松辽盆地青山口组橄榄粗安岩:⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄、 地球化学及其成盆、成烃和成藏意义

王璞珺¹ 高有峰¹ 任延广² 刘万洙¹ 张建光¹ WANG PuJun¹, GAO YouFeng¹, REN YanGuang², LIU WanZhu¹ and ZHANG JianGuang¹

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

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

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

2008-09-22 收稿,2008-12-14 改回.

Wang PJ, Gao YF, Ren YG, Liu WZ and Zhang JG. 2009. ⁴⁰ Ar /³⁹ Ar 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

Abstract Interlayers of mugearite are recognized within lacustrine mudstone of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (K_2qn) in the Songliao basin (SB) of Northeast China. Precise ⁴⁰ Ar /³⁹ Ar plateau age of 88.0 ±0.3 Ma is obtained for the mugearite, interpreted as a Late Cretaceous, Coniacian stage. The volcanic rocks are characterized by glassy matrix and porphyritic texture. Phenocrysts are olivine, augite and plagioclase. The rocks are rich in Na, Al, LREE ($\sum LREE / \sum HREE = 8.0 \sim 9.7$) and LILE (e. g. U, Th, Pb, Rb, Sr and Ba), with high Rb/Sr ratios, low Sm/Nd ratios and the δ Eu value ranges from 0.95 to 1.36. The volcanics have also high Mg[#] values (0.61 ~ 0.64), high Ox° values (0.62 ~ 0.68), and low MDI values (3.4 ~ 5.3). Standard mineral pressure plot coupled with MgO/Al₂O₃ ratios indicate a depth of > 60km for the magma chamber. Hereby, the magma originates from enriched mantle, turns to be intraplate rift volcanism as a result of maximal transtension cutting through the crust. The volcanic activities have two effects on oil & gas, accelerating hydrocarbon generation owing to the rising regional heat flow, and resulting in biolithite sediments of important source rocks owing to the local reef-building environment. Three factors involved in the volcanism are favorable for petroleum accumulation, including drag structures beneath, topographic highs above and turbidites around the volcanic rocks.

Key words Songliao Basin; Cretaceous Qingshankou Formation; Mugearite; Chronology and geochemistry; Hydrocarbon generation and petroleum accumulation

摘要 在松辽盆地上白垩统青山口组二段湖相泥岩中识别出橄榄粗安岩夹层,高精度⁴⁰ Ar /³⁹ Ar 坪年龄 $t_p = 88.0 \pm 0.3$ Ma,属晚白垩世 Coniacian 阶。岩石具玻基少斑斑状结构,斑晶为橄榄石、辉石和斜长石。岩石富钠、富铝、富轻稀土 (Σ LREE/ Σ HREE = 8.0~9.7)和 U、Th、Pb、Rb、Sr、Ba 等不相容的大离子亲石元素, Rb/Sr 比高、Sm/Nd 比低, δ Eu = 0.95~ 1.36,高镁(Mg[#] = 0.61~0.64),高氧化度(Ox^o = 0.62~0.68),低分异指数(MDI = 3.4~5.3)。MgO/Al₂O₃和标准矿物压力计 算得到岩浆源区深度大于60km。岩浆源于富集型地幔,属板内火山岩,是成盆过程中裂谷作用发育到最大深切割期的产物。 火山活动热效应及其高区域地温场有利于成烃,造成局部类礁相环境形成的大量生物灰岩沉积是重要烃源岩,火山岩之下的 牵引构造、之上的差异压实局部高部位以及其周围的浊积体是成藏有利部位。

关键词 松辽盆地;白垩系青山口组;橄榄粗安岩;年代学和地球化学;成烃成藏作用 中图法分类号 P588.144;P597.3

* 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB701403 和 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



图1 松辽盆地青二段沉积相分布图

Fig. 1 Facies distribution of the second member of Qingshankou Formation (K_2qn^2) containing the mugearite

1 引言

松辽盆地是在前中生代拼合基底上发育起来的以白垩 系为主体的中、新生代含油气盆地,盆地充填厚达11km(王 志武等,1993),为断陷与拗陷两期盆地充填的叠合盆地,下 部断陷期充填以火山岩和火山碎屑岩为主,上部拗陷期以正 常沉积层序占绝对优势(Wang et al.,2007)。就整个盆地充 填序列而言,松辽盆地火山岩主要见于断陷层序的火石岭组 和营城组(Wang et al.,2002)。拗陷层序自下而上包括 T₄ 界面以上的下白垩统登娄库组、泉头组和上白垩统青山口 组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组及其上覆第三系地层 (高有峰等,2008),最大厚度逾 6000 余米。上白垩统青山口 组以湖相泥质岩为主,是松辽盆地最重要的烃源岩层系(Li et al., 1994)。本文的火山岩于青山口组中部的泥质岩中呈 夹层产出。松辽盆地各油田于上世纪 80 年代就陆续钻遇了 青山口组中基性火山岩,但由于其层薄、结晶程度差、多为火 山玻璃,同生变化强且多已炸裂貌似含砾泥质岩,所以在录 井中多被描述为"泥质角砾岩和含角砾泥岩,角砾为泥质、钙 质和玄武岩质"①。另外,拗陷层序中火山岩夹层多属勘探 非目的层段,很少取岩心样,所以,对其一直没能开展系统研

① 大庆石油管理局.1983.松辽盆地北部齐家-古龙地区金6井完 井地质总结报告

究。金6井位于松辽盆地北部中央拗陷区齐家古龙凹陷内, 沉积环境为前三角洲和浅湖交互沉积(图1),本文以金6井 青二、三段中下部厚191m(1791.5~1982.5m)的火山岩段为 研究对象,在详细的录井测井资料分析、岩心观测描述、薄片 岩矿鉴定基础上,对其中的1971~1982m井段11m厚的火山 岩夹层进行了年代学和地球化学研究,以探索其火山作用特 征及其与成盆、成烃和成藏的联系。

2 地层序列、采样和岩矿特征

2.1 地层序列

金6井完钻井深 2293.34m,钻入泉三段 175.34m(未 穿)完井,其中青山口组二、三段分布在 1690.0~2016.0m, 厚 326.0m(图 2)。中基性火山岩夹火山碎屑岩段分布在青 二、三段的中下部(1791.5~1982.5m),厚 191.0m,其下部为 灰色含钙-钙质粉砂岩和细砂岩,油浸、油斑、油迹粉砂岩及 深灰色鲕状灰岩和深灰色泥岩、粉砂质泥岩,含较多介形类 化石及黄铁矿,此套岩层中常具粒序层理及滑塌变形(图 3D)。火山岩夹火山碎屑岩段之上见一套灰岩(1791.0~ 1791.5m),厚 0.5m,主要为藻灰岩和鲕状灰岩(图 3A),灰岩 之上为灰色粉砂岩、泥质粉砂岩及棕、灰棕色含油、油浸、油 斑粉砂岩夹钙质粉砂岩薄层(图 2)。整个序列为整合关系。

2.2 样品采集和岩矿特征

本文研究的样品采自金6井1791.5~1982.5m火山岩 段岩心,共选取19个样品进行岩矿研究,在此基础上于1971 ~1982m井段选择3个玄武质火山岩样品进行常量、微量和 稀土元素化学成分分析,并对其中一个样品进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄测定。

所取火山岩样品从手标本观察呈深绿灰色,具少斑斑状 结构,气孔杏仁构造。偏光显微镜下观察,斑晶含量在5%~ 10%之间,粒径为0.2~0.5mm,斑晶主要为斜长石、橄榄石 和普通辉石(图3B)。基质以玻璃质或隐晶质结构为主,局 部可见细针柱状斜长石和普通辉石定向近平行排列(图 3C)。气孔较发育,气孔大小一般在0.1~1.0mm之间,气孔 内充填绢云母、方解石、蛋白石、沸石类矿物等杏仁体(图 3B,图3C)。手标本和薄片定名为玄武安山岩或安山玄武 岩,属中基性过渡类型火山岩。

3 橄榄粗安岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄

在金6井1972.8m 处采集火山岩样品,挑选斜长石斑晶 和不含气孔杏仁体的基质部分,测定混样的⁴⁰Ar /³⁹Ar 同位 素年龄。选样流程同李全林等(2003),分析测试方法参见桑 海清等(1996)和高天山等(2006)。⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年分析结果列 于表1。



图 2 金 6 井综合柱状图(左)与青山口组含火山岩取心 段精细岩心剖面(右)

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of well-Jin6 (left) and the core section containing volcanic rocks of the K_2qn (right)



图 3 青山口组火山岩及其上覆和下伏岩性特征

A-金6井1787m,火山岩之上含介形虫鲕粒灰岩显微照片,单偏光;B-金6井1892m,橄榄粗安岩显微照片,单偏光;C-金6井1972m,橄榄粗 安岩显微照片,正交;D-金6井1988.5m,火山岩之下具滑塌变形构造粉砂岩显微照片,正交。图中代号:Aug-普通辉石,Pl-斜长石,Hb-普通 角闪石,Ol-橄榄石

Fig. 3 Photos showing features of mugearite (B and C) and the associated rocks above (A) and under (D), K_2qn^2

表1 青山口组火山岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄分析结果

Table 1 Ar data on the mugearite of $\mathbf{N}_2 q$	Table 1	⁴⁰ Ar/ ³⁹ A	r data	on the	mugearite	of	K_2q
--	---------	-----------------------------------	--------	--------	-----------	----	--------

阶段	加热温度 (℃)	$\left(\frac{{}^{40}\mathrm{Ar}}{{}^{39}\mathrm{Ar}}\right)_{\mathrm{m}}$	$\left(\frac{\frac{36}{39}}{\mathrm{Ar}}\right)_{\mathrm{m}}$	$\left(\frac{{}^{37}\mathrm{Ar}}{{}^{39}\mathrm{Ar}}\right)_{\mathrm{m}}$	$\left(\frac{{}^{38}\mathrm{Ar}}{{}^{39}\mathrm{Ar}}\right)_{\mathrm{m}}$	³⁹ Ar (10 ⁻¹² mol)	$\left(\frac{{}^{40}\mathrm{Ar}^{\star}}{{}^{39}\mathrm{Ar}}\right)$ $\pm\mathrm{l}\sigma$	³⁹ Ar (%)	视年龄 t (Ma±lσ)
1	420	16.674	0. 03201	0. 46093	0.0674	4. 708	7.295 ± 0.005	2. 59	167.2 ± 2.1
2	520	8.2472	0.0217	0.39603	0. 0396	8.535	1.882 ± 0.003	4.71	44.7 ± 0.6
3	630	8. 9446	0.0207	1.4520	0.0799	6. 698	2.956 ± 0.007	3.69	69.7 ± 1.0
4	730	6. 5634	0.0095	0.87313	0.04682	14.60	3.832 ± 0.003	8.06	89.8±1.1
5	830	5.8773	0.0075	0.62058	0.0268	24. 58	3. 705 ± 0. 001	13.5	86.9±1.0
6	900	5.7590	0.0072	1. 1478	0.0315	19.24	3.723 ± 0.002	10.6	87.3±1.0
7	1000	5. 1242	0.0047	1.0167	0.0221	39.18	3.811 ± 0.001	21.6	89.3 ± 1.1
8	1100	4.9280	0.0043	0.88531	0.02553	32. 22	3.727 ± 0.001	17.7	87.4 ± 1.0
9	1200	5.9220	0.0077	1.2004	0.0422	17.84	3.726 ± 0.003	9.85	87.3 ± 1.1
10	1300	8.7142	0. 0171	1.2313	0.0505	8.113	3.770 ± 0.004	4. 47	88.4 ± 1.1
11	1420	13.268	0.0285	0. 85922	0.0701	5.356	4.935 ± 0.006	2.95	114 <u>.8</u> ±1.5

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值,⁴⁰ Ar*表示放射性成因同位素值, lo 为一倍标准偏差,样品重量为 0.15g,照射参数 J = 0.01219,同位素测定仪器:MM1200 质谱计;测试单位:中科院地质与地球物理研究所同位素实验室

第1和11阶段分别给出视年龄167.2±2.1Ma和114.8 ±1.5Ma,第2和3阶段出现44.7±0.6Ma、69.7±1.0Ma两 个视年龄。结合本区火山岩来源深度(>60km)和盆地下覆 地壳构成(张贻侠等,1998)等特点,笔者将出现的高年龄值 解释成捕掳晶污染(xenocrystic contamination)或初始氩捕获 (initial traped argon component ⁴⁰Ar/³⁶Ar)(Miller *et al.*, 1998);而将两个低年龄台阶解释成⁴⁰Ar 随时间的渗漏(⁴⁰Ar leakage over time)(Richardson and McSween, 1989)。第4至



图 4 青山口组火山岩⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年龄谱图(A)及与之对应的等时线(B)和反等时线图(C) Fig. 4 Flat release age spectrum (A) and corresponding correlation isochron plot (B) and inverse correlation isochron plot (C) for the mugearite of K₂qn²

10 阶段表现年龄变化很小,形成了平坦的年龄坪,坪年龄为 88.0±0.3Ma。Ar 的释出量占总量的 85.8%。在³⁶ Ar/ ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar/⁴⁰ Ar 图解上,以上7个数据点构成了很好的⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar反等时线(图 4C),等时线年龄为 86.1±0.2Ma,与坪年 龄相近,对应的⁴⁰ Ar/³⁶ Ar 初始值为 294.8±14.7,这与现代大 气氩比值 295.5接近,表明在4~10阶段,被测样品中不含 过剩氩。以上7个点构成的等时线上(图 4B),等时线年龄 为 88.0±0.3Ma,与坪年龄相同。初始氩比值为 293.9± 8.4,也表明不存在过剩氩。

Sinton et al. (1998)提出的岩石可靠形成年龄(结晶或冷凝固结年龄)三条判别准则:①至少有3个和谐连续谱代表至少50%的³⁹Ar释出量;②和谐等时年龄的统计学F分布中SUMS/(N-2)值要在95%信度水平的截止值以下;③⁴⁰Ar/³⁹Ar截距与大气氩值(295.5)在统计学上无显著偏差(1s之内)。依据表1和图4分析结果参考此判据,笔者将图4A所示坪年龄88.0±0.3Ma解释为火山岩的冷凝年龄。

4 橄榄粗安岩地球化学

4.1 常量元素

松辽盆地青山口期火山岩常量、微量和稀土元素化学成 分分析结果见表 2。TAS 投图的岩性在玄武粗安岩区(图 5A),又按(Na₂O-2) > K₂O 进一步确定为橄榄粗安岩。Shand 图解投影显示准铝质系列(图 5B)。用 Siebel *et al.* (1997)提 出的岩石蚀变判别指标(摩尔比 Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O) >1.4 说明存在蚀变),所测火山岩的主量元素地球化学 (Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O) = 0.75 ~ 0.85)未显示有显著蚀 变。另外,岩石薄片显微镜下所反映的斑晶和基质矿物特征, 也没有明显的矿物蚀变(图 3C)。里特曼碱度指数 σ 为 7.47 ~ 8.87,为碱性系列。镁指数 Mg^{*}为 0.61 ~ 0.64,属于岩浆结 晶分异程度中等的玄武岩(Hess,1989)。经 CIPW 计算后该样 品中以含 Ne(霞石)和 Ol(橄榄石)标准矿物为特征,显示 SiO₂ 不饱和。将阳离子标准矿物 Ne^{*},O^{*},Q^{*} 值投入 Ne^{*}-Ol^{*}-Q^{*} 系 相图(Yoder,1976)得出源区压力在 2GPa 左右。

表 2 青山口组橄榄粗安岩常量(wt%)、稀土和微量元素 (×10⁻⁶)分析结果

Table 2 Major elements (wt%), rare earth and trace elements ($\times 10^{-6}$) analyses of mugearite from $K_2 qn^2$

样品号	J-1972.8	J-1978.5	J-1982
SiO ₂	48.48	47.72	47.08
TiO ₂	2.46	2.70	2.96
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00
Al_2O_3	14.16	14.39	14.30
Fe_2O_3	6.14	6.52	6.08
FeO	3.25	2.68	3.09
MnO	0.14	0.14	0.14
MgO	7.68	7.63	8.54
CaO	4.22	4.91	3.92
Na ₂ O	5.41	5.83	5.76
K ₂ 0	0.99	0.64	0.19
P_2O_5	0.28	0.64	0.15
LOI	6.24	6.42	7.20
Total	99.45	100.22	99.41
A⁄NK	1.42	1.40	1.48
A/CNK	0.80	0.75	0.85
SL	32.72	32.75	36.09
σ	7.47	8.87	8.68
τ	2.89	3.56	3.17
Ox°	0.68	0.63	0.62
MDI	5.25	4.01	3.42
Mg [#]	0.61	0.61	0.64
La	42.1	47.4	22.8
Ce	79.7	89.5	37.4
Pr	9.02	11.22	5.00
Nd	38.83	42.90	24.18
Sm	6.90	7.65	4.39
Eu	3.29	2.57	1.86
Gd	7.98	9.02	4.50
ТЬ	0.86	0.98	0.46
Dy	4.58	5.06	3.08
Ho	0.76	0.78	0.51
Er	2.01	2.04	1.30
Tm	0.35	0.34	0.23

续表2

Continoued Table 2

样品号	J-1972.8	J-1978.5	J-1982
Yb	2.24	2.31	1.72
Lu	0.30	0.28	0.21
$\sum \text{REE}$	222	108	199
Σ LREE/ Σ HREE	9.67	7.96	9.42
δEu	0.95	1.28	1.36
δCe	0.95	0.86	1.00
Sm⁄Nd	0.178	0.178	0.182
Li	60	47	69
Se	27.70	27.34	26.09
v	170	164	169
Cr	64	67	83
Со	35	40	36
Ni	95	91	113
Cu	118	20	54
Zn	115	77	91
Rb	30	24	12
Sr	365	374	202
Y	19.41	18.52	10.69
Zr	354	358	307
Cs	6.04	5.70	4.31
Ba	1063	623	859
Tl	0.32	0.29	0.16
Pb	47.71	11.71	9.85
Th	7.03	8.03	3.87
U	2.05	1.74	1.06
Rb/Sr	0.08	0.06	0.06

注: $\delta Eu = Eu_N / [(Sm_N)(Gd_N)]^{1/2}$, $\delta Ce = Ce_N / [(La_N)(Pr_N)]^{1/2}$ (Taylor and McLennan, 1985), N 为球粒陨石标 准化值;固结指数 SI = MgO × 100/(MgO + FeO + Fe₂O₃ + Na₂O + K₂O)(Kuno, 1960); 里特曼指数 $\sigma = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43); \tau = (Al_2O_3 - Na_2O) / TiO_2 (Rittmann et al., 1973); 氧化度 Ox^o = Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Fe²⁺ + Mn)摩尔$ 比(Rittmann et al., 1973); 岩浆分异系数 MDI = (SiO₂/3 + K₂O) - (CaO + MgO)(Gast, 1964); Mg[#] = MgO/(MgO + FeO + Fe₂O₃)摩尔比(Hess, 1989)

4.2 稀土和微量元素

稀土分配模式如图 6A 所示,稀土总量中-高(Σ REE = 107×10⁻⁶~222×10⁻⁶),为球粒陨石稀土总量(3.89× 10⁻⁶,Taylor and McLennan, 1985)的27~57倍。轻重稀土分 异明显(Σ LREE/ Σ HREE 为 7.96~9.67)。铕负异常不明 显,且常显示一定正异常(δ Eu 分别为 0.95、1.28和1.36)。 微量元素配分样式如图 6B-D。其总体特征是 K、Rb、Sr、Ba、 U、Th、Pb 等不相容的大离子亲石元素明显富集,而 Ti 和 Zr 等不相容的高场强元素也有一定富集。微量元素蛛网图从 Sr 至 Nb 形成一个隆起,即 K、Rb、Sr、Ba 有较明显富集(相当 于 MORB 的 10 倍以上),Zr、Sm 和 Ti 低度富集,Y、Yb、Ni 和 Cr 等难容元素亏损。

5 结果与讨论

5.1 岩浆成因及其成岩和构造环境

5.1.1 岩浆源

岩浆来源于深度大于 60km 的富集型地幔。运用 French and Gameron (1981)岩石 MgO/Al₂O₃比值及其矿物组合与玄 武质岩石形成压力(GPa)相关图解,该橄榄粗安岩 MgO/ Al₂O₃ = 0.53~0.60 投影得到岩石形成压力为 2GPa 左右。 运用 Yoder(1976)标准矿物压力计算得到岩浆源区压力大于 2GPa。按1GPa≈33km 估算,该套橄榄粗安岩源区深度应大 于60km。富集型地幔(enriched mantle)通常被认为是富含 不相容元素火山岩的岩浆源,它要求壳源物质通过俯冲或壳 幔作用方式加入到地幔源区,表现为高 Rb/Sr 比和低 Sm/Nd 比(Brownlow, 1996)。在构造背景上, 松辽盆地前青山口期 (早白垩世)存在壳源物质加入地幔的机制,通常认为太平洋 板块俯冲(Xu et al., 2006; Wang F et al., 2006)、鄂霍茨克 洋闭合(Wang et al., 2007)和岩石圈地幔/下地壳拆沉(吴福 元等,2003;Wu et al., 2005)是本区中生代时期壳源物质加 入地幔的主要机制。青山口组橄榄粗安岩中常量元素 Na、 Al、K、Ti,微量元素 Rb、Sr、Ba、U、Th、Pb 和稀土元素普遍高于 CHUR(chondritic uniform reservoir, Brownlow, 1996)和 MORB (图 6B)。这些典型不相容元素的富集和 Rb/Sr 比(0.061~ 0.082)高于地球平均值(CHUR = 0.031)而 Sm/Nd 比(0.178 ~0.182)低于地球平均值(CHUR = 0.299),暗示其源区应为 富集型地幔(Brownlow, 1996)。另外, 与鲁西中生代富钾火 山岩微量元素和稀土元素比较(图6B),二者具有相似性,后 者被认为源于富集型地幔的部分熔融(邱检生等,1997)。

5.1.2 岩浆性状

源区为中低分异岩浆。分馏结晶或部分熔融都会导致 铕异常,因此铕异常可在一定程度反映岩浆在源区的分异程 度(Brownlow, 1996)。实验证实玄武岩类的矿物组合与 Mg* 值具有对应性,它们能够反映源区岩浆分异程度,即,原始幔 源岩浆来源的玻璃质玄武岩中斑晶以橄榄石为主, Mg*> 0.7;中等分异岩浆含有橄榄石和斜长石, Mg*=0.60~0.70; 高度分异岩浆以斜长石和辉石为主, Mg[#] = 0.45~0.60 (Hess, 1989)。分异系数(MDI = (SiO₂/3 + K₂O)-(CaO + MgO))可反映岩浆的分异程度(Gast, 1964),松辽地区早白 垩世-晚侏罗世中基性岩的分异指数通常在 7 ~ 22 (Wang PJ et al., 2006)。青山口组橄榄粗安岩铕异常不明显(δEu = 0.95~1.35);主要组成矿物为斜长石、橄榄石和普通辉石, 高 Mg*值(0.61~0.64); 岩浆分异指数(MDI=3.42~5.25) 明显低于本区早期火山岩。这些特点都暗示青山口组橄榄 粗安岩源区岩浆的分异程度中低。另外,与不同熔融程度岩 浆的不相容元素配分模式对比(图 6C),青山口组火山岩与 低熔融岩浆比较相似(图 6C 中 common signature), 与斜长角 闪岩40%熔融计算模式最为接近(图6C)。



图 5 青山口组橄榄粗安岩常量元素地球化学特征及其对比

(A)青山口组火山岩 TAS 图解(据 Le Maitre, 1989); (B)Shand 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989); (C)标准矿物压力图(据 Yoder, 1976); (D)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 区为造山代和岛弧的火山熔岩, C 区代表 A 和 B 两种情况下的碱性派生熔岩; (E)氧化度 Ox°-(Na₂O+K₂O)图解(据 Rittmann et al., 1973)

Fig. 5 Major element features of mugearite from K_2qn^2 and relative comparison

(A) TAS diagram of volcanic rocks from Qingshankou Formation (after Le Maitre, 1989); (B) Shand's index of the volcanic rocks (after Maniar and Piccoli, 1989); (C) Standard mineral pressure plot of volcanic rocks (Yoder, 1976); (D) Gottini-Rittmann diagram (after Rittmann *et al.*, 1973); In field A are falling only lavas of volcances situated in non-orogenec regions, in field B those of volcances in orogenic belts and island arcs. In field C enter the alkaline derivatives of both; (E) Degree of oxidation as a function of the alkali content in lavas from $K_2 qn^2$, Japanese island and Hawaii (after Rittmann *et al.*, 1973)

5.1.3 成岩环境

高氧化环境水下喷发。火山岩含水率与喷发环境有关, 岩浆遇水快速冷凝形成的珍珠岩(含水 2% ~6%)和松脂岩 (含水 6% ~ 10%)均为高含水岩石(地质科学大辞典编委 会,2006)。含水率是指岩石中非结构水含量,主要反映在全 岩分析中的灼减量(LOI)。青山口组橄榄粗安岩灼减量 6.24%~7.20%,介于珍珠岩和松脂岩之间,属高含水岩 石。该套火山岩整合夹于湖相泥岩之间,从相序上属水下喷 发环境;其玻璃质结构是岩浆遇水淬火快速冷凝的标志;大 量的炸裂状浆屑角砾是岩浆遇水爆炸的产物。火山岩中变 价元素(如 Fe²⁺和 Fe³⁺)的氧化态与还原态量比通常可反映 成岩环境的氧逸度(Middlemost,1989)。所研究火山岩的氧 化度 Ox°(Rittmann et al.,1973)在 0.62~0.68 之间,明显高 于夏威夷和日本岛的同类岩石(图 5E),暗示其成岩环境是 偏氧化的。

5.1.4 构造背景

松辽盆地及其邻区于前三叠纪就形成统一地块(张贻侠 等,1998);蒙古-华北板块与西伯利亚板块之间的鄂霍茨克 洋于早白垩世关闭(130~110Ma)(Cogné et al., 2005),使松 辽地块处于欧亚大陆东缘的陆内环境。常量元素构造背景 判别图解显示,青山口组橄榄粗安岩形成于非造山带环境 (图 6D)。应用微量元素构造背景判别图解(Zr/Y-Zr 图解和 Zr/Y-Ti/Y 图解,Pearce,1987),投影结果也是板内玄武岩类。 结合松辽盆地青山口期区域地质背景和火山岩构造环境地球化 学判别结果,作者认为该橄榄粗安岩产于板内环境。另外,与被 认为是典型裂谷火山岩的渤海-鲁西地区白垩纪-古近纪火山岩 地球化学对比(图 6B),二者存在诸多相似性,如轻、重稀土分馏 比较明显,平均斜率(Ia/Yb)比较高,并向重稀土方向倾斜,平均 δEu 略正异常,亏损 Yb、Ni 和 Cr 等重元素物质(侯贵廷等, 2003)。从时空关系和地球化学特征对比看,松辽盆地青山口橄 榄粗安岩与渤海-鲁西火山岩应具有类似的形成背景。



图 6 青山口组橄榄粗安岩微量和稀土元素地球化学特征及其对比

(A)松辽盆地青山口组火山岩及邻区火山岩球粒陨石标准化 REE 配分图;(B)松辽盆地青山口组火山岩及邻区火山岩 MORB 标准化微量 元素蛛网图(A和B中其他数据引自侯贵廷等,2003;邱检生等,1997);(C)青山口组火山岩与不同类型岩浆原始地幔标准化不相容元素配 分模式对比图(其他数据引自 Peng et al., 1994;Fisk et al., 1988;Devey and Lightfoot,1986);(D)原始地幔标准化微量元素蛛网图;Cl 球粒 陨石与原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989),MORB 标准化值据 Pearce(1982)

Fig. 6 Trace and rare earth element geochemistry of mugearite from K_2qn^2 and relative comparison

(A) Chondrite normalized REE patterns of volcanic rocks in Qingshankou Formation of Songliao Basin and its adjacent areas; (B) MORB-normalized trace element spider pattern(ln B and C, the other data after Hou *et al.*, 2003 and Qiu *et al.*, 1997); (C) Primitive mantle-normalized incompatible element spider pattern of volcanic rocks in Qingshankou Formation and other different types magma(The other data after Peng *et al.*, 1994; Fisk *et al.*, 1988; Devey and Lightfoot, 1986); (D) Primitive mantle-normalized trace element spider pattern; chondrite values and primitive values after Sun and McDonough (1989), MORB values after Pearce(1982)

5.2 火山作用与成盆、成烃、成藏的关系

5.2.1 火山作用与成盆

青山口组火山岩为最大成盆期岩石圈张剪破裂的产物。 松辽盆地青山口期沉降速率远大于沉积速率、水体快速加 深,青一段时期为盆地最大湖泛期,发育了巨厚油页岩构成 全盆地最主要的烃源岩层系(Jiang et al., 2005)。近年开展 的15s 深反射地震揭示,松辽盆地中部存在15~22km宽、大 于250km长的近南北向的莫霍面断开带,在断开带附近伴生 一系列剪切断层,该断开带形成时间为晚中生代至新生代 (Yang et al., 2004)。金6井橄榄粗安岩发育区正好位于莫 霍面断开带之上,在空间及时间上二者均具有相关性。把沉 积-沉降、火山作用与深部壳幔结构相结合,笔者认为青二段 火山岩应为区域剪切成盆背景下,裂谷作用发育到最大深切 割期岩石圈破裂岩浆上侵的结果,属于被动裂谷火山岩(张 性破裂模式,Mattern *et al.*, 1998)。

5.2.2 火山作用与成烃和成藏

火山作用热有利于成经,与火山作用有关的局部构造有 利于成藏。金6井的高台子油层(青二三段)日产油 39m³ (王衡鉴,1984)。该区的油气分布与火山岩相关性明显(韩 广玲等,1988),有利的成藏部位有三类:一是火山岩之下的 沉积层常发育岩浆喷溢牵引而形成的局部构造;二是火山岩 之上的沉积岩层中发育与岩体形态相似由差异压实形成的 圈闭;三是火山岩下部及其周围的浊积体(如图 2 中 1980~ 1995m 井段所示)。近年的流体包裹体测温研究揭示,青山

表 3 青山口组地层时代划分对比表

Table 3 The stratigraphic division table of $K_2 qn^2$

作者	主要依据	原文用地质年表	青山口组时代归属	用 Gradstein <i>et al.</i> (2004) 地质年表对应的时代	
方大钧等 (1989)	磁性地层结合孢粉、沉积相和古海水温度	Harland et al., 1982	Cenomanian-Turonian		
王璞珺等 (1995)	测定暗色泥岩中分离出的同沉积粘土 矿物的 K-Ar 年龄 89.0 ± 1.8Ma 和 92.8 ± 1.5Ma	Harland et al. , 1989	Cenomanian-Turonian	两个青山口组年龄分别属 于 Coniacian 和 Turonian 阶	
陈丕基等 (1998)	叶肢介化石 Harland et al., 1989		Cenomanian		
黄清华等 (1999)	裂变径迹测年青山口组年龄 93 ± 13Ma ~98 ±12Ma	Harland et al., 1982	Cenomanian-Turonian *	青山口组年齢属 Cenomanian-Turonian阶	
高瑞祺等 (1999)	孢粉化石	Harland et al., 1989	Cenomanian		
叶得泉等 (2002)	介形类生物地层	Harland et al., 1989	Cenomanian-Turonian		
Li and Batten (2004)	叶肢介化石	Harland et al., 1989	Cenomanian		
万晓樵等 (2005)	有机碳碳稳定同位素对比(Cenomanian- Turonian 界线附近全球碳稳定同位素正 向偏移 90.5~91.5Ma 与青山口组顶界 时代对应)	Harland et al., 1989	Cenomanian	青山口组时代顶界进人到 Turonian 阶上部	
Sha (2007)	蚌类化石和沟鞭藻	Gradstein et al., 2004	Cenomanian		

注:* 黄清华等(1999)所划分的青山口组时代是对青山口组、姚家组和泉头组年龄共同讨论的结果,不是单纯依靠其所测得的裂变径迹 年龄

口期是松辽盆地快速沉降期和高地温梯度期(纪学雁等, 2007)。快速沉降导致湖泛和湖海沟通,有利于有机质的形 成和保存(王璞珺等,2001)。火山作用热效应和火山期后的 持续区域高地温场对有机质成烃会有催熟作用。这些应为 火山岩发育区有利于油气成藏的重要因素。

5.2.3 火山作用与烃源岩

火山岩台地-生物礁滩是碳酸盐岩烃源岩产出的有利场 所。暗色泥质岩和煤层一直被认为是松辽盆地的主要烃源 岩类。其实,从图1中所示金6井西部数十平方千米礁相碳 酸盐岩和图2所示1784~1796m井段火山岩上覆的生物灰 岩层可以看出,青二段火山作用期后是一个迅速的局部造礁 (或生物丘)环境,形成了大量的生物灰岩,包括介形虫灰岩 和鲕粒灰岩以及泥灰岩、核形石灰岩等(刘万洙等,2008)。 火山期后的生物礁(滩)相碳酸盐岩可能为松辽盆地的重要 烃源岩类型。这些具有一定规模的、局部造礁环境下形成的 生物碳酸盐岩礁(滩),既可能作为烃源岩又可能作为储层, 形成自生自储等多种类型油气藏,应作为今后油气勘探的重 要目标。

5.3 关于青山口组地层时代

对于青山口组地层时代的归属一直以来都存有不同意 见(表3,表4)。众多学者根据古生物化石资料的研究成果, 把青山口组时代归于晚白垩世早期的 Cenomanian 期(陈丕 基等,1998;高瑞祺等,1999;Li and Batten,2004;Sha,2007)或 Cenomanian-Turonian 期(叶得泉等,2002);此外,其他一些学 者运用磁性地层(方大钧等,1989)、同沉积粘土矿物 K-Ar 年 龄测定(王璞珺等,1995)、裂变径迹测年(黄清华等,1995)和 有机碳碳稳定同位素对比(万晓樵等,2005)等研究方法对青 山口组的时代进行探讨,得出的绝对年龄值或对比结果显示 青山口组时代也为 Cenomanian 期或 Cenomanian-Turonian 期。

值得注意的是青山口组地质时代的部分差异是由于对 比时采用了不同的地质年表所致。王璞珺等(1995)所测得 的两个青山口组年龄 89.0±1.8Ma 和 92.8±1.5Ma,使用 Harland et al. (1989)的地质年表属于 Turonian 期和 Cenomanian 期,如使用 Gradstein et al. (2004)的地质年表,这 两个年龄属于 Coniacian 期和 Turonian 期。万晓樵等(2005)

表 4 不同地质年表标定的青山口组及邻近各组地层时代的划分与对比表

Table 4 Stratigraphic division and correlation chart of K_2qn^2 and its associated formations concerning different geological time scales

地质时代表 Harland et al. 1982	方大钧等 1989	黄清华等 1999	地质时代表 Harland et al. 1989	王璞珺等 1995	陈丕基等 1998	高瑞祺等 1999	叶得泉等 2002	Li and Batten 2004 万晓樵等 2005	黎文本 2001 黎文本和 李建国 2005	地质时代表 Gradstein <i>et al</i> 2004	Sha 2007	本文
83 - Santonian	— 83 — 姚家纲	— 83 — 辦家組	83	- 84			t in sets for			83.5 Santonian 85.8		
87.5 Coniacian 88.5			Coniacian 	现11 第二 第二			姚家组			Coniacian		青二三段
Turonian 91 —			Turonian 90.4	書一二段	姚家组		寄山口纽			Turonian	姚家组	青一段 ?
Cenomanian	青山口组	同 111 1-1 到3	Cenomanian	17 and much EX	泉头组	青山口组	l-1 m i i ≥U	青山口组	泉头组	93.5	10 CT 10 20	
97.5	-97.5	-97.5-	97	- 97						99.6	月山口班	
Albian	泉头组	泉头组	Albian		贫爱库组	泉头组	泉头组		登娄库组	Albian	泉头组	
113	-113	- 113		泉头组						112		
Aptian			Aptian	110						Aptian		
A Aut			124.5									

根据在青山口组顶部发生的碳稳定同位素正向偏移与 Cenomanian 期-Turonian 期界线附近全球碳稳定同位素正向 偏移(90.5~91.5 Ma)的相似性,把 Cenomanian 期顶界与青 山口组顶界时代相对应,但当时参考的是 Harland *et al.* (1989)的地质年表,如选用 Gradstein *et al.* (2004)的地质年 表,青山口组顶界时代将进入到 Turonian 期上部。本文所测 得的青二、三段下部火山岩的 Ar-Ar 年龄值 88.0±0.3Ma,对 照 Gradstein *et al.* (2004)的地质年表属于 Coniacian 期。

近年来随着对青山口组下部层位的年代地层和生物地 层研究的逐渐深入,反映出各组地层时代的顶界有上移的趋势。对营城组顶界年龄的趋向性意见为110Ma 左右(丁日新等,2007;章凤奇等,2007,2008;舒萍等,2007;贾军涛等, 2008),相当于 Gradstein *et al.* (2004)地质年表的 Albian 期下 部;对于登娄库组和泉头组的年龄,部分学者通过孢粉组合 特征研究将前者时代定为晚 Aptian 期-Albian 期(黎文本和 李建国,2005),将后者时代定为 Cenomanian 期-Turonian 期 (黎文本,2001)。

Gradstein *et al.* (2004) 地层年表中 Coniacian 期与 Turonian 期之间的界线年龄为 89.3±1.0Ma;国际地层委员 会(2008)年表中 Coniacian 期与 Turonian 期之间的界线年龄 为 88.6Ma。本文所测火山岩采样位置到青一段顶部仍有约 35m 厚泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩沉积(图 2)。本区青山口 组沉积记录最全的沉积层厚度 497.02m(高有峰等,2008), 沉积时限为 11.5Ma(王璞珺等,1995),由此计算沉积速率约 为 0.043m/ka,形成 35m 厚沉积层约需 0.8Ma。所以青山口 组一段与二、三段之间的年龄值约为 88.8Ma。考虑到测年 及沉积速率计算误差和地层年表之间的年代值差别等因素, 本文暂且将青二、三段与青一段的时代界线与 Coniacian 期 和 Turonian 期之间的界线对应。

References

- Brownlow AH. 1996. Geochemistry (second edition). New Jersey: Prentice Hall, 434 – 438
- Chen PJ, Shi ZL, Ye N and Ye DQ. 1998. Sungari Biota and Cretaceous stratigraphic sequence of NE China. Acta Palaeontologica Sinica, 37 (3):380-385(in Chinese with English abstract)
- Cogné JP, Kravchinsky VA, Halim N and Hankard F. 2005. Late Jurassic-Early Cretaceons closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia). Geophys. J. Int., 163: 813 - 832
- Devey CW and Lightfoot PC. 1986. Volcanological and tectonic control of stratigraphy and structure in the western Deccan Traps. Bull. Volcano, 48; 195 - 207
- Ding RX, Shu P, Ji XY, Qu YM, Cheng RH and Zhang B. 2007. SHRIMP zircon U-P age and geological meaning of reservoir volcanic rocks in Qingshen Gas Field of the Sonlgiao 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 Geoscience. 2006. A Dictionary of Earth Geoscience (Application Course). Beijing: Geological Publishing House, 1201 (in Chinese)
- Fang DJ, Wang ZL, Jin GH, Gao RQ, Ye DQ and Xie JL 1989. The Cretaceous magnetic stratigraphy of Songliao Basin, China. Science in China (Series B), 10: 1084 - 1091(in Chinese)
- French WJ and Gameron EP. 1981. Calculation of the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts. Miner. Mag., 44: 19 -26

- Fisk MR, Upton BGJ and Ford CE. 1988. Geochemical and experimental study of the genesis of magmas of Róunion Island, Indian Ocean. J. Geophys. Res. 93: 4933 - 4950
- Gao RQ, Zhao CB, Qiao XY, Zheng YL, Yan FY and Wan CB. 1999. Cretaceous Oil Strata Palynology from Songliao Basin. Beijing: Geological Publishing House, 62 (in Chinese)
- Gao TS, Tang JF, Sang HQ, Hu SL and Qian CC. 2006. Whole-rock Ar-Ar dating for low-grade metavolcanics within the Dabie orogen and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 51(12) 1494 – 1500
- Gao YF, Wang PJ, Wang CS, Ren YG, Wang GD, Liu WZ and Cheng RH. 2008. Well site selecting, core profile characteristics and distribution of the special lithology in CCSD-SK II. Acta Geologica Sinica, 82(5): 669 - 675 (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
- Gradstein FM, Ogg JG, Smith AG et al. 2004. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge University Press, 500
- Han GL, Zhao HT and Bian J. 1988. Relationship between the injected basalt in Qingshankou Formation and oil/gas in Zhongyang Depression, Songliao Basin. Experimental Petroleum Geology, 10 (3): 248 - 255 (in Chinese with English abstract)
- Harland WB, Cox AV, Llewellyn PG, Pickton CAG, Smith AG and Walters R. 1982. A Geologic Time Scale 1982. Cambridge: Cambridge University Press, 1-131
- Harland WB, Armstrong RL, Cox AV, Craig LE, Smith AG and Smith DG. 1990. A Geologic Time Scale 1989. Cambridge: Cambridge University Press, 1 - 263
- Hess PC. 1989. Origins of Igneous Rocks. London, England: Harvard University Press, 117
- Hou GT, Qian XL and Cai DS. 2003. Cretaceous-Paleogene rifting in the Bohai Sea and western Shandong: Geochemical evidence from volcanic rocks. Chinese Journal of Geology, 38(1): 13 - 21 (in Chinese with English abstract)
- Huang QH, Tan W and Yang HC. 1999. Stratigraphic succession and chronosrata of cretaceous in Songliao Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 18(6): 15 - 17 (in Chinese with English abstract)
- 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)
- Jiang ZX, Lu HB, Yu WQ, Sun Y and Guan DS. 2005. Transformation of accommodation space of the Cretaceous Qingshankou Formation, the Songliao Basin, NE China. Basin Research, 17(4): 569-582
- Kuno H. 1960. High-alumina basalt. J. Petrol. , $1 \pm 121 145$
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre MJ, Lebas MJ, Sabine PA, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Wooley AR and Zanettín B. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. London: Blackwell, 28

- Li DS, Jiang RQ and Katz BJ. 1994. Petroleum generation in the nonmarine Qingshankou Formation (Lower Cretaceous), Songliao Basin, China. Berlin: Springer-Verlag, 131 – 148
- Li C and Batten DJ. 2004. Revision of the conchostracan genera Cratostracus and Porostracus from Cretaceous deposits in north-east China. Cretaceous Research, 25: 919 - 926
- Li QL, Wang PJ and Qiu CG. 2003. Sample preparation of volcanic rocks for isotopic dating. Journal of Jilin University (Earth science edition), 33 (Sup. V): 128 - 131 (in Chinese with English abstract)
- Li WB. 2001. Palynoflora from the Quantou Formation of Songliao Basin, NE China and its bearing on the upper-lower Cretaceous boundary. Acta Palaeontologica Sinica, 40(2):153 - 176(in Chinese with English abstract)
- Li WB and Li JG. 2005. Albian palynological assemblage from the borehole YU-302 in Yushu: With focus on the age of the Denglouku Formation in Songliao Basin. Acta Palaeontologica Sinica, 44(2): 209-228(in Chinese with English abstract)
- Liu WZ, Wang PJ, Gao YF, Wang GD and Bai XF. 2008. Discovery of oncolites in the Qingshankou Formation of Cretaceous, Songliao basin and its environmental significance. Acta Geologica Sinica, 82(5): 594-600 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. CSA Bulletin, 101: 635-643
- Mattern F, Schneider W, Wang P and Li C. 1989. Continental strike-slip rifts and their stratigraphic signature: Application to the Bngong/ Nujiang zone (Tibet) and the South Penninic zone (Alps). Geol. Rundschau, 87:206 - 224
- Miller JS, Heizler MT and Miller CF. 1998. Timing of magmatism, basin formation, and timing at the west edge of the Colorado river extensional corrido: Result from single-crystal ⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar geochronology of Tertiary rocks in the Old Women mountains areas, Southeastern California. J. Geol., 106: 195 – 209
- Middlemost EAK. 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. Chemical Geology, 77: 19-26
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorps RS and Chichester (eds.). Andesites. New York: Jonh Willey & Sons, 525 - 548
- Pearce JA. 1987. An expert system for the tectonic characterisation of ancient volcanic rocks. J. Volc. Geothermal Res., 32: 51-65
- Peng ZX, Mahondy J, Hooper P, Harris C and Beane J. 1994. A role for lower continental crust in flood basalt genesis? Isotopic and incompatible element study of the lower six formations of the western Deccan Traps. Geochim. Cosmochim. Acta, 58: 267-288
- Qiu JS, Wang DZ, Zeng JH and Brent IAM. 1997. Study on trace element and Nd-Sr isotopic geochemistry of mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province. Geological Journal of China Universities, 3 (4): 384 - 395 (in Chinese with English abstract)
- Richardson SM and McSween HYJR. 1989. Geochemistry Pathways and Pracesses. New Jersey: Prentice Hall, 397
- 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
- Sang HQ, Qiu J, Wang SS and Hu SL 1996. Determination of K-Ar ages on some young basalts by IDMS. Journal of Chinese Mass

Spectrometry Society, 17(4): 19 - 24 (in Chinese with English abstract)

- Sha JG. 2007. Cretaceous stratigraphy of mortheast China: Non-marine and marine correlation. Cretaceous Research, 28: 146-170
- Shu P, Ding RX, Ji XY and Qu YM. 2007. SHRIMP zircon geochronology of reservoir volcanic rocks in the Qingshen gas field, Songliao Basin. Acta Petrologica ET Mineralogica, 26(3): 239 – 246(in Chinese with English abstract)
- Siebel W, Raschka HIW, Kreuzer H, Lenz KL, Hoehndorf A and Wendt I. 1997. Early Palaeozoic acid magmatism in the Saxothuringian belt: New insights from a geochemical and isotopic study of orthogneisses and metavolcanic rocks from the Fichtelgebirge, SE Germany. J. Petrol., 38:203-230
- Sinton CW, Hitchen K and Duncan RA. 1998. ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar geochronology of silicic and basaltic volcanic rocks on the margins of the North Atlantic. Geol. Mag., 132: 161 – 170
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In Saunders AD and Nony MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication, 42:313 – 354
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. London: Blackwell Scientific Publications, 298
- Wan XQ, Li G, Chen PJ, Yu T and Ye DQ. 2005. Isotope stratigraphy of the Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin and its correlation with Marine Cenomanian Stage. Acta Geologica Sinica, 79(2):150-156 (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Zhou XH, Zhang LC, Ying JF, Zhang YT, Wu FY and Zhu RX. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing 'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. Earth and Planetary Science Letters, 251: 179-198
- Wang HJ. 1984. Features of petroleum geology in Qijia depression, Songliao Basin. Oil & Gas Geology, 5(3): 271 - 275 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Xie XA, Mattern Frank, Ren YG, Zhu DF and Sun XM. 2007. The Cretaceous Songliao Basin: Volcanogenic succession, sedimentary sequence and tectonic evolution, NE China. Acta Geologica Sinica, 81(6): 1002 - 1011
- Wang PJ, Liu WZ, Wang SX and Song WH. 2002. ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 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, Du XD, Wang J and Wang DP. 1995. The chronostratigraphy and stratigraphic classification of the Cretaceous of the Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 69(4):372 - 381 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Liu WZ, Shan XL, Bian WH, Ren YC, Du XD, Wan CB and Cheng RH. 2001. Depositional Events: Introduction, Example, Application. Changchun: Jilin Science & Technology Press, 182 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Chen FK, Chen SM, Siehel W and Muharrem S. 2006. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao basin, NE China. Geochem. J. , 40: 149 – 159
- Wang ZW, Yang JL and Gao RQ. 1993. Petroleum Ceology of China (Vol. 2). Beijing: Petroleum Industry Press, 82 (in Chinese)

- Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo CL. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. Earth Science Frontiers, 10 (3): 51 - 60 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Lin JQ and Wilde SA. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth and Planetary Science Letters, 233(1-2): 103-119
- Xu WL, Gao S, Wang QH, Wang DY and Liu YS. 2006. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. Geology, 34(9): 721 - 724
- Yang BJ, Tang JR, Li QX and Wang JM. 2004. Crustal reflection structure in the uplifting zone of Songliao Basin and disconnecting Moho interface. Science in China (Ser. D), 47(6): 514-521
- Ye DQ, Huang Qh, Zhang Y and Chen CR. 2002. Cretaceous Ostracoda Biostratigraphy in Songliao Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 82 (in Chinese with English abstract)
- Yoder HS. 1976. Generation of basaltic magma. National Academy of Science, Washington
- Zhang FQ, Pang YM, Yang SF, Dong CW, Chen HL and Shu P. 2007. Geochronology of zircon SHRIMP, geochemistry and its implication of the volcanic rocks from Yingcheng Formation in depression area, North of Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 81(9): 1248 – 1258(in Chinese with English abstract)
- Zhang FQ, Chen HL, Dong CW, Pang YM, Shu P, Wang YL and Yang SF. 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks and discussion on the geological time of the Yingcheng Formation of the northern Songliao Basin. Journal of Stratigraphy, 32 (1): 16 - 20 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX, Sun YS, Zhang XZ and Yang BJ. 1998. Geotraverse from Manzhouli to Suifenhe, China (Map & Guidebook). Beijing: Seismological Press, 1-20(in Chinese)

附中文参考文献

- 陈丕基, 施泽龙, 叶宁, 叶得泉. 1998. 松花江生物群与东北白垩系地 层序列. 古生物学报, 37(3): 380-385
- 地球科学大辞典编委会.2006.地球科学大辞典(应用学科卷).北 京:地质出版社,1201
- 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
- 方大钧,王兆樑,金国海,高瑞祺,叶得泉,谢锦龙.1989. 中国松辽盆 地白垩系磁性地层. 中国科学(B辑),10:1084-1091
- 高瑞棋,赵传本,乔秀云,郑玉龙,闫凤云,万传彪.1999. 松辽盆地白 垩纪石油地层孢粉学.北京:地质出版社,62
- 高天山,汤加富,桑海清,胡世玲,钱存超.2006.大别山腹地浅变质 岩层中富硅凝灰岩 Ar-Ar 年龄及其地质意义.科学通报,51 (10):1196-1202
- 高有峰,王璞珺,王成善,任延广,王国栋,刘万洙,程日辉.2008.松 科1井南孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布.地质学 报,82(5);669-675
- 韩广玲,赵洪涛,边吉.1988.松辽盆地中央拗带青山口组玄武岩与 油气分布的关系.石油实验地质,10(3):248-255
- 黄清华,谭伟,杨会臣. 1999. 松辽盆地白垩纪地层序列与年代地层. 大庆石油地质与开发,18(6):15-17

- 侯贵廷,钱详麟,蔡东升.2003. 渤海-鲁西地区白垩-早第三纪裂谷活动一火山岩的地球化学证据. 地质科学,38(1):13-21
- 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
- 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 板),37(4):739-743
- 李全林,王璞珺,邱春光.2003.火山岩同位素测年样品制备方法研 究.吉林大学学报(地球科学版),33(专辑V):128-131
- 黎文本.2001. 从孢粉组合论证松辽盆地泉头组的地质时代及上、下 白垩统界线.古生物学报,40(2):153-176
- 黎文本,李建国.2005. 吉林榆树榆-302 孔阿尔布期孢粉组合-兼论 松辽盆地登娄库组的地质时代. 古生物学报,44(2):209-228
- 刘万洙,王璞珺,高有峰,王国栋,白雪峰.2008. 松辽盆地白垩系青山口组核形石的发现及其环境意义.地质学报,82(5):594-600
- 邱检生,王德滋,曾家湖,Brent IAM. 1997. 鲁西中生代富钾火山岩及 煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学. 高校地质学报,3 (4):384-395
- 桑海清,裘冀,王松山,胡世玲. 1996. 同位素稀释质谱法对年轻玄武 岩 K-Ar 年龄的测定. 质谱学报,17(4):19 - 24
- 舒萍,丁日新,纪学雁,曲延明.2007. 松辽盆地庆深气田储层火山岩 锆石地质年代学研究.岩石矿物学杂志,26(3):239-245

- 万晓樵,李罡,陈丕基等.2005. 松辽盆地白垩纪青山口阶的同位素 地层标志及其与海相 Cenomanian 阶的对比.地质学报,79(2): 150-156
- 王衡鉴.1984. 松辽盆地齐家凹陷的石油地质特征.石油与天然气 地质,5(3):271-275
- 王璞珺,杜小弟,王俊,王东坡.1995. 松辽盆地白垩纪年代地层研究 及地层时代划分.地质学报,69(4):372-381
- 王璞珺,刘万洙,单玄龙,边伟华,任延广,杜小弟,万传彪,程日辉. 2001. 事件沉积:导论・实例・应用,长春:吉林科技出版社,182
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽.2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题.地学前缘,10(3):51-60
- 王志武,杨继良,高瑞祺.1993. 中国石油地质志(卷二). 北京:石油 工业出版社,82
- 叶得泉,黄清华,张莹,陈春瑞.2002. 松辽盆地白垩纪介形类生物地 层学.北京:石油工业出版社,97-102
- 章凤奇,庞彦明,杨树锋,董传万,陈汉林,舒萍.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. 地质学报,81(9):1248-1258
- 章凤奇,陈汉林,董传万,庞彦明,舒萍,王岩楼,杨树锋.2008. 松辽 盆地北部火山岩锆石 SHRIMP 测年与营城组时代探讨. 地层学 杂志,32(1):16-20
- 张贻侠,孙运生,张兴洲,杨宝俊.1998. 中国满洲里-绥芬河地学断面.北京:地震出版社,1-20