

辽河盆地欧利坨子富钾质火山岩特征与成因探讨

张建龙^{1,2}, 蒋少涌¹, 白玉英³, 孙娜², 王睿²

(1. 成矿作用国家重点实验室(南京大学), 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093;

2. 中油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010; 3. 辽河油田录井公司, 辽宁盘锦 124010)

摘要: 欧利坨子位于辽河盆地东部凹陷中段, 是新生代古近纪火山活动非常强烈的地区, 主要岩性为玄武岩、粗面岩和火山碎屑岩。对该区富钾质火山岩(粗面岩)的喷发特征、喷发年代、地球化学和成因进行了研究。火山口位于该区的中部, 属于裂隙式喷发, 弧形裂隙的两端喷发强度大, 并在晚期形成了破火山口。粗面岩的 K-Ar 年代学和地球化学表明, 它们形成于沙三时期(38.0~43.0 Ma), 具有富碱($K_2O + Na_2O = 10.22\% \sim 12.47\%$)、富钾($K_2O/Na_2O = 0.69 \sim 1.88$)、高铝($Al_2O_3 = 17.82\% \sim 19.44\%$)、低钛($TiO_2 = 0.19\% \sim 0.67\%$)的特点, 属于典型的钾玄岩系。粗面岩的分布受火山裂隙控制, 同时也受区域的断裂活动影响。在该区富钾质岩浆喷发前后, 华北东部中、新生代构造体制存在由 EW 向挤压构造向 NNE 向以伸展为主的构造格局, 由板缘向板内构造环境的重大转折, 郯庐断裂由左旋走滑变为右旋走滑, 辽河盆地在沙三期进入大幅度张裂期。欧利坨子富钾质火山岩的形成是裂谷期岩石圈伸展作用的产物, 是玄武质岩浆经过大比例分离结晶作用的产物, 可能与晚中生代太平洋板块俯冲残片的部分熔融有密切关系。

关键词: 富钾质火山岩; 喷发方式; 地球化学; 测井; 辽河盆地

中图分类号: P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2006)02-0271-10

欧利坨子位于辽河盆地东部凹陷中段, 构造区面积约 40 km², 是盆地内古近纪(Paleogene)火山活动非常强烈的地区。该区经历多期构造运动和火山活动(赵澄林等, 1999; 刘立等, 2002; 蔡国刚等, 2003), 火山岩的厚度大, 岩性变化复杂, 尤其是近年来随着火山岩油气藏的大规模开发, 对火山岩的研究工作备受关注。辽河盆地古近纪的火山岩多为碱性系列, 约占总面积的 58.3%, 而东部凹陷, 尤其是热河台、欧利坨子和黄沙坨地区则以富钾质火山岩为特征。近年的研究表明, 富钾火山岩的形成多与洋壳俯冲作用存在着内在联系(邱检生等, 2003), 即使在大陆内部, 富钾质岩浆源的形成也和洋壳的古俯冲作用相关(Foley & Peccerillo, 1992; Turner et al., 1996)。因此, 本文试图通过对欧利坨子富钾质火山岩的研究, 来探讨其岩石成因和构造环境。

1 地质概况

辽河盆地位于华北地台的东部, 渤海湾盆地北端。区域地质研究表明, 辽河盆地新生代火山岩的形成分为以下几个时期: 房身泡、沙河街(沙三、沙二和沙一)和东营时期(陈文寄等, 1992; 梁鸿德等, 1992; 吴昌志等, 2004a, b, 2005)。欧利坨子地区位于辽河盆地东部凹陷中段, 东邻三界泡潜山, 西接中央凸起, 北起欧 5 井, 南与热河台相连, 为辽河盆地始新世期火山活动的中心。该区火山岩的发育, 纵向上从老到新具有基性—中性—基性的分布特征, 平面上沿深大断裂呈北东向展布。房身泡时期火山活动最为强烈, 熔岩大规模喷发, 凝灰岩和玄武岩遍及整个凹陷。该期火山岩以溢流相为主, 大规模的熔岩流使部分地表沉积岩(物)产生熔融和混染, 形成凝灰岩, 有些岩石后期遭受了不同程度的

收稿日期: 2004-06-16; 修回日期: 2006-01-06

作者简介: 张建龙, 男, 1965 生, 高级工程师, 硕士研究生, 从事石油地质、储量研究和测井解释工作。Email: zhang_jian_long@sohu.com

碳酸盐化、蛇纹石化及绿泥石化等蚀变作用。沙河街时期的沙三段,伴随构造运动的加剧,火山活动仍比较强烈,岩性主要为高碱、富钾的粗面岩,其次为玄武岩和凝灰岩。而到沙一、二段和东营时期火山活动逐渐减弱,岩性以溢流相玄武岩为主。

欧利坨子地区的粗面岩裂缝比较发育,具有良好的油气显示及储集性能。目前钻井揭露的粗面岩大致顺层侵入于始新统沙三组地层中,厚度自SW向NE加大,最大厚度为289 m(欧25-21井),岩体的直接围岩为沙三组的砂质泥岩、玄武岩和凝灰岩,迄今为止,已有17口井钻遇油气层,其中欧14,欧26和欧48等多口井获得高产工业油流。

2 岩石学及岩石化学特征

本区的玄武岩呈灰黑和深黑色,风化后为灰绿色,具有块状或杏仁构造。矿物成分主要以斜长石和辉石为主,其次为橄榄石。蚀变矿物为绿泥石、方沸石及方解石。粗面岩类的显著特点是斑晶发育,具有“粗面”结构,以块状、厚层状为特征,颜色呈浅

灰、灰绿和深灰色。主要矿物成分为碱性长石(以钾长石为主),含有少量的斜长石,暗色矿物(如辉石、黑云母)含量在5%以下。因此,有研究者认为它不是喷出相的粗面岩(赵澄林等,1999),而应是次火山岩相的粗面斑岩(吴昌志等,2004b)。凝灰岩由灰绿色或黑色火山灰组成,具有玻屑凝灰结构,粘土和方沸石的含量较高。

表1为欧利坨子火山岩的主量元素分析数据。欧利坨子粗面岩以富碱($K_2O + Na_2O = 10.22\% \sim 12.47\%$)、富钾($K_2O/Na_2O = 0.69 \sim 1.88$)、低钛($TiO_2 = 0.19\% \sim 0.67\%$)为特征,铝含量较高($Al_2O_3 = 17.82\% \sim 19.44\%$),铝饱和指数ANKC为0.92~1.24,平均值1.04。里特曼指数(σ)和莱特碱度率(AR)的平均值分别为8.30和3.56。 SiO_2 的变化范围为54.95%~61.22%。从 SiO_2 和 $K_2O + Na_2O$ 关系图解(图1)上可知,分析样品多为粗面岩、响岩和碱玄质响岩。在 SiO_2 和 K_2O 关系图解(图2)上,表现出高钾质的特点,属于钾玄岩系。粗面岩中 K_2O 与 Na_2O 的含量呈负相关关系(图3)。

表1 欧利坨子火山岩主量元素分析数据($w_B/\%$)

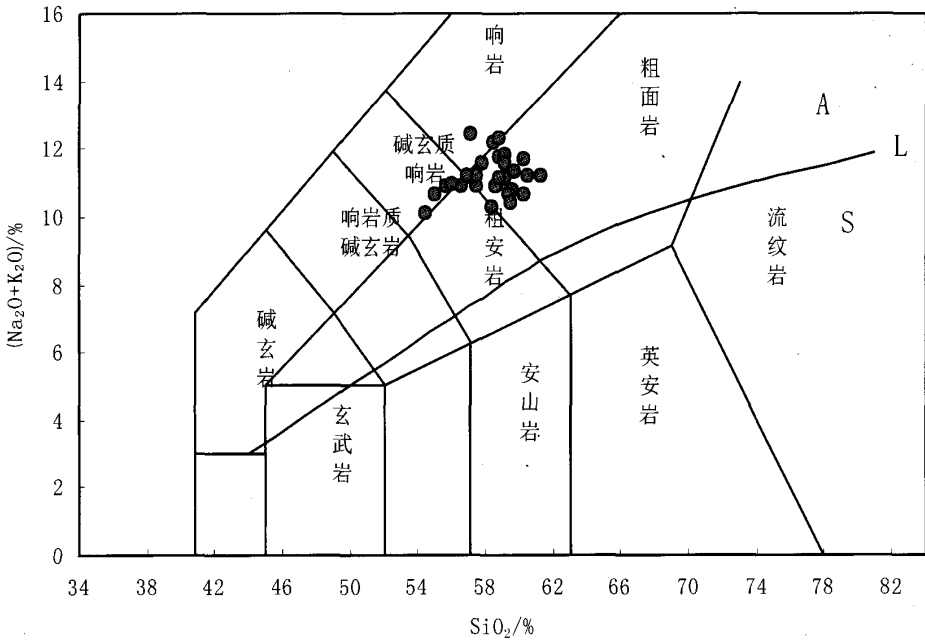
Table 1 Major element analysis of volcanic rocks from Oulituozi

井号	深度/m	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量
欧14	2183.5	61.22	0.52	18.56	3.82	0.09	0.84	1.55	5.31	5.93	0.19	1.63	99.66
欧14	2189.17	54.95	0.65	18.28	7.19	0.09	1.37	1.33	5.1	5.55	0.14	3.48	98.13
欧14	2195.65	59.01	0.63	19.02	5.64	0.11	1.05	1.33	4.89	6.08	0.2	2.58	100.54
欧14	2246	59.58	0.64	18.26	4.48	0.11	1.1	1.38	4.38	6.43	0.15	2.45	98.96
欧14	2246.76	57.16	0.56	18.31	5.37	0.13	0.83	3.44	4.99	6.19	0.18	3.38	100.54
欧26	2193.5	57.4	0.59	19.44	6.19	0.1	1.07	1.57	5.48	5.42	0.16	2.9	100.32
欧26	2194	59.1	0.58	18.74	4.58	0.14	0.67	1.45	5.61	5.54	0.13	3.07	99.61
欧26	2195.2	54.43	0.56	18.1	6.42	0.23	1.07	3.81	5.17	4.95	0.18	5.19	100.11
欧26	2308.9	58.83	0.67	18.08	5.74	0.11	0.75	1.73	5.15	6.61	0.21	2.38	100.26
欧27	2401.13	57.78	0.19	19.11	4.45	0.1	1.53	1.6	5.95	5.65	0.05	3.39	99.8
欧27	2404.55	59.08	0.2	19.01	5.35	0.1	1.32	0.69	5.52	6.3	0.05	2.8	100.42
欧27	2524.37	55.67	0.53	18.34	6.79	0.12	1.86	1.38	6.03	4.87	0.12	4.77	100.48
欧27	2525	57.42	0.46	17.93	4.95	0.13	1.22	1.58	6.14	5.05	0.17	4.8	99.85
欧19	2367.87	56.5	0.67	17.96	7.47	0.12	0.91	1.43	3.99	6.94	0.23	3.71	99.93
欧19	2369	58.54	0.62	17.82	5.9	0.17	0.89	1.21	5.56	5.34	0.11	3.43	99.59
欧19	2372.32	56.84	0.57	18.4	7.31	0.11	1.01	1.04	4.41	6.82	0.16	3.59	100.26
欧15	2304.2	58.33	0.58	18.3	6.15	0.09	2.2	0.93	3.57	6.7	0.13	3.81	100.79
欧15	2310.55	58.73	0.49	18.95	5.94	0.1	1.36	0.95	4.31	6.83	0.13	3.06	100.85
欧15	2311	60.42	0.46	18.6	4.25	0.12	0.89	1.1	4.67	6.55	0.14	2.44	99.64
欧15	2315	59.32	0.46	18.82	4.79	0.11	1.13	1.48	5.36	5.28	0.15	2.53	99.43
欧15	2318	59.5	0.46	19.04	4.91	0.12	1.12	1.38	5.44	4.96	0.14	2.61	99.68
欧15	2322.49	56.01	0.5	18.1	6.14	0.15	1.12	2.88	4.5	6.49	0.27	3.99	100.15
欧15	2400.16	59.15	0.45	19.11	5.04	0.09	0.65	1.62	6.16	5.45	0.12	2.45	100.29
欧15	2400.5	60.18	0.5	18.57	4.65	0.11	0.67	1.21	5.85	4.84	0.16	2.57	99.31

续表 2

井号	深度/m	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _i	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量
欧 15	2403	59.68	0.48	18.36	4.71	0.11	0.66	1.64	6.71	4.66	0.14	2.52	99.67
欧 36	2734	57.12	0.44	18.83	3.83	0.09	0.67	0.52	7.03	5.44	0.12	5.31	99.4
欧 36	2738	58.46	0.48	18.58	4.23	0.11	0.57	1.15	7.15	5.05	0.15	4.05	99.98
欧 36	2738.5	58.76	0.5	18.57	4.17	0.12	0.53	1.43	7.31	5.01	0.16	3.27	99.83
欧 36	3252	60.28	0.46	18.82	4.9	0.12	0.63	0.92	4.8	6.91	0.16	1.68	99.68

注: FeO_i = FeO + Fe₂O₃



A - 碱性系列 (Alkaline series); S - 亚碱性系列 (Subalkaline series); L - 碱性线 (Alkaline line)

图 1 欧利坨子火山岩 SiO₂ 和 K₂O + Na₂O 关系图解

Fig. 1 The SiO₂ vs. K₂O + Na₂O diagram (after Rollinson, 1993) for volcanic rocks from Oulituozhi

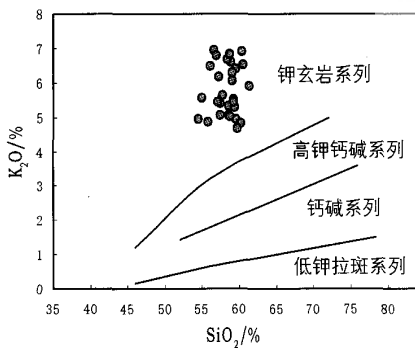


图 2 欧利坨子火山岩 SiO₂ 和 K₂O 关系图解

Fig. 2 The SiO₂ vs. K₂O diagram (after Rollinson, 1993) for volcanic rocks from Oulituozhi

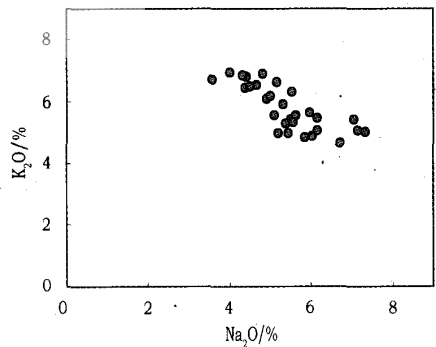


图 3 欧利坨子火山岩 K₂O 和 Na₂O 关系图解

Fig. 3 The K₂O vs. Na₂O diagram for volcanic rocks from Oulituozhi

表2为欧利坨子部分井的火山岩稀土和微量元素的分析数据,稀土总量在 $(79.79 \sim 103.53) \times 10^{-6}$ 之间,由稀土配分曲线(图4)可知,曲线型式基本一致,为轻稀土中等富集型,绝大部分样品呈铈负异常, δEu 为0.52~0.88,La/Sm和Gd/Yb的比值分别为4.10~6.47和1.28~1.78,说明轻稀土的分布变化较大,而重稀土则相对比较平缓。由微量元素球粒陨石标准化蛛网图(图5)可知,欧利坨

子火山岩明显富集高强场元素,如Zr, Hf, Nb, Ta等,而相对亏损Ba, Rb, Ti, P和Sr等元素。P和Sr的负异常表明其岩浆经历过斜长石和磷灰石的大量分离结晶作用。Nb的正异常及较低的Y/Nb比值(0.16~0.23),以及Zr的正异常和高Zr/Y比值(26.2~40.1)表明岩石可能形成于板内环境(Pearce & Norry, 1979; 从柏林等,2001)。

表2 欧利坨子火山岩微量元素和稀土元素分析数据($\times 10^{-6}$)

Table 2 The trace and rare earth elements data of volcanic rocks from Oulituozhi

元素	欧14b	欧15	欧19a	欧19b	欧19c	欧26a	欧26b	欧26c	欧26d
	2189.17	2322.5	2367.87	2369.0	2372.32	2193.5	2194.0	2195.2	2308.9
Li	13.01	5.08	10.42	5.62	5.20	13.57	5.30	5.30	5.52
Be	7.23	6.66	5.25	4.89	5.52	6.40	4.65	4.61	3.49
Sc	3.13	1.87	3.15	2.44	2.53	2.19	2.64	2.59	2.27
V	2.82	1.88	10.52	9.08	9.17	1.85	2.14	2.04	1.85
Cr	2.30	1.15	10.80	7.95	7.48	0.91	1.02	1.02	0.75
Co	2.26	1.20	2.79	2.90	2.82	1.57	1.53	1.42	1.48
Ni	1.22	1.98	2.33	5.45	3.39	1.88	1.80	2.08	2.20
Cu	8.10	6.83	8.01	14.45	7.17	7.17	7.23	6.47	6.30
Zn	72.49	37.89	70.78	125.5	75.20	49.59	76.32	62.05	56.93
Ga	22.96	24.84	24.91	23.85	26.71	21.97	22.59	22.77	21.33
Rb	12.47	34.40	12.16	18.34	13.56	8.96	7.90	7.99	15.60
Sr	95.76	40.24	92.83	86.69	78.67	67.93	72.09	79.17	68.89
Y	15.09	12.24	12.46	11.24	14.62	12.54	15.35	16.54	13.06
Zr	398.8	374.7	499.6	491.4	516.1	436.0	437.6	432.8	390.8
Nb	71.66	89.09	85.82	79.73	80.15	79.27	76.53	72.62	70.25
Mo	1.48	0.41	2.51	2.13	5.34	0.44	1.99	1.39	2.64
Sn	2.95	2.84	3.54	4.67	3.82	3.41	3.09	3.10	2.81
Cs	0.25	0.29	0.59	0.30	0.34	0.33	0.59	0.35	0.64
Ba	360.0	145.8	100.9	92.0	109.7	233.8	282.2	261.0	256.7
La	18.067	18.025	18.648	13.935	12.753	14.667	18.220	16.426	15.531
Ce	42.100	40.428	40.841	37.971	32.960	39.304	41.827	43.016	43.670
Pr	4.500	4.105	4.346	3.772	3.583	3.750	4.686	4.812	4.052
Nd	17.416	14.616	16.269	14.924	14.186	14.481	18.375	19.420	15.548
Sm	3.562	2.786	3.087	3.008	3.074	3.052	3.649	4.010	3.139
Eu	1.005	0.519	0.524	0.528	0.561	0.794	0.987	1.037	0.989
Gd	3.434	2.662	3.059	2.936	2.906	2.959	3.444	3.829	3.043
Tb	0.489	0.373	0.426	0.417	0.451	0.425	0.499	0.548	0.438
Dy	3.433	2.778	2.924	2.977	3.264	3.061	3.582	3.941	3.131
Ho	0.760	0.643	0.627	0.664	0.769	0.691	0.808	0.882	0.703
Er	2.214	1.844	1.903	1.977	2.272	1.964	2.339	2.490	2.008
Tm	0.329	0.298	0.272	0.289	0.364	0.307	0.346	0.386	0.309
Yb	2.007	1.756	1.720	1.745	2.275	1.886	2.151	2.354	1.827
Lu	0.329	0.291	0.277	0.278	0.376	0.302	0.343	0.380	0.299
Hf	6.95	6.39	9.16	9.35	8.80	7.92	7.79	7.94	7.05
Ta	4.37	4.63	5.75	5.92	5.38	4.93	4.85	5.01	4.46
W	0.18	0.11	0.18	0.26	0.17	0.19	0.19	0.17	0.28
Pb	4.98	2.78	2.38	6.40	3.47	4.10	4.77	5.38	3.96
Bi	0.03	0.01	0.01	42.40	0.06	0.02	0.03	0.02	0.03
Th	4.04	3.80	3.80	4.27	4.33	3.81	4.37	4.83	3.85
U	1.88	1.20	1.24	1.54	2.17	1.45	1.53	1.67	1.06

注:欧14b等为井号,2189.17等为采样深度(m)。

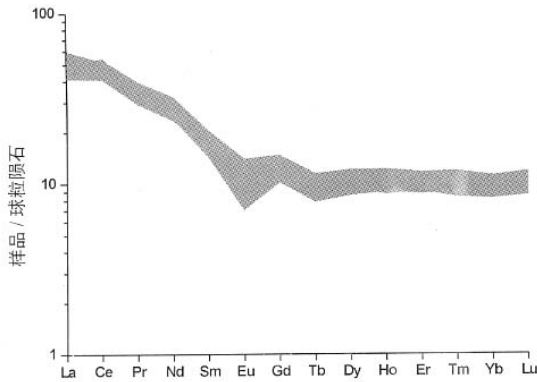


图4 欧利坨子火山岩稀土元素配分曲线
(球粒陨石标准化数据引自 Boynton, 1984)

Fig.4 REE distribution pattern of volcanic rocks from Oulituozi (Chondrite-normalized data from Boynton, 1984)

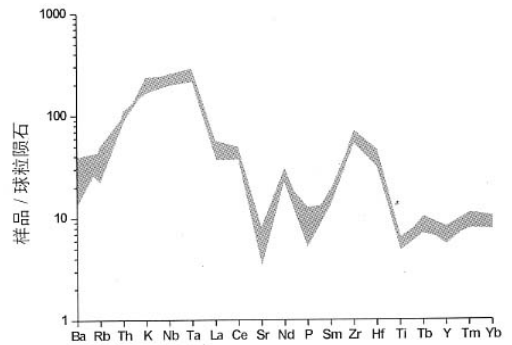


图5 欧利坨子火山岩微量元素蛛网图

(球粒陨石标准化数据引自 Sun & McDonough, 1989)

Fig.5 Trace elements spider diagram

(Chondrite normalized data from Sun & McDonough, 1989)
for volcanic rocks from Oulituozi

3 年代学特征

表3为欧利坨子火山岩 K/Ar 法定年的结果(衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/a$),样品的年代范围为 22.3 ~ 62.8 Ma。根据年代学研究结果,房身泡时期的年代范围为 45.4 ~ 65 Ma,沙河街时期为 36 ~ 45.4 Ma,东营时期为 24.6 ~ 36 Ma(梁鸿德等, 1992),证明欧利坨子火山岩是由这三个时期所形成的复式火山岩。

表3中的测年结果具有如下特点:

- (1)粗面岩形成的年代主要集中在 38 ~ 42 Ma 内,即形成于沙三时期,房身泡和沙一二、东营时期形成的火山岩主要为基性的玄武岩和凝灰岩;
- (2)在个别井中,测量的样品年龄具有同深度反向的特点。例如,在欧 19 井、欧 29 井中,4 块样品的岩性均为粗面质角砾岩,测年样品的年龄分别随深度增加而减小。其原因很可能是在喷溢过程中造成混染及构造运动形成的。

表3 欧利坨子火山岩 K/Ar 法定年结果

Table 3 K/Ar dating results of volcanic rocks from Oulituozi

井号	深度/m	岩性	K/%	样品质量/g	放射性成因 ^{40}Ar		表观年龄/Ma
					mol/g	%	
欧 8	2177.25	角砾熔岩	0.9	0.0951	9.235×10^{-12}	55.3	61.2 ± 0.8
欧 11	2413.29	玄武岩	0.71	0.0886	4.577×10^{-12}	69.7	41.5 ± 1.6
欧 14	2248.06	粗面岩	4.84	0.1073	3.062×10^{-11}	90.3	39.5 ± 0.3
欧 15	2303.7	粗面岩	5.24	0.0736	2.673×10^{-11}	94.5	39.5 ± 0.1
欧 15	2323.2	粗面岩	1.00	0.0754	2.784×10^{-11}	95.9	38.2 ± 0.6
欧 15	2400.36	粗面岩	6.03	0.0669	2.020×10^{-11}	98.6	28.6 ± 0.2
欧 19	2314.55	粗面角砾岩	0.94	0.1025	8.715×10^{-11}	74.5	52.7 ± 0.8
欧 19	2374.87	粗面角砾岩	3.92	0.0566	1.184×10^{-11}	99.9	30.5 ± 0.1
欧 26	2191.5	粗面岩	4.56	0.0291	7.537×10^{-12}	66	32.5 ± 1.0
欧 26	2308.5	粗面岩	6.35	0.055	2.329×10^{-11}	94.2	38.0 ± 0.3
欧 26	2310	粗面岩	5.57	0.059	2.439×10^{-11}	99.9	42.3 ± 0.4
欧 27	2401.08	粗面岩	5.52	0.0518	1.947×10^{-11}	80.2	38.8 ± 0.3
欧 27	2404.69	粗面岩	5.93	0.0642	2.781×10^{-11}	99.9	41.6 ± 0.2
欧 27	2522.67	粗面岩	4.15	0.0598	1.748×10^{-11}	99.9	40.2 ± 0.7
欧 27	2525.27	粗面岩	5.67	0.0546	2.245×10^{-11}	99	41.3 ± 0.3

续表 3

井号	深度/m	岩性	K/%	样品 质量/g	放射性成因 ^{40}Ar		表观年龄/Ma
					(mol/g)	(%)	
欧 28	2549.1	凝灰岩	2.27	0.0684	1.722×10^{-11}	86	62.8 ± 0.2
欧 29	2218.5	粗面角砾岩	6.63	0.0608	2.937×10^{-11}	95.2	41.5 ± 0.3
欧 29	2353	粗面角砾岩	5.68	0.058	2.163×10^{-11}	99.8	37.5 ± 0.2
欧 30	2515.4	玄武岩	0.68	0.1198	6.905×10^{-12}	75.3	48.2 ± 0.7
欧 30	2512.9	玄武岩	0.55	0.1119	5.878×10^{-12}	70.3	54.2 ± 1.2
欧 36	2732.18	粗面角砾岩	3.27	0.0475	1.271×10^{-10}	96.6	22.3 ± 0.7
欧 40	2853.27	玄武岩	0.52	0.0571	2.825×10^{-11}	68.1	31.1 ± 0.5

注:K/Ar 法定年数据由北京大学侯贵廷测定(侯贵廷,2000.欧利坨子构造裂缝分布定量预测研究内部报告)。

4 粗面岩的分布与火山的喷发特征

4.1 岩性识别与地层对比

不同岩性的矿物成分有很大差别,东部凹陷全岩矿物统计表明,粗面岩的钾长石含量平均为 33.1%,玄武岩和凝灰岩中钾长石平均含量分别为 7.5% 和 17.3% (蔡国刚和张坤,2003),而矿物成分的变化使得测井曲线具有明显特点。玄武岩类的铁镁矿物含量相对较高,长石含量低,在测井曲线表现为电阻率和自然伽马均为低值;粗面岩类的长石含量增加,尤其是钾长石含量很高,导致自然放射性增加,即自然伽马呈高值,同时,铁镁等重矿物含量降低,岩石的导电性变差,电阻率呈高值异常。利用这些特点并结合中子、密度和声波时差等曲线的特征(表 4)可以进行有效的岩性识别,当然,也可以利用测井交会图法和聚类分析等方法对岩性进行认识(陈建文和魏斌,2000;赵建和高福红,2003)。

由于欧利坨子火山岩具有多期次性、累计厚度大等特点,地震资料受到多次屏蔽作用而品质下降;另一方面,尽管该区的钻孔资料较多,但砂泥岩地层中薄互层发育,对比标志不明显,而火山岩中岩性在纵向上和横向上变化都很大,对比十分困难。针对

上述特点,利用 3700 测井资料的自然伽马、三电阻率和三孔隙度曲线进行精细对比,找到了两组对比标志层,并建立了地层对比剖面,使得火山岩的地质构造更为清晰。在中部有两处构造低点,分别位于欧 28 和欧 48 井附近,尤其是欧 48 井所在的位置是在高背景上形成的圆形陷落,推测可能与火山口的塌陷有关。

4.2 粗面岩的喷发期次

欧利坨子新生代火山岩从房身泡到沙三时期,熔岩中硅和铝的含量逐渐增加,岩石由基性向中性过渡,随着岩浆粘度的增大而流动性变差,熔岩的分布范围越来越有限。由测井资料可知,沙三时期的粗面岩可分为两期喷发:第一期位于沙三段底部,具有厚度小(一般为 15.0~25.0 m)、分布范围广的特点, Si, Al, K 等元素的含量相对较低;第二期位于沙三段上部,粗面岩的厚度大,但分布范围相对较小, K 含量明显增加。有些井(如欧 40, 欧 45 井等)只钻遇了第一期粗面岩,而在粗面岩体的边缘处(如欧 52, 欧 15 等井),两期粗面岩呈不连续状态。从粗面岩的厚度等值线图(图 6)可以看出,粗面岩的主体呈弧形分布在中部,部分沿南西方向向构造的低部位延续。

表 4 欧利坨子地区火山岩的测井特征值

Table 4 The typical values of well logging for volcanic rocks from Oulituzi

岩性	GR (API)	Rt ($\Omega \cdot \text{m}$)	AC ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	DEN (g/cm^3)	CNL (%)	SP (mV)
粗面岩	100.0~155.0	30.0~650.0	56.0~80.0	2.35~2.65	6.0~24.0	负异常或无异常
玄武岩	30.0~37.0	6.0~50.0	55.0~80.0	2.50~2.70	18.0~35.0	无异常
凝灰岩	16.0~50.0	5.0~12.0	80.0~90.0	2.20~2.50	30.0~50.0	无异常
安山岩	37.0~130.0	18.0~90.0	60.0~70.0	2.55~2.70	7.0~23.0	负异常或无异常

注:GR - 自然伽马, Rt - 电阻率, AC - 声波时差, DEN - 密度, CNL - 补偿中子, SP - 自然电位。

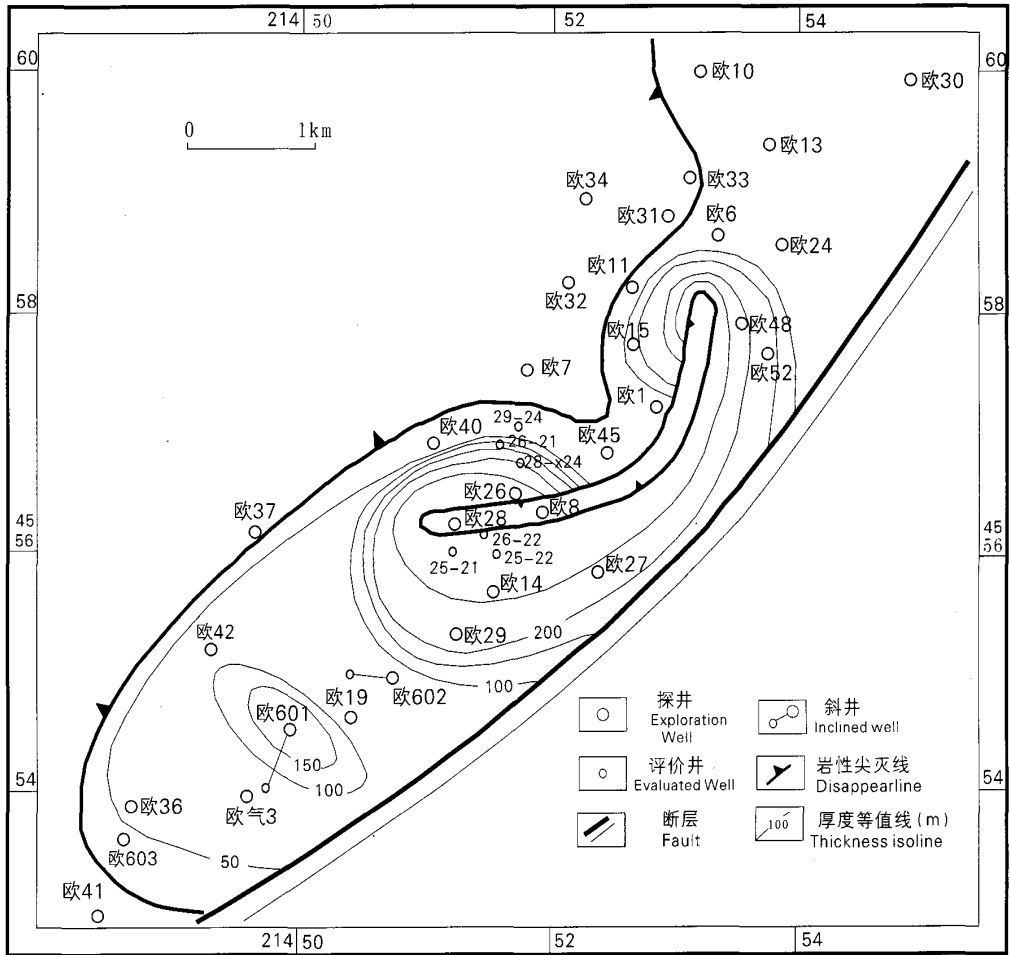


图6 欧利坨子粗面岩的厚度等值线图

Fig. 6 The thickness isopleth of trachyte from Oulituozhi

4.3 火山口的特征

郭克园等(2002)认为欧利坨子有两个喷发中心,分别在欧8井区和欧15井区西北侧。地震资料表明,欧15井区西北侧为一弱反射区,其水平切片的反射相位与外侧呈不整合接触,因此,吴昌志等(2004b)也认为欧15井区附近应为一火山喷发中心。研究表明,在粗面岩体的中部存在一条弧形的尖灭条带,经欧28井、欧8井一直到欧48井附近,长度在3.5 km以上。欧28井和欧8井钻遇了巨厚的火山角砾岩和凝灰岩,而欧45井和欧1井中也以大段的凝灰岩为主,粗面质岩类的厚度非常有限。这说明中部粗面岩的尖灭带就是该区裂隙式火山口的位置,原因主要有以下三个方面:(1)从喷发次序和熔岩的类型来看,自下而上依次为玄武岩—粗面

岩—玄武岩,东营时期的玄武岩喷发之后,火山颈中仍然残留着玄武岩和因混染而形成的凝灰岩,所以在粗面岩体中出现了玄武岩和凝灰岩形成的带状分布。(2)火山口的裂隙形状同粗面岩主体的分布形态一致,在火山裂隙的两端粗面岩呈圆形分布,中间则呈弧形分布于南侧。(3)把粗面岩的厚度等值图和构造特征结合起来,发现在火山口的两端熔岩喷发尤为强烈,并在晚期塌陷形成了破火山口,这与地层对比结果是一致的。该区东侧的界西断层是控盆的深大断裂,在火山喷发过程中这条深大断裂也在频繁地活动,断距不断加大,下盘的地层倾角逐渐增加。在地层产状变化的同时,火山裂隙的角度也随之改变,从而导致喷溢出的熔岩主要堆积在南侧,而不是沿裂隙呈对称分布。

5 富钾质火山岩的成因探讨

火山岩与盆地的构造环境有着密切的关系(Yin & Nie, 1993; 金强等, 1998; 张云银, 2003)。富钾质火山岩的成因一直是学者们探讨的热点问题, 目前趋于一致的认识是富钾质岩浆源的形成需要地幔和地壳物质的共同参与, 同俯冲作用有着密切的关系。富钾火山岩按产出的构造环境可分为陆弧(continental arcs)、后碰撞弧(postcollisional arcs)、初始洋弧(initial oceanic arcs)、晚期洋弧(late oceanic arcs)和板内(within-plate settings)五种类型(Muller et al., 1992, 1995)。在这些类型中, 只有板内钾质火山岩似乎与俯冲作用无明显关系, 但岩浆源区也可能受到过古俯冲事件的影响。

Wilson (1963) 通过对夏威夷群岛(Hawaiian Islands)和帝王海山群(Emperor Seamounts)火山链的研究, 首次将火山链的排列方向和太平洋板块的运动联系起来, 在 38.6 ~ 43.4 Ma 太平洋板块的运动方向由 NNW 向转为 NWW 向。这一转向时间与欧利坨子钾质火山岩的形成时间非常吻合, 也正是这一时期, 太平洋板块、印度板块同亚洲大陆之间的相互作用, 使郯庐断裂由左旋走滑变为右旋走滑, 形成了辽河盆地最大的张裂期(侯贵廷和钱祥麟, 1998; 肖尚斌等, 2000; 孙红军, 2002), 由此可见, 始新世中晚期洋壳的俯冲作用所产生的弧后扩张效应是渤海湾盆地形成“被动型裂谷”的动力来源(何海清等, 1998)。这一时段也正是中国东部由板缘向板内环境的转折期。事实上, 辽河盆地新生代的火山岩以碱性系列为主, 少数为钙碱性和拉斑系列, 是裂谷期岩石圈伸展作用的产物。欧利坨子粗面岩的地球化学特征如 Eu 的负异常、Sr 的强亏损、Nb 和 Zr 的富集等表明它不是下地壳部分熔融成因(Deng et al., 1998), 而很可能是玄武岩岩浆经过大比例分离结晶作用的产物, 它受地壳的混染作用不明显(吴昌志等, 2004a)。根据同时期的碱性玄武岩具有较明显的 EM 及 DMMB 属性, 推测这些火山岩可能与晚中生代太平洋板块俯冲残片的部分熔融有关(吴昌志等, 2005)。

6 结论

(1) 欧利坨子粗面岩形成于早第三纪沙三时期(38.0 ~ 43.0 Ma), 其分布受火山裂隙控制, 同时也

受区域的断裂活动影响, 火山裂隙呈弧形位于欧利坨子背斜构造带上, 其两端喷发强烈, 晚期塌陷形成了破火山口。

(2) 该地区的粗面岩具有富碱($K_2O + Na_2O = 10.22\% \sim 12.47\%$)、富钾($K_2O/Na_2O = 0.69 \sim 1.88$)、高铝($Al_2O_3 = 17.82\% \sim 19.44\%$)和低钛($TiO_2 = 0.19\% \sim 0.67\%$)的特点, 属于钾玄岩系, 稀土配位曲线为轻稀土富集的右倾型, 负铷异常。Nb 的正异常及较低的 Y/Nb 比值(0.16 ~ 0.23), 以及 Zr 的正异常和高 Zr/Y 比值(26.2 ~ 40.1)表明岩石可能形成于板内环境。

(3) 欧利坨子粗面岩的形成正处于太平洋板块的运动方向由 NNW 到 NWW 的转折时期(38.6 ~ 43.4 Ma), 是裂谷期岩石圈伸展作用的产物。欧利坨子富钾质火山岩的形成可能与晚中生代太平洋板块俯冲残片的部分熔融有关。

致谢: 成文过程中得到北京大学侯贵廷副教授和南京大学顾连兴教授的指导和帮助, 在此表示感谢。

参考文献 [References]:

- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Henderson P ed., Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 63 - 114.
- 陈文寄, 李大明, 李齐, 等. 1992. 下辽河裂谷盆地玄武岩的年代学与地球化学. 见: 刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 44 - 80.
- [Chen Wenji, Li Daming, Li Qi, et al. 1992. The age and geochemistry of basin basalt at Xiaohahe rift. In: Liu RX eds. The Age and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China. Beijing: Seismological Publishing House, 44 - 80 (in Chinese with English abstract)]
- 陈建文, 魏斌. 2000. 火山岩岩性的测井识别. 地学前缘, 7(4): 458 - 459.
- [Chen Jianwen, Wei Bin. 2000. Well logging identification of volcanic rocks. *Earth Sci. Frontier*, 7(4): 458 - 459 (in Chinese with English abstract)]
- 从柏林, 郭敬辉, 刘文军. 2001. 一个残留的地幔楔: 来自华北早第三纪火山岩的证据. 科学通报, 46(21): 1825 - 1830]
- [Cong B L, Guo J H, Liu W J. 2001. A possible relict mantle wedge: geochemical evidence from Paleogene volcanics in North China. *Chinese Sci. Bull.*, 46(22): 1917 - 1922]
- 蔡国刚, 张坤, 刘立, 等. 2003. 辽河盆地东部凹陷中部火山岩储层特征研究. 海洋石油, 2: 32 - 37.
- [Cai Guogang, Zhang Kun, Liu Li, et al. 2003. The reservoir characteristics of the middle section volcanic rock of the Eastern Sag on Liaohhe Basin. *Marine Petroleum*, 2: 32 - 37 (in Chinese with English abstract)]
- Deng J F, Luo Z H, Zhao H L, et al. 1998. Trachyte and syenite: petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium. In: Department of Geology, Peking University (ed.). Collected Works

- of International Symposium on Geological Sciences held at Peking University, Beijing, China, 1998. Beijing: Seismological Press, 745-757.
- Foley S F, Peccerillo A, 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181-185.
- 郭克园, 蔡国刚, 罗海炳, 等. 2002. 辽河盆地欧里坨子地区火山岩储层特征及成藏条件. *天然气地球科学*, 13(3-4): 60-66.
- [Guo Keyuan, Cai Guogang, Lou Haibin, et al. 2002. Volcanic rock features and oil formation conditions in Oulituozhi area of Liaohé Basin. *Natural Gas Earth Sci.*, 13(3-4): 60-66 (in Chinese with English abstract)]
- 侯贵廷, 钱祥麟. 1998. 渤海湾盆地形成机制研究. *北京大学学报(自然科学)*, 34(4): 503-509.
- [Hou Guiting, Qian Xianglin. 1998. The formation mechanism of Bohai Basin. *Jour. Peking Univ. (Natural Sci.)*, 34(4): 503-509 (in Chinese with English abstract)]
- 何海清, 王兆云, 韩品龙. 1998. 华北地区构造演化对渤海湾油气形成和分布的控制. *地质学报*, 72(4): 313-322.
- [He Haiqing, Wang Zhaoyun, Han Pinlong. 1998. Tectonic control on the formation and distribution of oil-gas pools in the Bohai Bay Basin of North China. *Acta Geol. Sinica*, 72(4): 313-322 (in Chinese with English abstract)]
- 金强, 熊寿生, 卢培德. 1998. 中国断陷盆地主要生油层中的火山活动及其意义. *地质评论*, 44(2): 136-142.
- [Jin Qiang, Xiong Shusheng, Lu Peide. 1998. Volcanic activity in major source rocks in faulted basins of China and its significance. *Geol. Review*, 44(2): 136-142 (in Chinese with English abstract)]
- 刘立, 谢文彦, 郭克园, 等. 2002. 辽河盆地东部凹陷北段构造样式形成机制. *地质力学学报*, 8(3): 265-271.
- [Liu Li, Xie Weiyan, Guo Keyuan, et al. 2002. The formation mechanism of the structure styles of the northern section of Eastern Sag in Liaohé Basin. *J. Geomechanics*, 8(3): 265-271 (in Chinese with English abstract)]
- 梁鸿德, 申绍文, 刘香婷, 等. 1992. 辽河坳陷火山岩地质年龄及地层时代. *石油学报*, 13(2): 35-41.
- [Liang Hongde, Sheng Shaowen, Liu Xiangting, et al. 1992. The age of the volcanic rocks and their geological time in Liaohé depression. *Acta Petroleum Sinica*, 13(2): 35-41 (in Chinese with English abstract)]
- 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因. *地学前缘*, 10(3): 191-200.
- [Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong. 2003. Deep subduction of crust materials and its implication to the genesis of potash-rich volcanic rocks. *Earth Sci. Frontier*, 10(3): 191-200 (in Chinese with English abstract)]
- Muller D, Groves D I. 1995. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization, Berlin: Springer-Verlag, 1-144.
- Muller D, Rock N M S, Groves D I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: A pilot study. *Mineral. Petrol.*, 46: 259-289.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33-47.
- Rollinson H. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group Limited. 343p.
- 孙红军. 2002. 中新世辽河盆地区域应力场变化及其成因. *古地*
- 理学报*, 4(4): 61-69.
- [Sun Hongjun. 2002. Variation and genesis of regional stress field of Liaohé Basin in Meso-Cenozoic. *J. Palaeogeography*, 4(4): 61-69 (in Chinese with English abstract)]
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313-345.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. 1996. Post-collisional, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts, *J. Petrol.*, 37: 45-71.
- Wilson J T. 1963. Continental drift. *Scientific American*, 208: 86-100.
- 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 2004a. 辽河盆地沙三期火山-侵入岩地球化学与岩石成因. *岩石学报*, 20(3): 545-556.
- [Wu C Z, Gu L X, Ren Z W, et al. 2004a. Geochemistry and petrogenesis of Eocene volcanic-intrusive rocks in Liaohé basin, northeastern China. *Acta Petrol. Sinica*, 20(3): 545-556 (in Chinese with English abstract)]
- 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 2004b. 辽河盆地粗面斑岩成因及其构造环境. *南京大学学报(自然科学)*, 40(3): 267-278.
- [Wu Changzhi, Gu Liangxing, Ren Zuowei, et al. 2004b. Petrogenesis and tectonic environment of Eocene trachyte porphyry in Liaohé basin, northeastern China. *J. Nanjing Univ. (Natural Sci.)* 40(3): 267-278 (in Chinese with English abstract)]
- 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 2005. 板缘向板内环境的过渡——辽河盆地古近纪玄武岩地球化学. *中国科学(D辑)*, 35(2): 115-126.
- [Wu C Z, Gu L X, Ren Z W, et al. 2005. Transition from intraplate to interplate - Geochemistry of Eocene basalts in Liaohé basin. *Sci. in China (Ser. D)*, 35(2): 115-126 (in Chinese)]
- 肖尚斌, 高喜龙, 姜在兴, 等. 2000. 渤海湾盆地新生代的走滑活动及其石油地质意义. *大地构造与成矿学*, 24(4): 321-328.
- [Xiao Shangbin, Gao Xilong, Jiang Zaixing, et al. 2000. Cenozoic dextral strike-slip motion in Bohai Bay Basin and its meaning to petroleum geology. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(4): 321-328 (in Chinese with English abstract)]
- 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 1999. 辽河盆地火山岩与油气. 北京: 石油工业出版社, 1-101.
- [Zhao Conglin, Meng Weigong, Jin Chunshuang, et al. 1999. Hydrocarbon and Volcanics. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-101 (in Chinese with English abstract)]
- 赵建, 高福红. 2003. 测井资料交会图法在火成岩岩性识别中的应用. *世界地质*, 22(2): 136-140.
- [Zhao Jian, Gao Fuhong. 2003. Application of crossplots based on well log data in identifying volcanic lithology. *Global Geol.*, 22(2): 136-140 (in Chinese with English abstract)]
- 张云银. 2003. 郯庐断裂带含油气性研究. *石油实验地质*, 25(1): 28-32.
- [Zhang Yunyin. 2003. A study of hydrocarbon-bearing characteristics in the Tancheng-Lujiang fault zone. *Petroleum Geol. Experiments*, 25(1): 28-32 (in Chinese with English abstract)]
- Yin A, Nie S Y. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and 17 Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801-813.

The Characteristics and Genesis of Potassic Volcanic Rocks from the Oulituozi Area, Liaohe Basin

ZHANG Jian-long^{1,2}, JIANG Shao-yong¹, BAI Yu-ying³, SUN Na², WANG Rui²

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Sub-company, Panjin, Liaoning 124010, China;

3. The Mud Logging Company of Liaohe Oilfield, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: Oulituozi, where the fierce volcanic activities occurred in Eocene of Cenozoic, is located in the middle eastern sag of Liaohe Basin. The main lithologies are basalt, trachyte and tephra. It is shown in this study that the crater is in the central part of the area, and belongs to fissure eruption type. The eruptional intensities were strong at the two ends that turned to calderas at a later time. The tehyte, formed during the time of ES₃ (38.0 ~ 43.0 Ma) and with better stored property for oil and gas, has the characters of high alkalis ($K_2O + Na_2O = 10.22\% \sim 12.47\%$), high potassium ($K_2O/Na_2O = 0.69 \sim 1.88$), high aluminium ($Al_2O_3 = 17.82\% \sim 19.44\%$) and low titanium ($TiO_2 = 0.19\% \sim 0.67\%$), and belongs to the typical shoshonite series. The distribution of tehyte was controlled by the volcanic fissures and affected by regional structures and faults. During the time of the tehyte eruption, some important events took place in East China, such as Pacific Plate changed its moving direction from NNW to NWW, Tanlu fault shifted its movement from left-lateral slip to right-lateral slip, Liaohe rift valley formed to its greatest extent. During these events, the potassic volcanic rocks of Oulituozi were produced during extension stage of the rift with subsequent fractional crystallization and derived from basaltic magma. The genesis of the volcanic rocks possibly had a close relation with partial melting of the subducted slab of Pacific Plate oceanic crust.

Key words: potassic volcanic rocks; eruption mode; geochemistry; well logging; Liaohe basin

