响;采用探针片时,仅需要对其表面进行清洁。薄片的透射性好时,则在薄片的背面加上一层防透射片,实际上有时将载玻片打毛一点也可以(针对已进行充分显微观测的薄片)。在进行机械校正时,利用在显微镜下确认的常见矿物来比对进行校正,使检测的峰形与标准峰准确对应,再继续开展测试。

利用上述X衍射技术对徐深6井原定为流纹岩(表1)的富碱酸性火山岩薄片进行分析时,发现了典型的钠铁闪石峰(图2b),从而将该火山岩定名为碱流岩。由于薄片放置位置的限制,有时不能进行全景扫描,加之钠铁闪石在火山岩中的晶体颗粒十分细小,为了避免遗漏矿物,从两个方向进行双向扫描,以获得完整的信息。在对松辽盆地徐家围子断陷40多口井的营城组酸性火山岩(表1,部分薄片有

疑似闪石类矿物存在)开展薄片X衍射技术检测后,目前已在19口井(升深2-6、升深203、升深2-5、升深2-1、升深2-12、徐深6-101、徐深601、徐深603、徐深605、徐深6-2、徐深6-3、徐深6-107、徐深201、徐深9、徐深902、徐深9-1、徐深9-3、徐深9-4、肇深8)的火山岩中发现有钠铁闪石,从而确定这些酸性火山岩为碱流岩。加之前通过电子探针确定存在碱流岩的井(徐深9、徐深601、徐深602、汪深101、升深203、升深202、升深8)^①,总共24口井,除肇深8外,这些含碱流岩的井都沿断裂带分布,多是较好的产气井(图3)。目前勘探开发结果显示,这些井所在地区的火山岩厚度较大,岩性变化多样,岩相复杂,以火山口爆发、喷溢和火山通道相叠合为主,近火山口爆发相和喷溢相叠合次之,大体指示了火山通道的位置(陈建文等,2000)。这些火山岩的孔隙度较大,储集性能较好,蕴藏了大量的天然气,仅徐深6-101、徐深601、徐深603等所在徐深1区块就已提交了超过400亿方的天然气(图3)。显然碱流岩的出现与优势火山岩储层的分布具有很大的关联性,碱流岩的确定对深层火山岩天然气勘探具有重要的指示作用。

3 钠铁闪石的成因及其地质意义

以上分析表明,碱流岩的出现具有明显的指示意义。在21世纪早期人们多认为岩浆岩中出现的碱性暗色矿物是受后期富碱流体交代的产物,但Kovalenko等(1971)在蒙古翁岗-嗨依尔汗钨矿床中发现含碱性暗色矿物(霓石和钠闪石)的次火山岩——翁岗岩(ongonite),证实这些碱性暗色矿物是岩浆期的产物,此后碱性暗色矿物作为碱性岩的特征矿物越来越受到重视。松辽盆地深层火山岩中由于存在大量的钠长石化和菱铁矿化作用,很自然人们将这些火山岩中出现的钠铁闪石解释为富碱流体交代蚀变作用的产物。另外,李茹等(2007)在徐深601井的火山岩砾石中发现有榍石钠铁闪石生长边,也解释为碱交代作用的结果。但是目前未见有关钠铁闪石化次生变化现象的报道,因此这些钠铁闪石的形成还是应该解释为岩浆结晶晚期的产物,是碱流岩的特征矿物。由于碱性岩浆早期贫水,不会晶

① 赵海玲,杨霄,王盘喜,等. 2005. 火山岩储层孔隙特征及演化研究(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院内部研究报告).

表1 松辽盆地深层富碱性火山岩的地球化学分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Chemical composition of alkali-rich acid volcanic rock from Songliao Basin

井名	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	Los	Total	A/CNK	A/NK
徐深 601	76.26	0.16	11.64	1.14	1.01	0.049	0.07	0.14	4.20	4.60	0.03	0.45	0.49	100.24	0.97	0.99
徐深 6	77.33	0.14	8.56	3.56		0.03	0.19	0.36	3.19	4.44	0.02		1.25	99.17	0.81	0.86
升深 202	73.50	0.15	9.45	3.74		0.06	1.34	0.28	4.26	4.61	0.01		1.49	98.90	0.76	0.79
汪深 101	73.68	0.16	9.62	4.49		0.05	1.39	0.20	4.65	3.56	0.01		1.12	98.82	0.82	0.84
徐深 9	72.48	0.16	9.73	3.46		0.10	0.90	1.36	3.87	4.79	0.02		2.20	99.08	0.70	0.85

注 徐深 601 由河北省地矿局廊坊实验室分析, 徐深 6、升深 202、汪深 101 和徐深 9 由大庆油田研究院地质实验室分析。

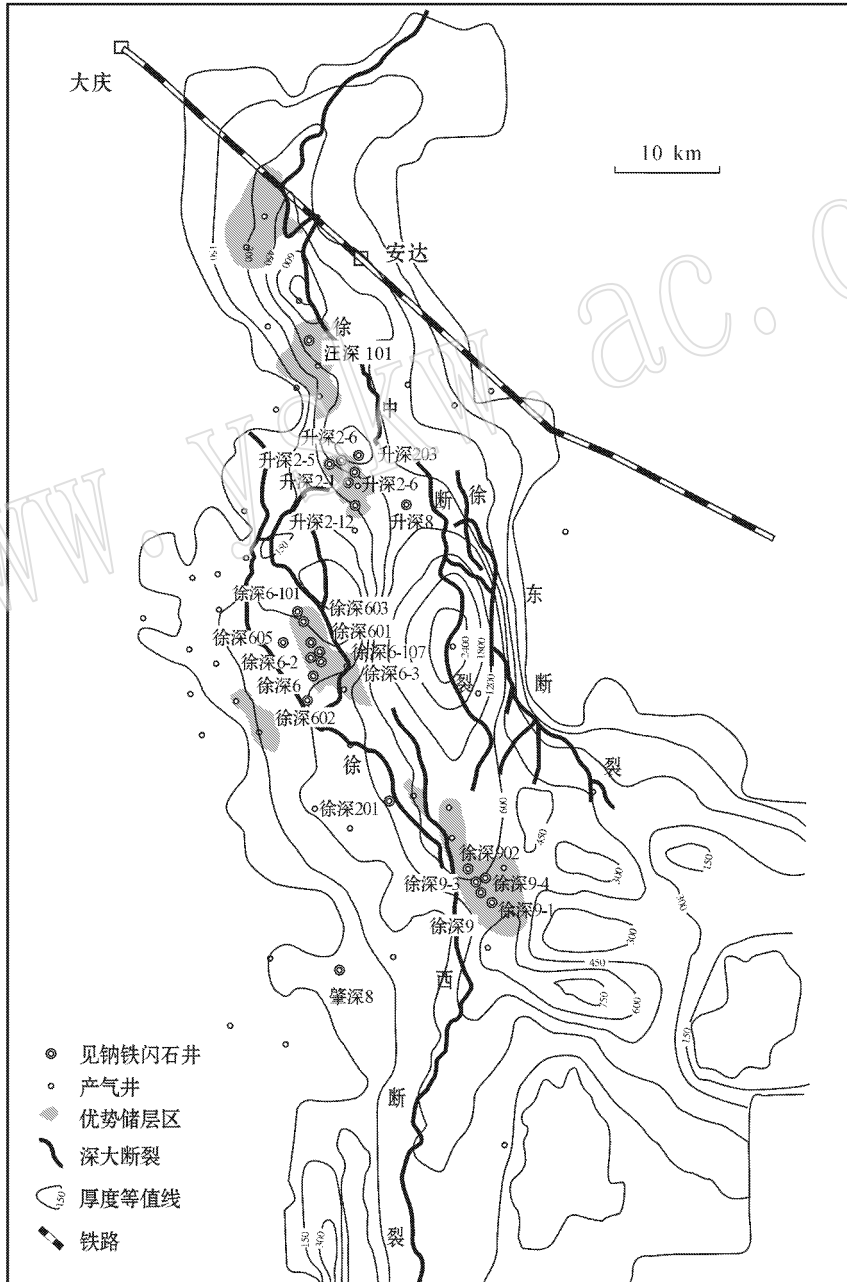


图3 松辽盆地徐家围子含碱流岩钻井分布图

Fig. 3 Distribution of pantellerite drill holes in Xujiaweizi, Songliao Basin

出黑云母等矿物,而往往会形成碱性岩中的重要副矿物——榍石。随着岩浆的进一步演化,水逐渐富集,到岩浆演化晚期往往会形成碱性闪石(如钠铁闪石)。此时碱性闪石可能会交代早期的榍石,这是一种岩浆晚期的交代活动,而不是岩浆期后的热液蚀变作用。同时,随着富碱岩浆由基性向酸性演化, SiO_2 含量增加,粘度增大,流动性变差,到岩浆演化晚期,这种高粘度的岩浆流动难度变大,岩浆驱动力能也大大减弱,岩浆喷发到地表后,往往聚积在火山口附近,分布面积有限,厚度较大,较好地指示出火山通道的位置。火山的喷发往往具有多期性、旋回性,多期不同岩性的火山岩在火山口附近堆叠之间的接触面也是热液的重要通道,即使个别储层孔隙度较小,热液的改造作用对提高储层的储集性能仍具有重要的作用。火山口及其附近火山岩的整体物性好,是天然气勘探的有利区(冯子辉等 2008),同时深大断裂也是岩浆喷发的最有利通道以及天然气运移的优势通道。这很好地解释了为什么含钠铁闪石的碱流岩多沿断裂带分布,且具有很好的储集性能。当然,富碱流体的后期交代蚀变作用(如钠长石化)对火山岩储层的改造也具有重要的意义,尤其是对原生孔隙不发育的火山岩(如凝灰岩)来说更具重要意义,在形成次生孔隙产生大量储集空间的同时,也增加了连通性。所以即使发生了钠铁闪石的后期交代蚀变作用(?),也表明当时富碱流体的高强度蚀变作用对提高火山岩储层的储集性能具有重要的贡献。因此钠铁闪石的出现对确定火山岩优势储层的位置具有重要意义。

另外,碱性岩的出现往往代表一种张性环境(Eby, 1990; Ronga *et al.*, 2009)。松辽盆地钠铁闪石的识别,确定了富碱酸性火山岩——碱流岩的存在,进一步佐证了松辽盆地营城组火山岩形成时的伸展背景,这与目前研究事实相一致(刘嘉麒, 1989; 吴福元等, 1999; 云金表等 2008)。

4 结论

通过薄片 X 衍射技术在松辽盆地深层火山岩中识别出特征的碱性暗色矿物——钠铁闪石,从而确定这些火山岩为碱流岩。碱流岩沿深大断裂分布。松辽盆地深层火山岩中钠铁闪石不是岩浆期后富碱流体交代蚀变的产物,而是富碱岩浆演化晚期形成的碱流岩中的特征碱性暗色矿物。在富碱岩浆演化晚期,当岩浆喷发到地表时,粘度大,流动性差,往往聚积在

火山口附近,而火山口附近是多种岩性、岩相叠合的地区,也是优势储层最为发育的地区,与勘探结果相一致。因此,碱流岩的确定对深层火山岩油气勘探开发具有重要的指示意义。

致谢 感谢王晓霞老师对文稿的修改,感谢审稿人提供的宝贵意见。

References

- Avanzinelli R, Bindi L, Menchetti S, *et al.* 2004. Crystallisation and genesis of peralkaline magmas from Pantelleria Volcano, Italy: an integrated petrological and crystal-chemical study [J]. *Lithos*, 73: 41~69.
- Chen Jianwen, Wang Defa, Zhang Xiaodong, *et al.* 2000. Analysis of volcanic facies and apparatus of yingcheng formation in xujiaweizi faulting depression, Songliao Basin northeast China [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 371~379 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Feng Zhiqiang. 2006. Exploration potential of large Qingshen gas field in the Songliao Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 26(6): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 416~432.
- Feng Zihui, Shao Hongmei and Tong Ying. 2008. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 760~768 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ruiqi and Cai Xiyuan. 1997. The Formation Conditions and Distribution of Oil and Gas Pools of Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 47~103 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jun, Chen Shoutian, Wang Weilin, *et al.* 2000. The lithochemistry feature of volcanic rock in Xujiaweizi fault-depression, Songliao Basin [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(3): 243~245 (in Chinese with English abstract).
- Kovalenko V I, Kuzmin M I, Antipin V S, *et al.* 1971. Topaz-bearing quartz keratophyre (ongonite), a new variety of subvolcanic igneous dike rock [J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR, Earth Science Section*, 199: 132~135.
- Li C Q, Pang Y M, Chen H L, *et al.* 2006. Gas charging history of the Yingcheng Formation igneous reservoir in the Xujiaweizi Rift, Songliao Basin, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 210~213.
- Li Ru, Zhang Minzhi, Shen Guangzheng, *et al.* 2007. An unusual mineral metasomatic alteration phenomenon in north deep Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing*, 26(1): 32~34 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hefu, Liang Huishe, Li Xiaoping, *et al.* 2000. The coupling mecha-

- nisms of Mesozoic ?Enozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers* , 7(4): 477~486(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaqi. 1989. On the origin and evolution of continental rift system in northeast China[J]. *Chinese Journal of Geology* , (3): 209~215(in Chinese with English abstract).
- Liu Wanzhu, Wang Pujun, Men Guangtian, *et al.* 2003. Characteristics of deep volcanic reservoirs in northern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology* , 24(1): 28~31(in Chinese with English abstract).
- Mahood G A and Hildreth W. 1986. Geology of the peralkaline volcano at Pantelleria Strait of Sicily[J]. *Bull. Volcano.* , 48 : 143~172.
- Meng Qi'an, Men Guangtian and Zhang Zhenghe. 2001. Prediction method and its application of deep volcanic rock body and facies in Songliao basin [J]. *Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing* , 20(3): 21~24(in Chinese with English abstract).
- Nicholls J and Carmichael J S E. 1969. Peralkaline Acid Liquids : A Petrological Study Peralkaline Acid Liquids : A Petrological Study[J]. *Contr. Mineral. Petrol.* , 20 : 268~294.
- Qu Yanming, Shu Ping, Ji Xueyan, *et al.* 2007. Micro-fabrics of reservoir volcanic rocks in the Qingshen gas field of the Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* , 37(4): 721~725(in Chinese with English abstract).
- Ronga F, Lustrino M, Marzoli A, *et al.* 2009. Petrogenesis of a basalt-comendite-pantellerite rock suite : the Boseti Volcanic Complex (Main Ethiopian Rift [J]. *Miner. Petrol.* , DOI 10.1007/s00710-009-0064-3.
- Wang Pujun, Feng Zhiqiang, Liu Wanzhu, *et al.* 2008. Volcanic Rocks in Petroliferous Basins : Petrography·Facies·Reservoir·Pool·Exploration[M]. Beijing : Science Press , 9~61(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan and Cao Lin. 1999. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. *World Geology* , 18(2): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Yang Wanli, Li Yongkang and Gao Ruiqi. 1982. Formation and evolution of nonmarine petroleum in the Songliao Basin, China[J]. *Journal of Changchun Geology Institute* , 12(1): 69~80(in Chinese with English abstract).
- Yun Jinbiao, Jin Zhijun, Yin Jinying, *et al.* 2008. Reflection feature and geodynamic significance of deep seismic reflection in Xujiaweizi region of north Songliao basin, China[J]. *Earth Science Frontiers* , 15(4): 307~314(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengqi, Pang Yanming, Yang Shufeng, *et al.* 2007. Geochronology of zircon SHRIMP, geochemistry and its implication of the volcanic rocks from Yingcheng Formation in depression area, north of Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica* , 81(9): 1 248~1 258(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, *et al.* 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. *Petroleum Exploration and Development* , 35(3): 257~271(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建文, 王德发, 张晓东, 等. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析[J]. *地质前缘* , 7(4): 371~379.
- 冯志强. 2006. 松辽盆地庆深大气田的勘探前景[J]. *天然气工业* , 26(6): 1~5.
- 冯子辉, 邵红梅, 董英. 2008. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层集性控制因素研究[J]. *地质学报* , 82(6): 760~768.
- 高瑞祺, 蔡希源. 1997. 松辽盆地油气田条件与分布规律[M]. 北京 : 石油工业出版社, 12~173.
- 郭军, 陈守田, 王维林, 等. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩岩石化学特征及其构造环境[J]. *长春科技大学学报* , 30(3): 243~245.
- 李茹, 张民志, 沈光正, 等. 2007. 松辽盆地北部深层一种罕见的矿物交代蚀变现象[J]. *大庆石油地质与开发* , 26(1): 32~34.
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等. 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J]. *地质前缘* , 7(4): 477~486.
- 刘嘉麒. 1989. 论中国东北大陆裂谷系的形成与演化[J]. *地质科学* , (3): 209~215.
- 刘万洙, 王璞珺, 门广田, 等. 2003. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征[J]. *石油与天然气地质* , 24(1): 28~31.
- 蒙启安, 门广田, 张正和. 2001. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. *大庆石油地质与开发* , 20(3): 21~24.
- 曲延明, 舒萍, 纪学雁, 等. 2007. 松辽盆地庆深气田火山岩储层的微观结构研究[J]. *吉林大学学报* , 37(4): 721~725.
- 王璞珺, 冯志强, 刘万洙, 等. 2008. 盆地火山岩·岩性·岩相·储层·气藏·勘探[M]. 北京 : 科学出版社, 9~61.
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. *世界地质* , 18(2): 1~13.
- 杨万里, 李永康, 高瑞琪. 1982. 松辽盆地陆相石油的形成与演化[J]. *长春地质学院学报* , 12(1): 69~80.
- 云金表, 金之钧, 殷进垠, 等. 2008. 松辽盆地徐家围子地区深反射结构及其盆地动力学意义[J]. *地质前缘* , 15(4): 307~314.
- 章凤奇, 庞彦明, 杨树锋, 等. 2007. 松辽盆地北部断陷区营城组火山岩锆石 SHRIMP 年代学、地球化学及其意义[J]. *地质学报* , 81(9): 1 248~1 258.
- 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 2008. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. *石油勘探与开发* , 35(3): 257~271.