

U-Pb Zircon Dating of the Mesozoic Welded Pyroclastics in the QG2 Well and Its Geological Significance

Bairong Song, Hongdou Han, Pengchao Guo

Exploration and Development Research Institute, Liaohe Co. Ltd., Petrochina, Panjin
Email: songbr@petrochina.com.cn

Received: Jun. 2nd, 2012; revised: Jun. 28th, 2012; accepted: Jul. 11th, 2012

Abstract: The QG2 Well drilled into a suite of volcanic rocks with good oil-bearing property, which is located in Qijia buried hill, the western sag of Xialiaohe Concave. According to the results of petrography and geochemistry, this suite of volcanic rocks is identified as a suit of classical acid calcareous rock of crust source type, a lava tuff breccia with explosive faces. However, there has been a long debate on the formation age and stratum layer of this suite of volcanic rocks. Based on the regional geological data, it is previously classified into Yixian Formation of Early Cretaceous, but lack of precise chronological evidence. In order to accurately determine its formation age and stratum layer, we performed LA-ICP-MS. Our results indicated that this suite of volcanic rocks was formed at 168.9 ± 1.1 Ma in the period of Middle Jurassic, which is comparable to Tiaojishan Formation in Jianchang Basin of Western Liaoning Province, Chende Basin of Hebei Province, Malan Village of Western Hills of Beijing. So its stratum was defined as Tiaojishan Formation. The result revised the stratigraphical division of this suite of volcanic rocks. This opens the door for further study the distribution of oil and gas in this type of volcanic rocks.

Keywords: Xialiaohe Depression; Berried Hill; Mesozoic Welded Pyroclastics; Zircon; Age; Geochemistry; Strata

QG2 井熔结火山碎屑岩锆石定年及其地质意义

宋柏荣, 韩洪斗, 郭鹏超

中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 盘锦
Email: songbr@petrochina.com.cn

收稿日期: 2012 年 6 月 2 日; 修回日期: 2012 年 6 月 28 日; 录用日期: 2012 年 7 月 11 日

摘要: 辽河拗陷西部凹陷齐家潜山的 QG2 井钻遇一套含油性较好的火山岩, 通过岩石学和地球化学特征研究, 认为是一套典型的壳源酸性钙性岩类, 确定为爆发相的熔结角砾凝灰岩。该套火山岩形成时代和地层归属一直存在较大分歧, 当时根据区域资料将其归为中生界早白垩纪义县组, 但缺乏精确的年代学证据。为了进一步确定该套火山岩的形成时代和地层层位, 笔者先是利用 LA-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 定年方法, 获得了熔结角砾凝灰岩的喷发年龄为 168.9 ± 1.1 Ma, 喷发时代为中生代中侏罗世, 与辽西建昌盆地、河北承德盆地以及北京西山马兰村的鬃髻山组的火山岩在形成时代和岩性特征上具有可比性, 因此, 该套火山岩地层层位确定为鬃髻山组, 修正了以往对该套火山岩地层归属的观点, 为下一步研究该类火山岩油气藏的空间展布奠定了基础。

关键词: 辽河拗陷; 潜山; 熔结火山碎屑岩; 锆石; 年代; 地球化学; 地层

1. 引言

QG2 井位于辽河拗陷西部凹陷西斜坡南段齐家潜山带。该井所揭示的地层序列由上至下为新生界新

近系馆陶组、古近系东营组、沙河街组、防身泡组、中生界和新太古界。新生界除了防身泡组为大套玄武岩外, 其余皆为碎屑岩沉积地层, 其中沙河街组三段

与四段是连续沉积，为西部凹陷第一主力生油层^[1]。该井钻遇厚度达 680 m 的中生界酸性火山碎屑岩，其下部为新太古界混合杂岩。区域资料表明，华北克拉通中生代燕山期以强烈的构造 - 岩浆活动、成矿作用和盆地形成过程，而明显不同世界上其他国家太古宙克拉痛^[2]，因此，中生代时期中国东部火山岩广泛分布^[3-5]。辽河拗陷西部凹陷的钻井资料也表明，中生界火山岩发育，而且，在本区以中酸性的火山熔岩、火山碎屑岩为主，局部地区发育基性玄武岩。前人根据古生物化石组合对本区中生代地层进行划分，认为主要为白垩系地层，缺失侏罗系和三叠系地层。白垩系由上向下进一步划分为晚白垩统孙家湾组、早白垩统阜新组、沙海组和义县组。孙家湾组、阜新组和沙海组为正常的沉积地层，而义县组以火山熔岩和火山碎屑岩为主。而对本区钻遇的该套火山岩，详细的研究甚少，且缺少古生物化石资料及年代学证据，致使该套其地层的确定及详细划分极为困难。该区火山岩年代学研究资料较少，台 10 井中生界玄武岩 K-Ar 同位

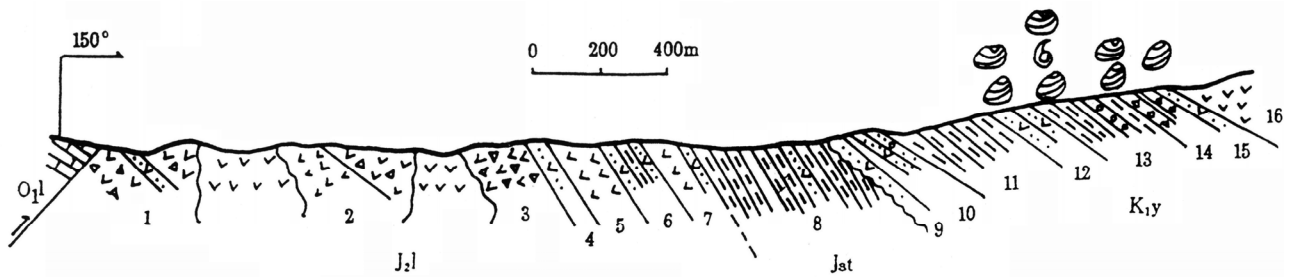
素年龄为 114.3 ± 0.55 Ma(陈文寄等, 1992)，坨 32 井流纹岩 K-Ar 同位素年龄为 97 ± 1.4 Ma(赵海玲等, 2003)，兴隆台潜山火山岩局部采用全岩 Rb-Sr 测得全岩年龄为 (140.49 ± 0.202) Ma^[6]，其余井钻遇的火山岩基本没有年代学资料。

辽河拗陷周边辽西等地区中生代时期地层发育较齐全(表 1)，其中的髫髻山组为冀北 - 辽西地区过去的蓝旗组，2000 年地层会议规定，髫髻山与蓝旗两组同层位的火山岩，以后统一用髫髻山组一个名称。1:20 万或其他老资料可根据喀左县谷家岭剖面(图 1)、喀参 1 来对比划分。

辽河拗陷内部中生界地层与周边辽西等地区是否具有可比性，是一个值得研究和探讨的问题。2006 年以后，辽河拗陷太古宇潜山内幕勘探获得重大突破，在西部凹陷的兴隆台潜山带中生界和新太古界地层发现亿吨级储量规模，对基岩潜山地层研究也越来越重视，开展太古宇基底岩石和中生代火山岩年代学研究显得极其重要，采集了大量钻井岩心、岩屑样品，

Table 1. Mesozoic stratum brief table of Western Liaoning
表 1. 辽西地区中生界地层简表

界	系(统)	组名	岩性	厚度 m	
新生界	第四系		冲积物, 洪积物, 残、坡积物	>10	
	第三系		砂砾岩、粉砂岩、砂质粘土	57~80	
	上统	孙家湾组	砂砾岩夹砂页岩	378.5~956	
白垩系		阜新组	砂砾岩、砂页岩夹煤层	415~2343.9	
		沙海组	砂岩、泥页岩夹煤层	357~827.56	
	下统	九佛堂组	页岩、粉砂岩夹油页岩	206.3~2685.1	
		义县组	玄武岩、安山岩、页岩、火山角砾岩夹正常碎屑沉积岩, 底部为复成分砾岩	713~1500	
	上统	张家口组	英安岩或流纹岩、凝灰岩夹凝灰质粉砂岩、页岩	495~1798	
中生界		土城子组	砂岩、砾岩、页岩	384~2623.7	
	侏罗系	中统	髫髻山组	玄武岩、安山岩夹砾岩、熔结凝灰岩、砂岩	132~1935
			海房沟组	砂岩、页岩、砾岩	653.7
		下统	北票组	页岩、砂岩、砾岩夹煤层	353~1312
		兴隆沟组	玄武岩、安山岩、角砾熔岩	181~403.3	
	上统	老虎沟组	砂岩夹页岩及煤层	68.1~400	
	三叠系	中统	后富隆山组	凝灰岩、页岩、砾岩	3.8~63.4
下统		红砬组	砂岩夹页岩、砾岩	40~520	



中侏罗统髫髻山组(J₂t): 1. 安山质集块岩夹凝灰质粉砂岩; 2. 安山岩; 3. 安山质集块熔岩; 4. 凝灰质砂岩; 5. 安山岩; 6. 粉砂质页岩夹凝灰岩; 7. 安山岩。上侏罗统土城子组(J₃t): 8. 粉砂质页岩夹凝灰岩。早白垩统义县组(K₁y)中、下部: 9. 凝灰质砂岩; 10. 凝灰质粉砂岩夹灰质中砾岩; 11. 粉砂质薄层页岩夹中砾砂岩, 产叶支介; 12. 凝灰质砂岩夹粉砂质页岩, 产双壳类; 13. 粉砂质页岩夹薄层砾质凝灰岩, 产双壳类; 14. 凝灰岩夹页岩。产双壳类; 15. 凝灰岩夹粗粒凝灰质砂岩, 产双壳类; 16. 安山岩。

Figure 1. Curve: Gujialing profile of Kazuo county of Western Liaoning
图 1. 辽西喀左县谷家岭剖面

利用 LA-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 定年方法, 对本区大量的火山岩、变质岩进行了年龄测定, 取得了大量的年代学研究成果, 同时对中生界火山岩地层有了新的认识和发现, 进一步指导了该区的勘探开发工作和储量申报工作。

2. 地质背景及样品选取

辽河拗陷在构造上属于华北地台, 东临辽东地块, 西部为燕辽沉降带。辽河拗陷基底为华北克拉通的一部分^[7], 是一个叠置于华北地台之上的第三纪大型断陷-拗陷盆地。基地构造则分属华北地台三个不同构造单元。西部凹陷属于燕辽台皱带的一部分。中元古代以前北东向展布的山海关-清源古隆起构成了辽河拗陷基底最老的深变质岩构造层。基底主要为太古宇混合杂岩。燕山构造运动以拉张断陷作用为主, 西斜坡发育了一系列北东向展布的西掉深大断裂切割凹陷基底, 并形成一系列古地貌的单面山。伴随着裂谷演化, 受次一级断层分割形成一系列断块山。潜山顶面具有北高南低, 西高东低的特点。

早期发育的北东向西掉正断层将西部凹陷西斜坡地区的前中生界分为高、中、低三个潜山带, 各潜山带受局部断层控制, 又形成多个相对独立的潜山圈闭。齐家潜山位于中潜山带上, 齐家潜山带自南向北由三个大小不等的山头构成。南山头、中山头的储层以太古宇变质岩为主, 北山头太古宇上部为中生代时期形成的火山熔岩和火山碎屑岩, QG2 井位于北部山头(图 2), 中生代钻遇厚度达 680 米的熔结火山碎屑岩。由于本次研究样品为钻孔样品, 受钻探程度影响, 同层位火山岩横向对比不易, 研究样品主要选择 QG2

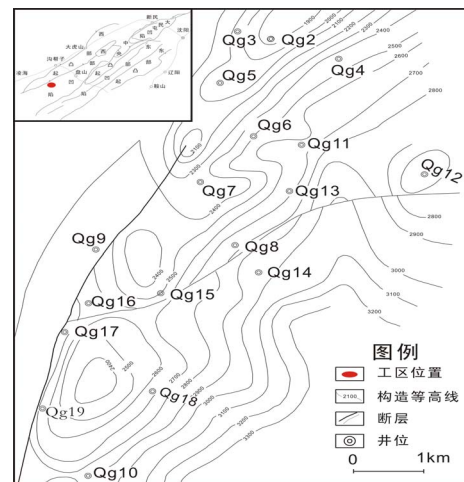


Figure 2. Curve: the QG2 Well exploration deployment in Qijia buried hill, the western sag of Xiaoliaohe Concave
图 2. 辽河拗陷齐家潜山 QG2 井勘探部署

井。QG2 井钻遇熔结火山碎屑岩井段为 1880~2560 m, 在 1900.84~1903.84 m、1907.08~1914.0 m、1915.08~1931.92 m、2231.35~2232.05 m、分别进行了钻井取心, 总心长 25.6 m。本次测试的样品选自 1915.08~1931.92 m 取心井段 4 个样品, 深入研究工作应在此基础上进行。

3. 岩石学及地球化学特征

岩石为灰色, 主要为一套熔结角砾凝灰岩, 熔结岩屑凝灰岩(图 3), 含少量围岩砾石, 为石英砂岩。样品选取深度岩石较新鲜, 蚀变较轻。岩石碎屑成分主要为酸性岩岩屑、塑变玻屑、长石晶屑、火山尘等, 碎屑具定向拉长特征, 构成假流纹构造。X-衍射全岩分析(表 2, 图 4), 矿物成分石英平均 51.2%, 斜长石平均 27.8%, 钾长石平均 6.2%, 粘土总量 10.1%(包括

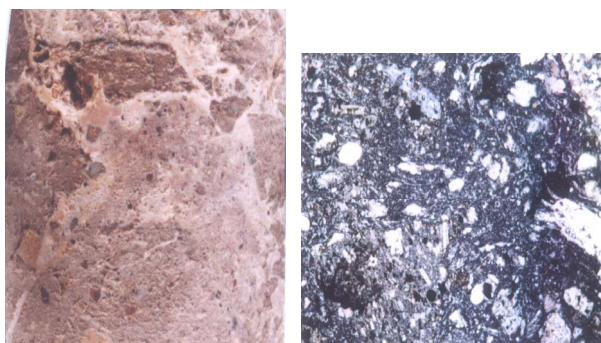


Figure 3. Curve: macroscopic and microscopic features of a lava tuff breccia, the QG2 Well (1952.0 m)

图 3. QG2 井熔结角砾凝灰岩宏微观特征(左岩心, 右微观照片, 1952.0 m)

Table 2. Mineral content of analysis of mineral components of rock by X-ray diffraction (%)

表 2. X 衍射全岩分析矿物含量(%)

样品编号	粘土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石
QG2-001	13.8	54.6	5.6	24.7	0	1.3
QG2-002	4.9	48.1	4.8	34.0	5.3	2.9
QG2-003	12.2	53.0	6.5	22.8	1.4	4.1
QG2-004	9.6	49.5	7.6	29.7	2.1	1.5
平均	10.1	51.3	6.2	27.8	2.2	2.5

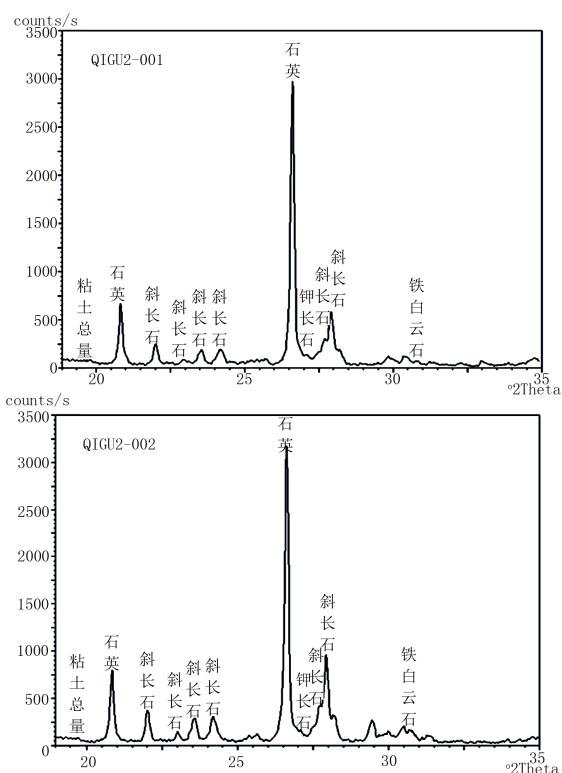


Figure 4. Curve: chart characteristics of analysis of mineral components of rock by X-ray diffraction

图 4. X-衍射全岩分析谱图特征

玻璃质和一些蚀变暗色矿物等), 方解石平均 2.2%, 白云石平均 2.5%, 其中的方解石和白云石为后期交代成因或裂缝充填物。岩石地球化学特征(表 3)表明, SiO_2 含量约为 70%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 5.18%~7.0%, 平均为 6.0%; 里特曼指数 1.0~1.7, 为典型的酸性钙性岩, 结合岩相学特征定名为英安质熔结角砾凝灰岩。稀土元素配分曲线(图 5), 具有 LREE 富集、REE 组成模式向右倾斜的特点, $(\text{La}/\text{Yb})\text{N} > 1$ 、 δEu 小于 1, Eu 负异常等特点, Eu 负异常为岩浆经过斜长石的结晶分离作用而导致残余熔浆中 Eu 亏损造成的。微量元素原始地幔标准化从曲线(图 6), 可以看出, 熔结角砾凝灰岩表现出明显的 Nb、Ta、P、Ti 负异常和 Pb 正异常等典型的大陆地壳特征。

岩心观察该套火山碎屑岩碎屑粒间孔隙、残余气孔、溶孔较发育, 孔隙中普遍含油, 另外该套岩石紧邻清水洼陷, 油源条件较好, 沙三段、沙四段巨厚暗色泥岩, 即可作为良好的烃源岩, 又可作为良好的区域盖层, 为油藏的形成创造了条件, 因此, 对该套岩石形成时代、岩性特征及分布规律研究为寻找该类油气藏具有重要的指导意义。

4. 定年分析方法

将重量约为 10 Kg 的样品送到了河北地质局廊坊实验室进行了锆石分离, 首先是将样品破碎, 粉碎粒度的原则是以不破坏所含锆石的晶体形态为标准, 对于火山凝灰岩来说则通常碎到 80 目^[8], 随后经过摇床、淘洗及电磁分选分离出锆石, 而后在双目镜下挑出具有代表性的锆石颗粒, 镶嵌在环氧树脂中并抛光至锆石颗粒的一半, 然后进行锆石的光学、CL 显微图像及 LA-ICPMS 分析。其中, 锆石的分选在河北地勘局廊坊实验室完成; 投射光、反射光照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室 Nikon 显微镜下完成; CL 图像分析在该实验室的 Gatan 阴极发光 MonoCL3 + 及 Quanta400FEG 热场发射环境扫描电子显微镜下完成; 锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室最新引进的 Hewlett Packard 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilent7500a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上完成。激光束斑直径为 30 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm , 详细分

QG2 井熔结火山碎屑岩锆石定年及其地质意义

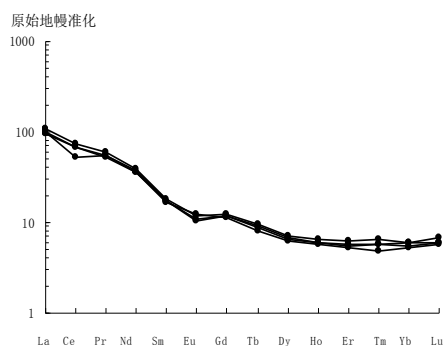


Figure 5. Curve: distribution diagram of rare earth elements of a lava tuff breccia
图 5. 熔结角砾凝灰岩的稀土元素分配图

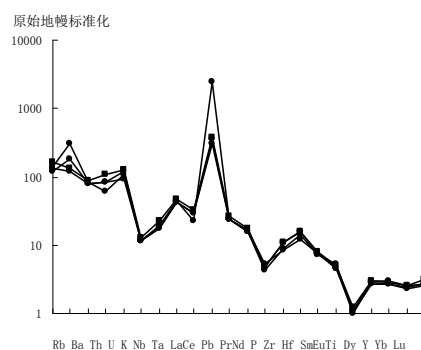


Figure 6. Curve: distribution diagram of trace elements of primitive mantle of a lava tuff breccia
图 6. 熔结角砾凝灰岩的原始地幔微量元素分配图

Table 3. Geochemical composition of a lava tuff breccia, the QG2 Well
表 3. QG2 井熔结角砾凝灰岩地球化学成分

样品号	QG2-001	QG2-002	QG2-003	QG2-004	样品号	QG2-001	QG2-002	QG2-003	QG2-004
SiO ₂	69.87	71.37	70.52	68.02	Ti	1320	1560	1380	1440
Al ₂ O ₃	11.2	13.43	12.03	12.29	Dy	2.11	2.25	1.98	2.21
CaO	4.55	1.32	1.41	3.32	Y	12.79	13.60	12.38	13.91
FeO	0.58	1.07	1.17	0.67	Yb	1.16	1.24	1.10	1.23
Fe ₂ O ₃	0.59	1.42	1.72	1.49	Lu	0.20	0.23	0.19	0.20
K ₂ O	3.56	3.66	3.2	2.67	La	31.50	33.44	30.51	29.96
MgO	0.36	0.99	1.08	1.25	Ce	42.43	60.37	55.27	54.02
Na ₂ O	1.62	3.34	2.87	3.26	Pr	6.72	7.21	6.61	6.53
MnO	0.08	0.09	0.14	0.06	Nd	22.33	23.63	21.75	21.59
P ₂ O ₅	0.11	0.1	0.09	0.1	Sm	3.42	3.58	3.23	3.37
TiO ₂	0.22	0.26	0.23	0.24	Eu	0.81	0.86	0.90	0.76
烧失量	6.14	1.89	4.02	5.22	Gd	3.03	3.21	2.95	3.07
总量	98.88	98.94	98.48	98.59	Tb	0.41	0.45	0.39	0.44
Rb	90.87	113.14	96.05	82.36	Dy	2.11	2.25	1.98	2.21
Ba	806.1	895.6	2060	1254	Ho	0.43	0.46	0.41	0.43
Th	7.06	7.89	7.29	7.08	Er	1.18	1.29	1.11	1.23
U	1.79	2.26	1.31	1.73	Tm	0.19	0.21	0.16	0.19
Nb	8.53	9.38	8.53	8.70	Yb	1.16	1.24	1.10	1.23
Ta	0.85	0.96	0.78	0.75	Lu	0.20	0.23	0.19	0.20
La	31.50	33.44	30.51	29.96	Y	12.79	13.60	12.38	13.91
Ce	42.43	60.37	55.27	54.02	ΣREE	128.71	152.03	138.94	139.14
Pb	169.9	26.79	25.22	21.93	ΣLREE	107.21	129.09	118.27	116.23
Pr	6.72	7.21	6.61	6.53	ΣHREE	21.5	22.94	20.67	22.91
Nd	22.33	23.63	21.75	21.59	ΣL/ΣH	4.99	5.63	5.72	5.07
Zr	96.11	119.46	100.98	121.44	(La/Yb)N	18.31	18.18	18.70	16.42
Hf	3.74	4.78	4.25	4.85	(Ce/Yb)N	9.46	12.59	13.00	11.36
Sm	3.42	3.58	3.23	3.37	Eu/Sm	0.15	0.15	0.15	0.16
Eu	0.81	0.86	0.90	0.76	Sm/Nd	3.32	3.28	3.29	3.31
					δEu	0.75	0.76	0.88	0.71

析步骤和数据处理方法参见文献^[9]。

5. 实验结果

5.1. 锆石内部结构

光学及阴极荧光图像(图 7)研究显示,本井区熔结火山碎屑岩的锆石为半自形柱状形态,柱长 200~300 μm 之间,长/宽比值大于 2:1。在阴极发光图像中,显示了明显的振荡环带结构, Th/U 比值大于 0.4, 具有典型岩浆成因锆石的特点^[7], 对它们的定年可准确获得熔结火山碎屑岩喷发年龄。

5.2. 锆石 U-Th-Pb 同位素(锆石 U-Pb 年龄)

锆石的 U-Th-Pb 同位素分析结果(表 2), 根据这些数据所做的 U-Pb 谐和图(图 8)。因岩石形成年龄小于 1100 Ma, 故我们的定年结果采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 进行年龄^[10,11]研究。岩石中 16 个颗粒共进行了 16 个点的分析, 所有数据点集中于谐和曲线上一点, 加权平均年龄为 $166.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$, 为该岩石的喷发年龄。牛宝贵等^[12]获得河北承德盆髻髻山组顶部火山岩的锆石

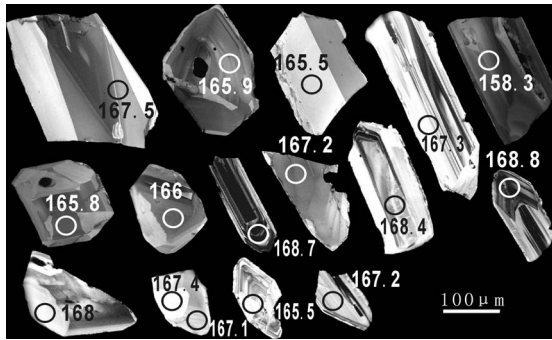


Figure 7. CL image of zircon (unit: Ma)
图 7. 锆石的 CL 图像(单位: Ma)

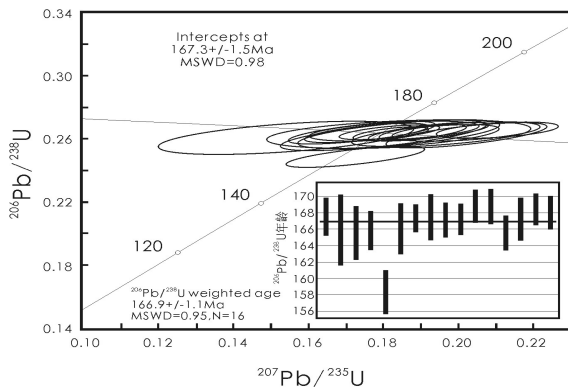


Figure 8. Curve: concordia diagram of U-Pb zircon
图 8. 锆石的 U-Pb 谐和图

U-Pb SHRIMP 年龄为 $163 \pm 6 \text{ Ma}$, 赵越等^[13]获得北京西山马兰村髻髻山组火山岩底部安山岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 $157 \pm 3 \text{ Ma}$, QG2 井钻遇的熔结角砾凝灰岩锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 年龄与河北承德盆地和北京西山马兰村髻髻山组火山岩接近, 因此, 以测年结果为依据, 结合区域对比, 将该套火山岩地层应归属中生界中侏罗系髻髻山组。

6. 地质意义

1) 利用岩相学鉴定、X-全岩分析和地球化学分析等方法, 确定 QG2 井钻遇一套典型的 Nb-Ta 负异常和 Pb 正异常等壳源的酸性英安质熔结角砾凝灰岩, 单颗粒锆石原位 U-Pb 年龄测定, 获得了火山岩的喷发年龄为 $166.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$, 说明辽河拗陷西部凹陷中生代时期的火山喷发从中侏罗纪就已经开始一直延续到晚白垩纪, 丰富了辽河拗陷中生代潜山火山岩研究成果;

2) 该套火山岩以往认为是白垩纪义县组, 通过年代测定及区域对比, 确定该套火山岩地层为中生界中侏罗系髻髻山组, 重新认识了该区中生界地层序列;

3) 该区火山岩处于特殊的大地构造环境, 与油气关系密切, 不同时代不同期次的火山岩由于储层发育特征的差异含油性差别较大, 本此研究的髻髻山组熔结角砾凝灰岩富含油气, 因此, 确定其形成时代、地层层位, 对进一步研究其空间展布及相变特征等具有重要的意义, 可以更加有目标地寻找本区火山岩油气藏, 并有效地指导该区火山岩的勘探部署和储量计算。

参考文献(References)

- [1] 徐同台, 王行信, 张有瑜等. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 石油工业出版社, 2003: 161.
- [2] 袁洪林, 柳小明等. 北京西山晚中生代火山岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究[J]. 地球科学, 2005, 35(9): 821-836.
- [3] 武广, 李忠权, 李之彤. 辽西地区早中生代火山岩地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石, 2003, 23(3): 44-50.
- [4] 史卜庆, 吴智平, 周瑶琪等. 辽西地区中生代义县旋回火山活动特征分析[J]. 高校地质学报, 2002, 4(4): 413-422.
- [5] 郭峰, 范蔚茗, 王岳军等. 华北陆块东部晚中生代基性岩浆作用的地球化学研究[J]. 大地构造及成矿学, 2002, 26(3): 247-254.
- [6] 罗静兰, 梁志刚等. 辽河盆地兴隆台潜山变质岩-火山岩油藏烃类注入史及其成藏模式[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 250.

- [7] 邢志贵. 辽河坳陷太古宇变质岩储层研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 1.
- [8] 修群业, 殷艳杰等. 单锆石定年样品的采集及矿物分选[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(2): 107-109.
- [9] H. L. Yuan, S. Gao, X. M. Liu, H. M. Li, D. Günther and F. Y. Wu. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28: 353-370.
- [10] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [11] W. Compton, I. S. Williams, J. L. Kirschvink, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scal. *Journal of Geological Society of London*, 1992, 149: 171-184.
- [12] 牛宝贵, 和政均, 宋彪等. 张家口组火山岩定年及其重大意义[J]. 地址通报, 2003, 22: 140-141.
- [13] 赵越, 张拴宏, 徐光, 杨振宇等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. 地址通报, 2004, 23: 854-863.