

Basement Lithology Characteristics and Forming Age of Bongor Basin Chad

Mingyu Zhang¹, Bairong Song², Zhibin Tian¹, Naidan Zhang³, Yuhua Shi², Qi Wang¹

¹CNPC Greatwall Drilling Company, Panjin Liaoning

²PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin Liaoning

³Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: 1172139811@qq.com, 734252829@qq.com

Received: Feb. 1st, 2016; accepted: Feb. 20th, 2016; published: Feb. 23rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The basement of the Bongor basin Chad is formed by a set of crystalline basement rocks before the Early Cambrian, which is rich in oil and gas. Therefore, it is more important to study the type of basement rocks and the formation age of the basin. This paper is mainly based on the core observation and description, by identification of rock slice, single grain zircon U-Pb isotope determination, Chad Bongor basin's basement lithology of identification and delineation, and the formation and evolution of era were analyzed. The results show that the lithology is composed of metamorphic rocks and magmatic rocks, which are composed of 14 kinds of 2 sub categories; Single Zircon dating was concentrated in the age of 550 - 600 Ma, the age of metamorphic rocks was mainly concentrated in 616 ± 6 - 526.5 ± 2.7 Ma, the oldest old rock age was 1006 ± 12 - 946 ± 5 Ma, metamorphic age was 553 ± 19 - 464 ± 5 Ma, the age of magmatic rock was mainly concentrated in 621 ± 16 - 525.3 ± 2.5 Ma. Because of the difference of the rock type, nature and the age of formation, the transformation of the geological function and the development of the reservoir are different in the later stage.

Keywords

Chad Bongor Basin, Basement, Metamorphic Rocks, Magmatic Rocks, Zircon, U-Pb Age

乍得Bongor盆地基底岩性特征及形成时代

张明瑜¹, 宋柏荣², 田志彬¹, 张乃丹³, 施玉华², 王奇¹

¹中油长城钻探工程有限公司, 辽宁 盘锦

²中油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦

³长江大学, 湖北 武汉

Email: 1172139811@qq.com, 734252829@qq.com

收稿日期: 2016年2月1日; 录用日期: 2016年2月20日; 发布日期: 2016年2月23日

摘要

乍得Bongor盆地基底为早寒武世之前形成的一套结晶基岩, 该套岩石富含油气, 因此, 对盆地基底岩石类型及形成时代的研究越显重要。本文主要以岩心观察、描述为基础, 采用岩石薄片鉴定、单颗粒锆石U-Pb同位素测定等方法, 对乍得Bongor盆地基底岩性进行鉴定和划分, 并对其形成和演化时代进行分析。结果认为: 岩性为由变质岩和岩浆岩组成的杂岩体, 岩性包括2大类14个亚类; 单颗粒锆石测年年龄集中在550~600 Ma, 变质岩原岩年龄主要集中在 $616 \pm 6 \sim 526.5 \pm 2.7$ Ma, 最老的原岩年龄 $1006 \pm 12 \sim 946 \pm 5$ Ma, 变质年龄在 $553 \pm 19 \sim 464 \pm 5$ Ma, 岩浆岩的年龄主要集中在 $621 \pm 16 \sim 525.3 \pm 2.5$ Ma。由于岩石类型、性质及形成时代的差异, 造成后期地质作用改造和储层的发育程度不同。

关键词

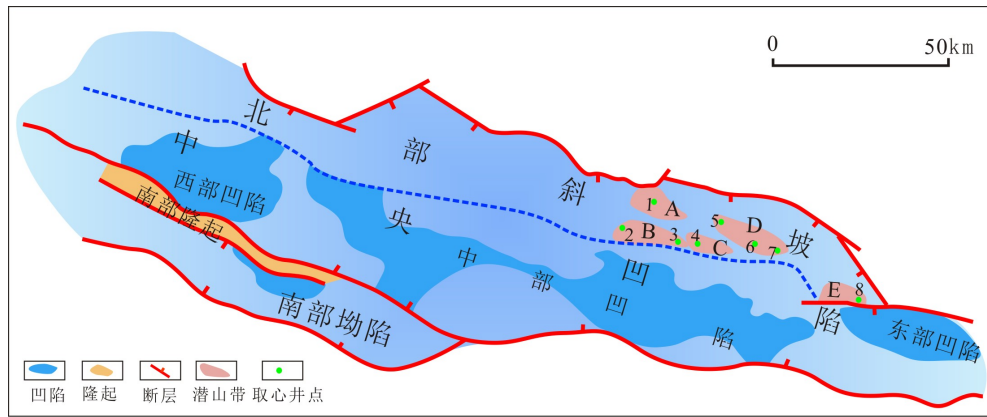
乍得Bongor盆地, 基底, 变质岩, 岩浆岩, 锆石, U-Pb年龄

1. 引言

乍得 Bongor 盆地位于西非裂谷和中非裂谷交汇部位。盆地盖层由中-新生带陆相地层组成, 是一套巨厚的湖湘、河流相及冲积扇碎屑岩沉积, 地层厚度最大达 10 km。盆地基底认为是前寒武系结晶基岩, 但相关的岩石学和年代学研究报道较少[1]。盆地北部斜坡带沉积盖层含丰富油气资源, 很多学者进行了油气成藏的深入研究[2]-[4], 发现了一系列油田并进行了两期产能建设。2013 年以来, 在盆地基底也发现了潜山油气藏, 但目前缺少基底岩石形成时代、岩性、演化及成藏特征深入认识。本文主要以岩心观察、描述为基础, 采用岩石薄片鉴定、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试技术, 首次对盆地北部斜坡带基底岩石岩性及年龄详细研究, 为进一步研究潜山油藏特征奠定基础。

2. 岩石学特征及年代样品选取

目前在乍得 Bongor 盆地北部斜坡带, 约有 80 口井钻遇盆地基底, 分别分布在 Baobab、Lanea、Mimosa 和 Raphia 四个潜山带, 其中有 8 口井在基底不同潜山带进行了取心(图 1)。岩心观察、描述和鉴定认为, 岩性为变质岩和岩浆岩两大类, 14 个亚类(表 1 和图 2)。变质岩主要为变粒岩、眼球状、条带状混合岩和混合花岗岩等(图 2(a)~(c)、图 2(g)), 岩石变质特征明显, 混合岩由基体和脉体两部分组成, 基体为深色变粒岩、片麻岩, 脉体为粉红色花岗质脉; 混合花岗岩具有穿孔、交代残余结构等; 变粒岩局部残留岩浆岩半自形粒状结构, 具有正变质特征。岩浆岩主要为二长花岗岩、二长岩、正长岩(图 2(d)~(f)), 岩石具半自形粒状结构, 矿物结晶较好。潜山带由于钻探程度较低, 井巨较大, 岩浆岩和变质岩分布规律还缺少规律性认识, Raphia 潜山岩性分布特点见图 3, 总体来说岩性以区域变质的片麻岩和混合岩化形成的混合片麻岩和混合花岗岩为主, 不同部位有典型的岩浆成因的二长花岗岩、二长岩和闪长岩分布。定年样品在 8 口钻井取心中获得, 选取了不同岩性进行分析(表 2), 有些岩性如闪长岩, 钻井取心中没



1-Baobab C-2; 2-Mimosa-10; 3-Mimosa E-2; 4-Phoenix S-2;
 5-Raphia SW-2; 6-Raphia S-8A; 7-Raphia S-11; 8-Lanea SE-2;
 A-Baobab潜山带; B-Mimosa潜山带; C-Phoenix潜山带; D-Raphia潜山带; E-Lanea潜山带;

Figure 1. Outline structure of Bongor basin Chad
图 1. 乍得 Bongor 盆地构造略图

Table 1. Rock types and characteristics of Bongor basin Chad
表 1. 乍得 Bongor 盆地潜山岩石类型及特征

岩类	亚类	主要类型	特征
区域变质岩	变粒岩类	黑云斜长变粒岩、黑云角闪斜长变粒岩、角闪黑云斜长变粒岩	细粒均粒它形粒状变晶结构，略显定向构造。斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石为主，次为碱性长石、石英
	浅粒岩类	二长浅粒岩	均粒粒状变晶结构，块状构造。斜长石、碱性长石、石英为主，黑云母等暗色矿物小于 10%
	片麻岩类	黑云二长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、绿泥斜长片麻岩等	鳞片粒状变晶结构，片麻状构造。斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石为主，少量碱性长石、石英
	角闪质岩类	黑云斜长角闪岩	柱粒状变晶结构，块状构造。斜长石、角闪石和黑云母
变质岩	混合岩化变质岩类	混合岩化变粒岩、混合岩化片麻岩	粒状变晶或鳞片粒状变晶结构，条带状、片麻状构造。斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石为主，次为碱性长石、石英
	注入混合岩类	花岗岩黑云角闪斜长片麻条带状混合岩、花岗质角闪斜长变粒条带状混合岩、浅粒质混合岩等	粒状或鳞片粒状变晶结构，条带、眼球等构造。斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石为主，次为碱性长石、石英
	混合片麻岩类	花岗质混合片麻岩、条带状混合片麻岩等	花岗变晶结构，条带状、条痕状等构造。斜长石、角闪石、碱性长石、黑云母、绿泥石、石英
	混合花岗岩类	二长混合花岗岩、碱长混合花岗岩等	花岗变晶结构，块状构造。石英、斜长石、碱性长石为主，少量黑云母、角闪石等
碎裂变质岩	构造角砾岩类	花岗质角砾岩等	角砾状构造，无定向构造。石英、斜长石、碱性长石为主，少量黑云母和角闪石等
	压碎岩类	碎裂混合花岗岩、碎裂二长花岗岩、碎裂碱长混合花岗岩、碎裂石英二长岩、碎裂浅粒质混合岩、碎裂角砾状混合岩、长英质碎斑岩、长英质碎粒岩等	碎裂、碎斑、碎粒结构，无定向构造。斜长石、碱性长石、石英为主，次为角闪石、黑云母等
	糜棱岩类	糜棱岩化石英闪长岩、糜棱岩化混合花岗岩、糜棱岩化绿泥斜长片麻岩等。	糜棱结构，定向构造。斜长石、碱性长石为主，次为石英、角闪石、黑云母和绿泥石
岩浆岩	中性岩类	闪长岩、石英闪长岩、闪长玢岩等	半自形粒状结构，块状构造。斜长石、角闪石为主，少量石英
	正长岩类	正长岩、石英正长岩、二长岩、石英二长岩	半自形粒状结构，块状构造。斜长石、碱性长石为主，次为角闪石，少量石英、黑云母
	酸性岩类	花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、碱长花岗岩	花岗结构，块状构造。石英、斜长石、碱性长石

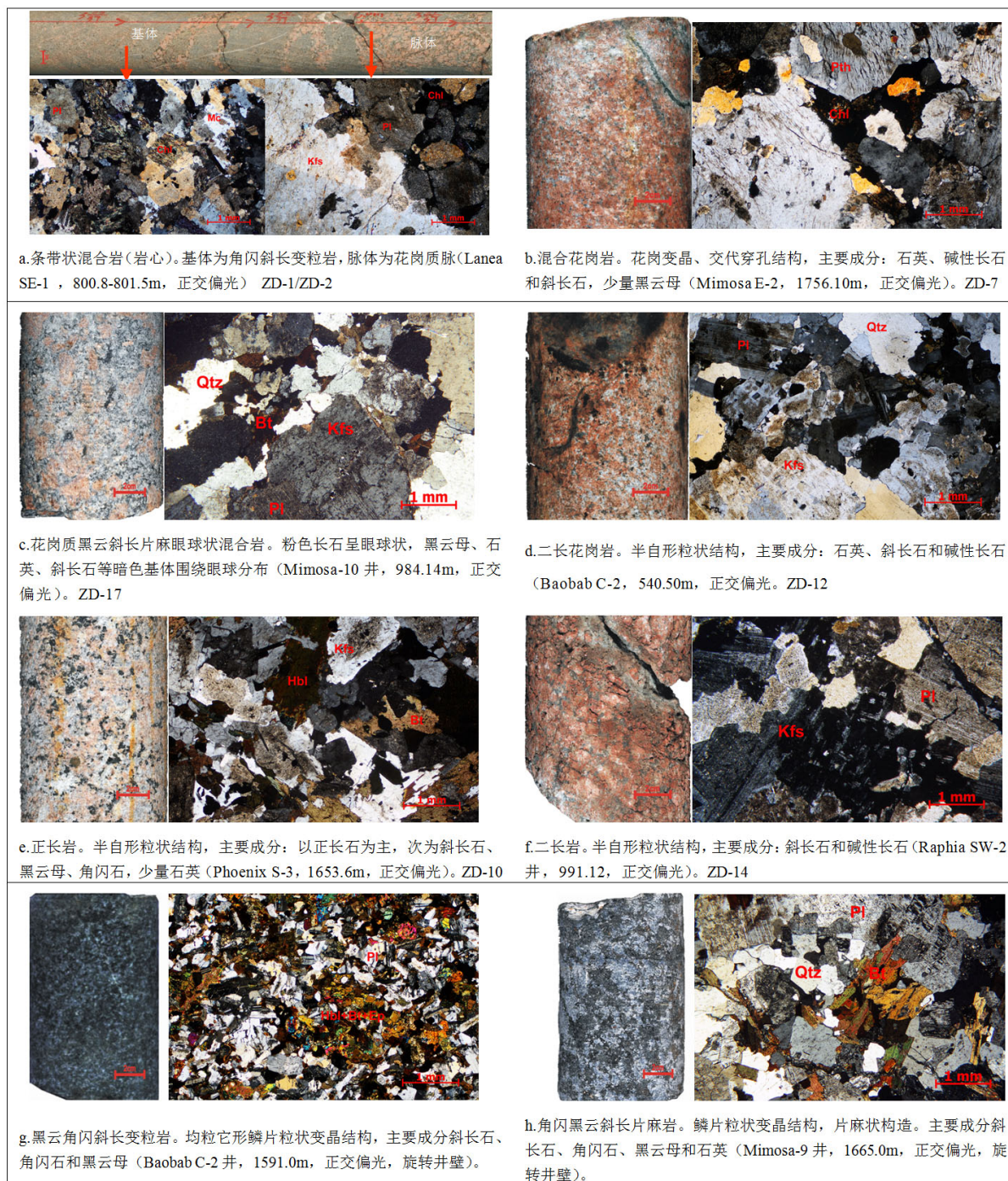


Figure 2. Rock types and macro, microcosmic characteristics
图 2. 岩石类型及宏、微观特征

有获得, 旋转井壁取心由于研样过小, 没有进行测年。

3. 分析方法

乍得 Bongor 盆地潜山岩石为古老的结晶基底, 在测年方法上采用了激光探针等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析技术。激光探针等离子体质谱分析是一种发展时间不长, 但很有应用前景的分析方法。

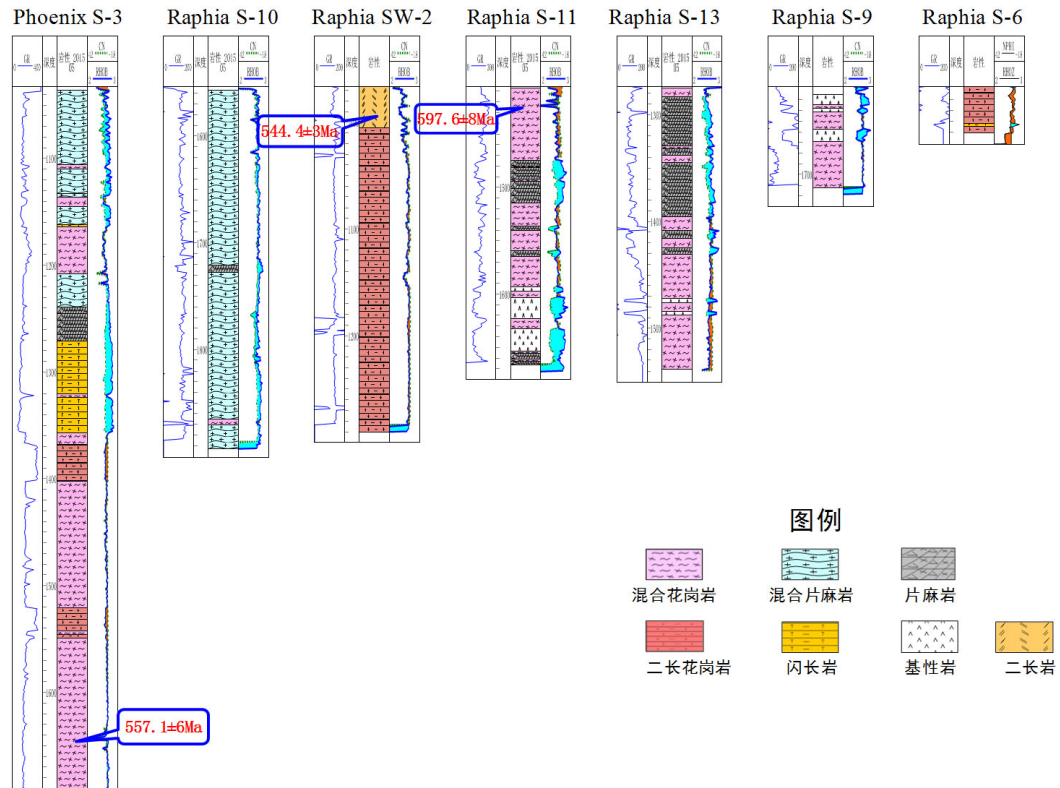


Figure 3. Lithology distributing characteristic of Raphia buried-hill

图 3. Raphia 潜山带岩性分布特点

Table 2. Dating sampling position in north slope of Bongor basin Chad
表 2. 乍得 Bongor 盆地北部斜坡带定年样品采样位置

井号	样号	样深度, m	岩性	井号	样号	样深度, m	岩性
Lanea SE-1	ZD-1	800.87	角闪斜长变粒岩(基体)	Mimosa E-2	ZD-7	1756.1	碱长混合花岗岩
	ZD-2	801.5	花岗质(脉体)		ZD-8	1759.27	碱长混合花岗岩
	ZD-3	816.7	二长浅粒岩		ZD-16	1304.41	碱长混合花岗岩
Raphia S-11	ZD-4	1407.8	混合花岗岩	ZD-11	538.9	二长花岗岩	
	ZD-5	1410.6	混合花岗岩	Baobab C-2	ZD-12	540.5	二长花岗岩
Raphia S-8A	ZD-6	1576.8	混合花岗岩	ZD-13	543.1	二长花岗岩	
Mimosa-10	ZD-17	984.14	眼球状混合岩	ZD-15	1005.89	二长岩	
	ZD-18	986.89	黑云角闪斜长变粒岩	Phoenix S-3	ZD-9	1644.7	石英正长岩
Raphia SW-2	ZD-14	991.12	二长岩		ZD-10	1653.6	正长岩

激光进样技术与等离子体质谱技术相结合，能够进行固体样品的微区微量元素和同位素的分析，具有灵敏度高、简便、快速的特点。由于它能够测定同位素比值，因而在矿物同位素组成特征的研究和同位素测年的应用上有着广阔的发展前景。该方法被许多学者及专家采用[5]-[8]。

在各取样点进行样品选取，每件样品重量 5 Kg 左右，将样品送到了河北地质局廊坊实验室进行锆石分离，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，通常碎到 80 目[9]，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、阴极发光(CL)显微图像及 LA-ICP-MS 分析。其中,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 Quanta 400 FEG 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 Agilent 7500a 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 GeoLas 200 M 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 , 详细分析步骤和数据处理方法参见文献[10]。

4. 测试结果

4.1. 锆石形貌及内部结构特征

锆石的阴极发光图像是揭示锆石的形貌和内部结构的最有效手段。通过锆石的阴极发光图像,可以对锆石的成因类型进行较有效的判断。不同地质环境中形成的锆石具有不同的结构类型,如:岩浆锆石具有典型的振荡环带或扇形分带结构;变质锆石具有其特征的内部结构,主要有无分带、弱分带、云雾状分带、扇形分带等[11]。因此,对锆石进行显微结构研究,可以为锆石 U-Pb 年龄的合理解释提供有效的依据。

测试锆石多为浅黄色至无色、透明,长柱状自形体。阴极发光图像特征总结起来主要有三种类型:

- ① 具有岩浆锆石典型的振荡环带结构(图 4(a));
- ② 具有振荡环带结构同时又有增生边(图 4(b));
- ③ 具有核边结构,核部应为原岩锆石的残留,边部为岩石结晶形成(图 4(c))。

4.2. 样品测年

本次研究共选取了 18 件样品进行年代分析,分析结果见表 3。下面分别选取 18 件样品中的 3 件岩浆岩和 4 件变质岩样品进行详细年代分析叙述。

4.2.1. 变质岩测年

岩心观察和微观鉴定具有明显变质特征的岩石,选取了不同类型进行年代分析。对基体和脉体界限明显的条带状混合岩,选取了角闪斜长变粒岩基体(ZD-1)和花岗质脉体(ZD-2)分别测年;对混合程度较高

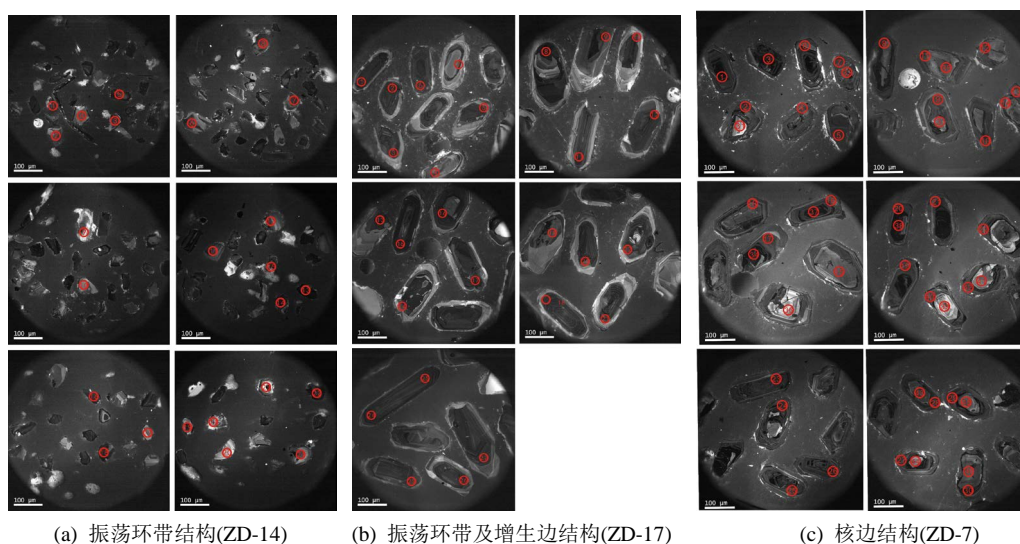


Figure 4. Cathodoluminescence image characters of Zircon

图 4. 锆石的阴极发光图像特征

Table 3. Single-grained Zircon LA-ICP-MS *in situ* dating results of Bongor basin Chad basement buried-hill
表 3. 乍得 Bongor 盆地潜山岩石单颗粒锆石 LA-ICP-MS 原位测年结果

岩类	井号	样品号	井深, m	岩性	年龄, Ma	时代
	Lanea SE-1	ZD-1	800.87	混合岩化角闪斜长变粒岩(基体)	597 ± 6	
	Lanea SE-1	ZD-2	801.5	花岗质(脉体)	553 ± 19	
	Lanea SE-1	ZD-3	816.7	二长浅粒岩	558 ± 5	
	Raphia S-11	ZD-4	1407.8	混合花岗岩	597.6 ± 8	
	Raphia S-11	ZD-5	1410.6	混合花岗岩	552.4 ± 2.2	新元古代 - 寒武纪纽芬兰世
变质岩	Raphia S-8A	ZD-6	1576.8	混合花岗岩	601.7 ± 9	
	Mimosa-10	ZD-17	984.14	眼球状混合岩	616 ± 6	
	Mimosa-10	ZD-18	986.89	黑云角闪斜长变粒岩	526.5 ± 2.7	
	Baobab C-2	ZD-16	1304.41	碱长混合花岗岩	591 ± 4	
	Mimosa E-2	ZD-8	1759.27	碱长混合花岗岩	原岩年龄 946 ± 5	
	Mimosa E-2	ZD-7	1756.1	碱长混合花岗岩	形成年龄 559.5 ± 9 原岩年龄 1006 ± 12	原岩年龄中元古代 形成年龄新元古代
	Phoenix S-3	ZD-9	1644.7	石英正长岩	形成年龄 557.1 ± 6 变质改造年龄 464 ± 5	新元古代 - 中奥陶世
	Phoenix S-3	ZD-10	1653.6	正长岩	525.3 ± 2.5	
	Baobab C-2	ZD-11	538.9	二长花岗岩	600 ± 4	
岩浆岩	Baobab C-2	ZD-12	540.5	二长花岗岩	607.3 ± 11	新元古代 - 寒武纪纽芬兰世
	Baobab C-2	ZD-13	543.1	二长花岗岩	621 ± 16	
	Raphia SW-2	ZD-14	991.12	二长岩	544.4 ± 3	
	Baobab C-2	ZD-15	1005.89	二长岩	547.5 ± 3.1	

的眼球状混合岩和混合花岗岩选取岩体整体进行年代分析。分析结果如下:

样品 ZD-1 (图 2(a)暗色基体 - 角闪斜长变粒岩)和样品 ZD-2, 锆石 CL 图像都具有明显的岩浆振荡环带结构, 锆石的 U-Th-Pb 同位素分析结(表 4、表 5), Th/U 比值大于 0.4, 具有典型岩浆成因锆石的特点 [11]。因研究区岩石年龄小于 1100 Ma, 故定年结果采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 进行年龄 [12] [13] 研究。

样品 ZD-1 同位素 U-Pb 谐和图(图 5), 30 个测点沿不一致线分布, 说明岩石形成后经历过热或变质作用改造, 导致了 Pb 的丢失, 上交点年龄(630 ± 49) Ma, 靠近不一致线上交点的谐和年龄(553 ± 19) Ma 可代表该岩体的形成年龄。由于变质改造未达到同位素的再平衡, 所以, 没能获得可靠变质年龄。

ZD-2(图 2(a)浅色脉体 - 花岗质), U-Pb 谐和图见图 6, 所有测点沿不一致线分布, 靠近不一致线上交点的谐和年龄(553 ± 19 Ma)可代表该岩体的形成年龄。结合岩性分析该岩性为花岗质新生脉体, 因此, 测得年龄可以代表区域混合岩化的时间。

样品 ZD-17(眼球状混合岩)和样品 ZD-7(混合花岗岩), 锆石 CL 图像见图 4(b)、图 4(c), 样品 ZD-17 具有震荡环带和增生边, 样品 ZD-7 具有核边结构。锆石的 U-Th-Pb 同位素分析结(表 6、表 7)。

样品 ZD-17 眼球状混合岩, 锆石虽然具有明显的岩浆振荡环带结构, 但是稀土元素含量和配分曲线形式发生明显变化(图 7), 轻稀土在配分曲线对数坐标 100 处明显分上下两批, 发生了稀土元的再分配, U-Pb 谐和图上(图 8), 所有测点沿不一致线分布, 说明岩石形成后经历过热或变质作用改造, 并导致了 Pb 的丢失。其中上交点年龄为 629 ± 27 Ma, 靠近上交点的谐和年龄为 616 ± 6 Ma, 应代表该岩体的形成

Table 4. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-1's samples
表 4. ZD-1 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
ZD-1-02	396.06	809.68	0.489	0.06431	0.00147	0.38903	0.01166	0.04392	0.00049	752	44	334	9	277	3
ZD-1-03	365.95	562.19	0.651	0.06091	0.00125	0.49022	0.01623	0.05817	0.00093	636	44	405	11	364	6
ZD-1-04	512.84	429.84	1.193	0.06184	0.00183	0.62502	0.02347	0.0731	0.00093	669	59	493	15	455	6
ZD-1-05	71.91	77.4	0.929	0.06342	0.00301	0.71354	0.03637	0.08193	0.00114	722	85	547	22	508	7
ZD-1-06	42.32	145.62	0.291	0.06237	0.00224	0.71942	0.03064	0.08381	0.00102	687	70	550	18	519	6
ZD-1-07	59.65	186.42	0.320	0.06118	0.00241	0.62167	0.02844	0.0737	0.00096	646	76	491	18	458	6
ZD-1-08	1002.5	1515.3	0.662	0.06714	0.00128	0.28656	0.01081	0.03067	0.00054	842	49	256	9	195	3
ZD-1-10	1033.9	698.76	1.480	0.06023	0.00103	0.62615	0.01721	0.07505	0.00085	612	40	494	11	466	5
ZD-1-12	1213.4	2367.1	0.513	0.09047	0.00179	0.18995	0.01018	0.01508	0.00065	1435	47	177	9	97	4
ZD-1-13	533.7	399.14	1.337	0.06333	0.00141	0.63794	0.02003	0.0729	0.00107	719	42	501	12	454	6
ZD-1-14	258.9	310.78	0.833	0.05653	0.00453	0.5497	0.04228	0.07053	0.00158	473	183	445	28	439	9
ZD-1-15	319.65	411.2	0.777	0.06152	0.00139	0.68992	0.02122	0.08088	0.00104	657	44	533	13	501	6
ZD-1-16	529.8	476.08	1.113	0.06101	0.00092	0.59901	0.01513	0.07128	0.00105	640	30	477	10	444	6
ZD-1-17	53.55	66.04	0.811	0.0617	0.00222	0.81682	0.03186	0.09704	0.00109	664	64	606	18	597	6
ZD-1-18	485.03	694.56	0.698	0.07169	0.00116	0.3701	0.00978	0.03723	0.00028	977	42	320	7	236	2
ZD-1-19	213.02	304.21	0.700	0.05851	0.00234	0.67708	0.02644	0.08393	0.00075	549	90	525	16	520	4
ZD-1-20	1077	2014.7	0.535	0.07244	0.00085	0.27069	0.00832	0.02711	0.00064	998	29	243	7	172	4
ZD-1-21	835.2	923.33	0.905	0.06882	0.00082	0.42069	0.00975	0.04429	0.00063	893	25	357	7	279	4
ZD-1-22	138.35	188.29	0.735	0.05996	0.00152	0.77412	0.02488	0.09355	0.0015	602	42	582	14	577	9
ZD-1-23	164.96	196	0.842	0.06472	0.00161	0.80214	0.02422	0.08962	0.0009	765	47	598	14	553	5
ZD-1-24	250.05	204.87	1.221	0.06208	0.0011	0.77338	0.01819	0.09036	0.00058	677	39	582	10	558	3
ZD-1-26	389.55	386.38	1.008	0.06027	0.00149	0.56777	0.01797	0.06809	0.00081	613	48	457	12	425	5
ZD-1-28	130.93	151.88	0.862	0.05814	0.00288	0.69383	0.03396	0.08655	0.00066	535	111	535	20	535	4
ZD-1-30	696.01	465.11	1.496	0.06769	0.00117	0.81377	0.02421	0.08678	0.00071	859	48	605	14	536	4

Table 5. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-2's samples
表 5. ZD-2 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
ZD-2-01	440.71	471.93	0.934	0.05808	0.00093	0.59333	0.01744	0.07389	0.00082	533	45	473	11	460	5
ZD-2-02	919.69	1564.34	0.588	0.06581	0.00121	0.24974	0.00808	0.02743	0.00049	800	39	226	7	174	3
ZD-2-03	521.68	527.81	0.988	0.0552	0.00449	0.50669	0.03988	0.06657	0.00136	420	187	416	27	415	8
ZD-2-04	362.59	293.54	1.235	0.06111	0.00118	0.71085	0.02033	0.08394	0.00061	643	49	545	12	520	4
ZD-2-05	392.96	643.75	0.610	0.06116	0.00103	0.55633	0.01491	0.06607	0.00086	645	36	449	10	412	5
ZD-2-06	327.92	323.51	1.014	0.06023	0.0012	0.73361	0.02184	0.0884	0.00088	612	47	559	13	546	5
ZD-2-07	217.53	208.84	1.042	0.06259	0.0013	0.75725	0.02317	0.08806	0.00087	694	48	572	13	544	5
ZD-2-08	371.19	748.88	0.496	0.06241	0.00125	0.53769	0.01577	0.06235	0.00052	688	48	437	10	390	3
ZD-2-09	404.18	503.14	0.803	0.06399	0.00115	0.52133	0.0152	0.05964	0.00105	741	33	426	10	373	6
ZD-2-10	610.65	692.86	0.881	0.06604	0.00166	0.3126	0.01018	0.03425	0.00027	808	55	276	8	217	2
ZD-2-11	1003.81	1600.62	0.627	0.06293	0.00102	0.21878	0.00597	0.02515	0.00016	706	47	201	5	160	1
ZD-2-12	357.12	325.53	1.097	0.05751	0.00107	0.70627	0.02117	0.08907	0.00073	511	51	543	13	550	4
ZD-2-13	410.52	794.13	0.517	0.06251	0.00165	0.39223	0.01904	0.04511	0.00132	691	56	336	14	284	8
ZD-2-14	326.84	985.26	0.332	0.06654	0.00181	0.33499	0.01649	0.03599	0.00094	823	60	293	13	228	6
ZD-2-15	825.37	563.55	1.465	0.0607	0.00101	0.68634	0.01706	0.0818	0.00074	629	38	531	10	507	4
ZD-2-16	166.93	181.82	0.918	0.05814	0.00152	0.73067	0.02284	0.09087	0.00071	535	55	557	13	561	4
ZD-2-17	191.82	292.29	0.656	0.06075	0.00158	0.63407	0.01989	0.07547	0.00082	631	49	499	12	469	5
ZD-2-18	246.6	265.73	0.928	0.05963	0.00149	0.74961	0.02295	0.09087	0.00085	590	50	568	13	561	5
ZD-2-19	242.95	211.01	1.151	0.0654	0.00149	0.78032	0.02276	0.08639	0.00088	787	44	586	13	534	5
ZD-2-20	144.94	103.29	1.403	0.06019	0.00188	0.75354	0.02524	0.09093	0.00076	611	58	570	15	561	4
ZD-2-21	1156.24	2379.1	0.486	0.06433	0.00091	0.20649	0.00451	0.0233	0.00028	752	26	191	4	148	2
ZD-2-22	101.86	104.62	0.974	0.06432	0.00275	0.78754	0.03742	0.08849	0.00161	752	69	590	21	547	10
ZD-2-23	389.7	436.92	0.892	0.05594	0.00278	0.52565	0.02573	0.06815	0.00061	450	113	429	17	425	4
ZD-2-24	658.36	733.96	0.897	0.06521	0.00119	0.43276	0.01229	0.04777	0.00039	781	46	365	9	301	2
ZD-2-25	715.22	863.87	0.828	0.05298	0.00258	0.34155	0.0162	0.04675	0.00053	328	114	298	12	295	3
ZD-2-26	163.84	198.26	0.826	0.06349	0.00199	0.755	0.02676	0.08618	0.00075	725	61	571	15	533	4
ZD-2-27	638.67	1244.97	0.513	0.07202	0.00132	0.28461	0.00845	0.02867	0.00052	987	32	254	7	182	3
ZD-2-28	222.03	254.11	0.874	0.06389	0.0013	0.77365	0.02387	0.08794	0.00111	738	44	582	14	543	7
ZD-2-29	723.33	683.65	1.058	0.06389	0.00096	0.60571	0.01707	0.06864	0.00063	738	44	481	11	428	4
ZD-2-30	506.45	920.35	0.550	0.06585	0.00167	0.41676	0.01473	0.04629	0.00084	801	44	354	11	292	5

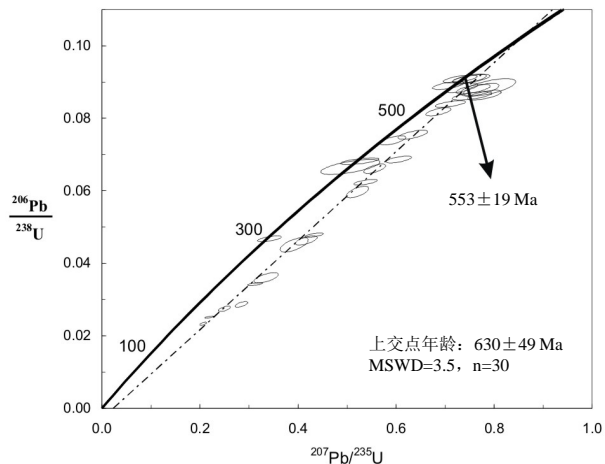


Figure 5. ZD-1 zircon U-Pb concordant diagram
图 5. ZD-1 锆石 U-Pb 谐和图

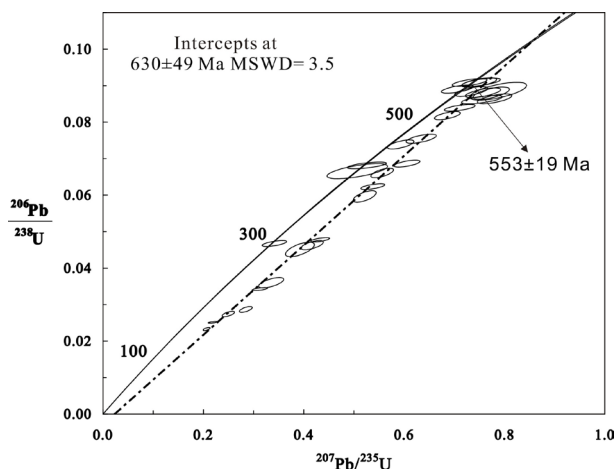


Figure 6. ZD-2 zircon U-Pb concordant diagram
图 6. ZD-2 锆石 U-Pb 谐和图

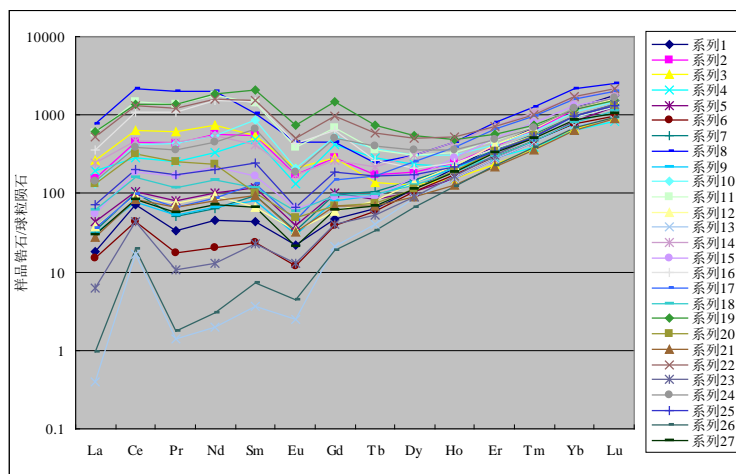


Figure 7. ZD-17 Chondrule standard graphic illustration of rare earth elements in zircon
图 7. ZD-17 锆石稀土元素球粒陨石标准化图解

年龄。由于变质改造未达到同位素的再平衡，所以，没能获得可靠变质年龄。

样品 ZD-7 碱长混合花岗岩锆石显示明显的核边结构，核部应为原岩锆石的残留，边部为岩浆结晶成因。同位素分析结果见表 7，定年结果形成两条不一致曲线(图 9)。核部 20 个测点不一致曲线与谐和线的交点年龄为(1085 ± 20) Ma，靠近上交点的最大谐和年龄为(1006 ± 12) Ma；边部 14 个测点不一致线的上交点年龄为(618 ± 26) Ma，靠近上交点的最大谐和年龄为(559.5 ± 9) Ma。表明，该岩体形成于 559.5 ± 9 Ma，是由 1006 ± 12 Ma 的岩石部分熔融形成。

4.2.2. 岩浆岩测年

岩心观察和微观鉴定具有典型岩浆结构的岩浆成因的二长花岗岩、二长岩和正长岩分别选取了样品进行年代分析。而闪长岩取心未见，但井壁中较多，由于样品小，无法进行年代分析。

样品 ZD-12 二长花岗岩锆石具有明显的岩浆振荡环带结构，同位素分析结果见表 8，U-Pb 谐和图(图 10)，所有测点构成一条不一致线，其中上交点年龄为(593 ± 19) Ma，靠近上交点的最大谐和年龄为(607.3 ± 11) Ma，应代表该岩体的形成年龄。

样品 ZD-14 二长岩锆石具有明显的岩浆振荡环带结构，同位素分析结果见表 9，U-Pb 谐和图(图 11) 13

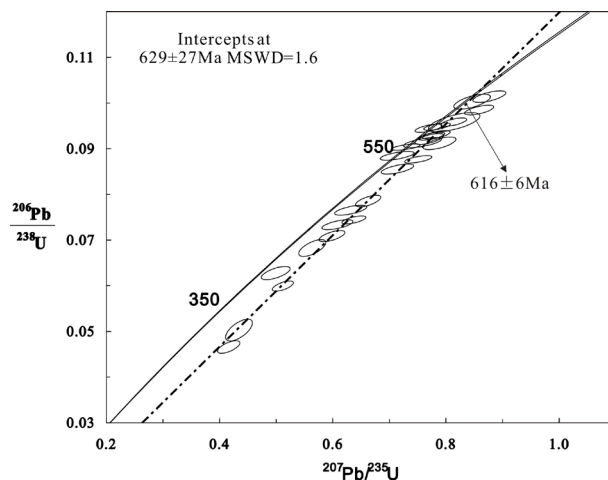


Figure 8. ZD-17 zircon U-Pb concordant diagram

图 8. ZD-17 锆石 U-Pb 谐和图

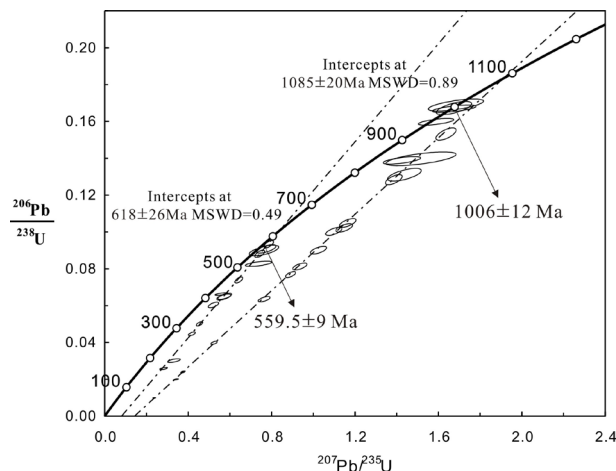


Figure 9. ZD-7 zircon U-Pb concordant diagram

图 9. ZD-7 U-Pb 谐和图

Table 6. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-17's samples
表 6. ZD-17 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
ZD-17-01	308.24	494.61	0.623	0.05834	0.00062	0.72913	0.01656	0.09036	0.00045	543	41	556	10	558	3
ZD-17-02	276.93	506.88	0.546	0.06007	0.00145	0.60816	0.0181	0.07335	0.00072	606	47	482	11	456	4
ZD-17-03	244.31	524.09	0.466	0.06182	0.0008	0.63738	0.01405	0.0744	0.00057	668	34	501	9	463	3
ZD-17-04	179.57	318.34	0.564	0.06108	0.00101	0.59863	0.01505	0.07087	0.00081	642	35	476	10	441	5
ZD-17-05	281.3	516.16	0.545	0.0605	0.00074	0.77075	0.01669	0.09213	0.00079	621	32	580	10	568	5
ZD-17-06	78.26	144.32	0.542	0.06019	0.0014	0.75861	0.02218	0.09135	0.00073	610	49	573	13	564	4
ZD-17-07	676.31	761.33	0.888	0.061	0.00066	0.78332	0.01612	0.09304	0.00061	639	33	587	9	573	4
ZD-17-08	70.51	739.82	0.095	0.05768	0.00213	0.49916	0.01681	0.06277	0.00096	517	83	411	11	392	6
ZD-17-09	178.61	388.75	0.459	0.05987	0.00071	0.78426	0.01557	0.09484	0.00053	599	33	588	9	584	3
ZD-17-10	286.86	527.86	0.543	0.06135	0.00087	0.66247	0.01481	0.07854	0.00084	652	30	516	9	487	5
ZD-17-11	584.73	881.46	0.663	0.06179	0.00069	0.51174	0.01232	0.05992	0.00074	667	31	420	8	375	4
ZD-17-12	136.64	525.39	0.260	0.06047	0.00105	0.71433	0.01898	0.08554	0.00073	621	42	547	11	529	4
ZD-17-13	47.71	84.81	0.563	0.06221	0.00191	0.81465	0.03004	0.0958	0.00138	681	54	605	17	590	8
ZD-17-15	174.85	494.1	0.354	0.06264	0.00103	0.7886	0.01923	0.09117	0.00091	696	35	590	11	562	5
ZD-17-16	446.46	637.81	0.700	0.05981	0.00096	0.56375	0.01585	0.06825	0.00122	597	32	454	10	426	7
ZD-17-17	308.65	381.81	0.808	0.06103	0.00098	0.84615	0.02136	0.1003	0.00109	640	36	623	12	616	6
ZD-17-18	545.32	690.51	0.790	0.05882	0.00053	0.76918	0.01568	0.09448	0.00059	560	34	579	9	582	3
ZD-17-19	292.82	514.31	0.569	0.06336	0.0009	0.43428	0.01572	0.0503	0.00158	720	34	366	11	316	10
ZD-17-20	275.09	417.18	0.659	0.06192	0.00086	0.75102	0.01593	0.08767	0.00054	672	35	569	9	542	3
ZD-17-21	229.16	435.53	0.526	0.0603	0.00079	0.77431	0.01544	0.09273	0.00058	614	32	582	9	572	3
ZD-17-22	627.63	881.98	0.712	0.06444	0.00132	0.41611	0.01304	0.04658	0.00091	756	35	353	9	293	6
ZD-17-23	320.78	527.2	0.608	0.0614	0.00072	0.8137	0.01518	0.09581	0.0006	653	29	605	8	590	4
ZD-17-24	372.36	627.68	0.593	0.05985	0.00186	0.63163	0.01873	0.07654	0.00071	598	69	497	12	475	4
ZD-17-25	432.62	593.46	0.729	0.05852	0.00168	0.71367	0.01984	0.08845	0.00064	549	64	547	12	546	4
ZD-17-26	130.14	308.54	0.422	0.06237	0.00101	0.87672	0.01926	0.1014	0.00084	687	33	639	10	623	5
ZD-17-27	128.91	269.06	0.479	0.06293	0.00083	0.85875	0.01702	0.09846	0.0007	706	30	629	9	605	4

Table 7. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-7's samples
表 7. ZD-7 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
ZD-7-01	141.12	1872.98	0.075	0.1239	0.00419	0.33918	0.00673	0.01984	0.00029	2013.1	58.75	296.6	5.1	126.6	1.82
ZD-7-02	128.43	935.86	0.137	0.06103	0.00213	0.74086	0.01624	0.08796	0.00126	640.4	73.31	562.9	9.47	543.5	7.47
ZD-7-05	152.3	1249.54	0.122	0.06259	0.00269	0.51974	0.01701	0.06019	0.00095	694.4	88.91	425	11.36	376.8	5.76
ZD-7-09	91.05	799.65	0.114	0.06118	0.00202	0.78574	0.01487	0.09312	0.00131	645.6	69.51	588.8	8.45	574	7.75
ZD-7-11	278.86	700.07	0.398	0.08148	0.00294	1.14762	0.02692	0.10213	0.00153	1233.1	69.03	776.1	12.73	626.9	8.94
ZD-7-13	243.51	508.82	0.479	0.07943	0.00287	1.0972	0.02591	0.1002	0.0015	1182.9	69.88	752	12.55	615.6	8.81
ZD-7-14	160.13	348.81	0.459	0.07841	0.00263	1.38702	0.02714	0.12832	0.00186	1157.3	65.1	883.4	11.55	778.3	10.6
ZD-7-16	181.47	3806.74	0.048	0.11327	0.00388	0.3733	0.00765	0.02391	0.00035	1852.5	60.73	322.1	5.66	152.3	2.22
ZD-7-17	123.86	906	0.137	0.06401	0.00313	0.56891	0.02263	0.06449	0.0011	742	100.04	457.3	14.65	402.8	6.68
ZD-7-19	111.18	819.63	0.136	0.06306	0.00211	0.64077	0.01237	0.07373	0.00106	710.4	69.44	502.8	7.65	458.6	6.34
ZD-7-20	1620.66	6281.96	0.258	0.17412	0.00575	0.23566	0.0043	0.00982	0.00014	2597.6	53.99	214.9	3.53	63	0.92
ZD-7-21	336.35	1222.67	0.275	0.06571	0.00234	0.45233	0.01024	0.04996	0.00073	797.2	72.84	378.9	7.16	314.3	4.51
ZD-7-22	189.95	2736.82	0.069	0.07876	0.004	0.27909	0.01162	0.02572	0.00046	1166.2	97.41	249.9	9.22	163.7	2.89
ZD-7-23	155.2	1470.71	0.106	0.06771	0.00254	0.4146	0.01058	0.04444	0.00067	859.7	76.12	352.2	7.59	280.3	4.14
ZD-7-24	123.69	2065.46	0.060	0.09549	0.00322	0.5216	0.01021	0.03965	0.00058	1537.9	62.06	426.2	6.81	250.6	3.59
ZD-7-25	83.31	946.87	0.088	0.06415	0.00309	0.57398	0.02231	0.06495	0.00111	746.6	98.51	460.6	14.39	405.7	6.72
ZD-7-26	89.92	1795.59	0.050	0.08264	0.00307	1.0243	0.02553	0.08998	0.00139	1260.8	70.97	716.1	12.81	555.4	8.21
ZD-7-27	129.05	1034.52	0.125	0.08358	0.00306	0.93526	0.02252	0.08123	0.00124	1282.7	69.88	670.4	11.82	503.5	7.4
ZD-7-28	106.79	949.35	0.112	0.06199	0.00303	0.77418	0.03084	0.09067	0.00157	673.8	101.16	582.2	17.65	559.5	9.29
ZD-7-29	108.46	786.02	0.138	0.0617	0.00417	0.76264	0.04631	0.08975	0.00191	663.6	138.68	575.5	26.68	554	11.32
ZD-7-31	99.02	167.21	0.592	0.07142	0.00296	1.68508	0.08765	0.16884	0.00222	970	85	1003	33	1006	12
ZD-7-32	213.53	291.05	0.734	0.07883	0.00598	1.51756	0.11187	0.13962	0.00247	1168	155	937	45	843	14
ZD-7-34	576.04	1316.81	0.437	0.05525	0.00354	0.37331	0.02308	0.049	0.00084	422	147	322	17	308	5
ZD-7-35	399.09	653.4	0.611	0.07171	0.00169	1.6754	0.05663	0.16716	0.00241	978	45	999	21	996	13
ZD-7-37	417.92	730.28	0.572	0.07247	0.00122	1.35941	0.03824	0.13474	0.00141	999	40	872	16	815	8
ZD-7-38	426	680.22	0.626	0.11223	0.01195	1.93608	0.19947	0.12511	0.00336	1836	201	1094	69	760	19
ZD-7-39	931.08	683.19	1.363	0.06466	0.00381	0.73555	0.0425	0.0825	0.00094	763	128	560	25	511	6
ZD-7-40	333.42	1628.91	0.205	0.06068	0.00089	0.55775	0.0205	0.06611	0.00045	628	68	450	13	413	3
ZD-7-41	157.42	378.17	0.416	0.07274	0.00147	1.67717	0.06946	0.16687	0.00135	1007	71	1000	26	995	7
ZD-7-42	148.01	1744.46	0.085	0.05109	0.00316	0.2945	0.01746	0.04181	0.00074	245	143	262	14	264	5
ZD-7-43	291.77	530.94	0.550	0.07195	0.00106	1.58964	0.05627	0.15968	0.00126	985	59	966	22	955	7
ZD-7-44	183.06	336.25	0.544	0.07296	0.00283	1.01792	0.05178	0.10124	0.00341	1013	52	713	26	622	20
ZD-7-45	321.56	362.14	0.888	0.0724	0.0015	1.4739	0.06047	0.14661	0.0018	997	63	920	25	882	10
ZD-7-46	306.1	417.66	0.733	0.07439	0.00172	1.4257	0.0594	0.13881	0.00137	1052	68	900	25	838	8

Table 8. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-12's samples
表 8. ZD-12 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
ZD-12-01	47.48	381.27	0.125	0.0699	0.00609	0.30739	0.0247	0.03188	0.0008	925.4	169.38	272.2	19.18	202.3	5
ZD-12-02	68.49	105.07	0.652	0.07166	0.00549	0.39288	0.02735	0.03974	0.00091	976.4	148.84	336.5	19.94	251.2	5.65
ZD-12-03	465.01	3537.76	0.131	0.05682	0.00203	0.05059	0.00113	0.00645	0.00009	484	77.53	50.1	1.1	41.5	0.58
ZD-12-04	116.5	152.33	0.765	0.06148	0.00254	0.64752	0.01964	0.07635	0.00116	656.1	86.07	507	12.1	474.3	6.95
ZD-12-05	92.54	232.13	0.399	0.07253	0.00402	0.38272	0.01797	0.03825	0.0007	1000.9	108.65	329	13.2	242	4.34
ZD-12-06	163.16	145.6	1.121	0.07377	0.00666	0.99279	0.08344	0.09756	0.00275	1035.2	172.3	700.1	42.52	600.1	16.14
ZD-12-07	286.78	337.37	0.850	0.06317	0.00223	0.58292	0.01297	0.06689	0.00095	714.1	73.23	466.3	8.32	417.4	5.76
ZD-12-08	119.19	189.69	0.628	0.07463	0.00372	0.3854	0.0157	0.03743	0.00065	1058.2	97.52	331	11.51	236.9	4.01
ZD-12-09	319.16	447.51	0.713	0.06228	0.00228	0.63042	0.01537	0.07337	0.00107	683.8	76.33	496.4	9.57	456.4	6.41
ZD-12-10	114.81	153.84	0.746	0.06035	0.00242	0.76055	0.02224	0.09135	0.00138	616.1	84.26	574.3	12.82	563.5	8.18
ZD-12-11	520.03	449.82	1.156	0.07341	0.00284	0.47925	0.01307	0.04732	0.00071	1025.2	76.39	397.6	8.97	298.1	4.39
ZD-12-12	521.71	375.65	1.389	0.09501	0.00492	0.26643	0.01138	0.02033	0.00037	1528.3	94.47	239.8	9.12	129.7	2.37
ZD-12-13	159.58	217.21	0.735	0.0608	0.00332	0.73839	0.03454	0.08803	0.00158	632.3	113.29	561.5	20.17	543.9	9.39
ZD-12-14	40.54	48.91	0.829	0.06019	0.00602	0.77887	0.07382	0.0938	0.0026	610.4	202.73	584.8	42.14	578	15.3
ZD-12-15	340.19	590.52	0.576	0.06742	0.00285	0.44171	0.01426	0.04749	0.00075	850.8	85.51	371.5	10.05	299.1	4.62
ZD-12-16	188.03	454.31	0.414	0.06386	0.00222	0.56951	0.01278	0.06465	0.00093	736.9	72.04	457.7	8.26	403.9	5.65
ZD-12-17	237.55	248.32	0.957	0.06097	0.00213	0.69205	0.01571	0.08229	0.00119	638	73.42	534	9.43	509.8	7.09
ZD-12-18	106.75	183.37	0.582	0.06061	0.00331	0.74944	0.03514	0.08964	0.00164	625.5	113.39	567.9	20.4	553.4	9.71
ZD-12-19	70.09	162.8	0.431	0.06024	0.00248	0.76536	0.02393	0.09212	0.00144	612.1	86.47	577.1	13.76	568.1	8.5
ZD-12-20	228.22	254.02	0.898	0.06327	0.00542	0.59835	0.04766	0.06857	0.00175	717.4	172.08	476.2	30.28	427.5	10.59
ZD-12-21	393.22	381.12	1.032	0.06176	0.003	0.64264	0.02579	0.07545	0.00129	665.7	100.61	503.9	15.94	468.9	7.76
ZD-12-22	44.64	56.86	0.785	0.05983	0.00475	0.79883	0.05883	0.09681	0.00229	597.6	163.24	596.2	33.21	595.7	13.44
ZD-12-23	140.59	342.74	0.410	0.08278	0.02753	0.21509	0.06965	0.01884	0.00144	1264.1	540.49	197.8	58.2	120.3	9.1
ZD-12-24	216.6	234.75	0.923	0.05948	0.00345	0.78986	0.04031	0.0963	0.00186	584.7	121.29	591.1	22.86	592.7	10.93
ZD-12-25	288.07	1183.11	0.243	0.10596	0.00331	0.22452	0.00396	0.01537	0.00022	1731	56.21	205.7	3.28	98.3	1.39
ZD-12-26	41.29	63.47	0.651	0.05942	0.00371	0.80927	0.04529	0.09879	0.00198	582.4	130.11	602	25.42	607.3	11.62
ZD-12-27	116.58	237.82	0.490	0.07494	0.00302	0.37562	0.01145	0.03636	0.00058	1067	79.01	323.8	8.45	230.2	3.59

个测点在谐和曲线上形成一个年龄聚集区，其加权平均值为 544.4 ± 3.0 Ma，代表岩体的形成年龄。

样品 ZD-10 正长岩锆石具有明显的岩浆振荡环带结构、特征的岩浆锆石的稀土元素配分形式，同位素分析结果见表 10，U-Pb 谐和图(图 12)，所有测点在谐和曲线上形成年龄聚集区，其加权平均值 525.3 ± 2.5 Ma，应为岩体的形成年龄。

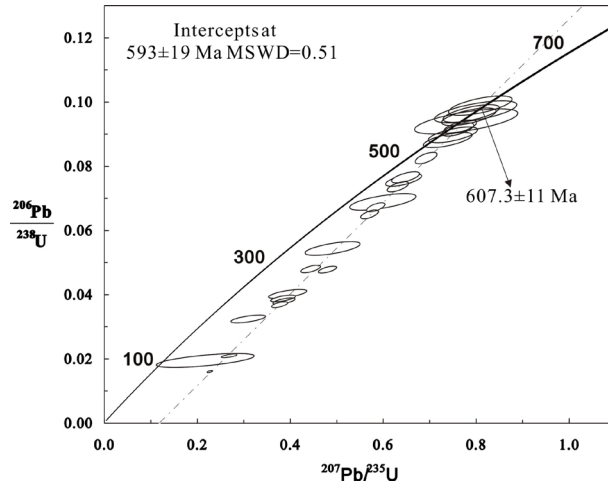


Figure 10. ZD-12 zircon U-Pb concordant diagram
图 10. ZD-12 U-Pb 谐和图

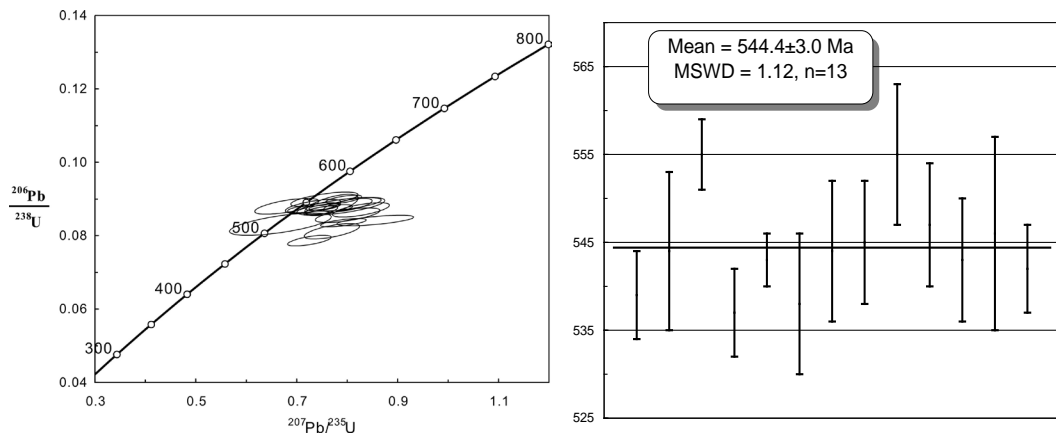


Figure 11. ZD-14 zircon U-Pb concordant diagram of monzonite and Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages weighted average chart
图 11. ZD-14 二长岩锆石 U-Pb 谐和图和锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均图

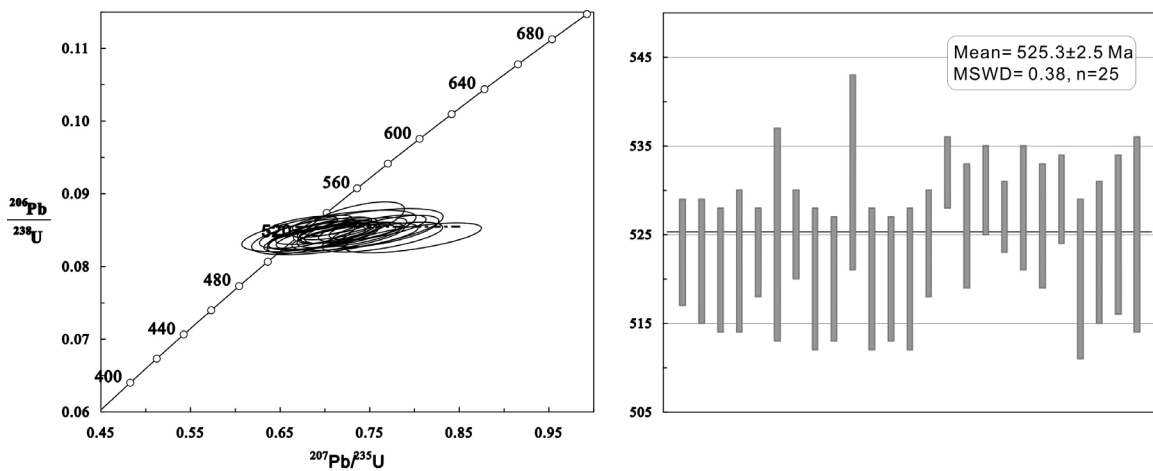


Figure 12. ZD-10 zircon U-Pb concordant diagram and zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age weighted average chart
图 12. ZD-10 锆石 U-Pb 协和图和锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均图

Table 9. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-14's samples
表 9. ZD-14 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
ZD-14-03	392.18	210.66	1.862	0.06346	0.00242	0.76333	0.03155	0.08718	0.00087	724	71	576	18	539	5
ZD-14-04	96.19	126.39	0.761	0.06481	0.0043	0.78811	0.0576	0.088	0.00159	768	124	590	33	544	9
ZD-14-05	98.18	86.29	1.138	0.06396	0.00139	0.79339	0.02375	0.0899	0.00075	740	49	593	13	555	4
ZD-14-06	293.41	257.91	1.138	0.06253	0.00131	0.7475	0.02228	0.08679	0.00082	692	47	567	13	537	5
ZD-14-07	175.47	228.43	0.768	0.06235	0.0011	0.75444	0.02036	0.08788	0.00057	686	47	571	12	543	3
ZD-14-08	142.9	270.77	0.528	0.07057	0.00318	0.82759	0.0375	0.08697	0.00128	945	69	612	21	538	8
ZD-14-11	129.51	175.92	0.736	0.05616	0.00273	0.68003	0.04166	0.08799	0.00143	459	107	527	25	544	8
ZD-14-13	790.1	556.51	1.420	0.06638	0.00187	0.80131	0.03232	0.08828	0.00122	818	61	598	18	545	7
ZD-14-14	127.75	183.28	0.697	0.06135	0.00312	0.75474	0.04388	0.08987	0.00131	652	100	571	25	555	8
ZD-14-19	150.82	361.45	0.417	0.06622	0.00397	0.7928	0.04947	0.08852	0.00124	813	108	593	28	547	7
ZD-14-20	34.35	64.37	0.534	0.06046	0.00254	0.73261	0.03652	0.08795	0.00124	620	83	558	21	543	7
ZD-14-21	82.12	86.44	0.950	0.06418	0.00248	0.76899	0.03499	0.08835	0.00191	748	60	579	20	546	11
ZD-14-22	46.13	85.79	0.538	0.06075	0.00293	0.734	0.03467	0.08763	0.00088	630	107	559	20	542	5

5. 测年结果分析

从岩心观察和岩石薄片鉴定看, 岩石除了具有典型岩浆结晶成因形成的岩浆岩外, 部分岩石还具有变质结晶、注入交代等特征, 因此, 形成了区域变质岩和混合岩。变质岩和岩浆岩分离出来的锆石阴极发光均显示明显的振荡环带结构、增生边和核边结构, 同时锆石 Th/U 在 3 件岩浆岩样品中均大于 0.4; 在 3 件变质岩和 1 件混合岩脉体中, Th/U 其中 3 件样品大于 0.4, 仅 1 件(ZD-7)锆石 33 个点中 Th/U 大于 0.4 的 14 个点, 小于 0.1 的 6 个点, 在 0.1~0.4 之间的 13 个点。大量研究表明, 不同成因的锆石具有不同的 Th、U 含量和 Th/U 比值[12]。岩浆岩锆石的 Th、U 含量较高, Th/U 比值一般大于 0.4; 变质岩锆石的 Th、U 含量较低, Th/U 比值一般小于 0.1 [13] [14]。结合岩矿鉴定、锆石 CL 图像及 Th/U 分析, 本区变质岩具有正变质特征, 认为 Bongor 盆地的变质岩是早期的岩浆岩在后期的岩浆活动中, 由于高温高压及热液作用下发生变质结晶、混合岩化作用形成的, 由于变质改造未达到同位素的再平衡, 所以, 没能获得可靠的区域变质年龄, 变质岩的测年结果显示岩体的形成年龄(即母岩年龄), 但新生脉体(ZD-2)获得了混合岩化的年龄, 应为岩石高级变质年龄。岩浆岩的年代分析认为二长花岗岩为早期形成, 二长岩和正长岩为晚期同时形成, 并二者为年龄相近, 为岩浆结晶分异作用的结果。变质岩与岩浆岩混合在一起形成现今的杂岩体基底。

6. 结论

1) 基底潜山为由变质岩和岩浆岩组成的杂岩体, 岩性分为 2 大类 14 个亚类。变质岩主要为区域变质的变粒岩类、片麻岩类、角闪质岩类, 混合岩化形成的混合岩化变质岩类、注入混合岩类、混合片麻岩类、混合花岗岩类, 动力变质形成的角砾岩类、压碎岩类、糜棱岩类; 岩浆岩主要为闪长岩类、正长岩类和花岗岩类。

Table 10. LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis result of ZD-10's samples
表 10. ZD-10 样品 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	浓度(ppm)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th232	U238	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
ZD-10-02	59.33	64.74	0.916	0.06044	0.00301	0.69783	0.03516	0.08445	0.00095	620	90	537	21	523	6
ZD-10-03	27.52	60.89	0.452	0.0639	0.0033	0.72719	0.03901	0.08436	0.00116	738	91	555	23	522	7
ZD-10-04	34.24	44.48	0.770	0.06346	0.00381	0.73333	0.0465	0.08411	0.00124	724	110	559	27	521	7
ZD-10-05	33.82	52.19	0.648	0.06027	0.00326	0.69867	0.04139	0.08432	0.00134	613	101	538	25	522	8
ZD-10-06	48.36	88.3	0.548	0.06232	0.00255	0.72603	0.0348	0.08449	0.00084	685	86	554	20	523	5
ZD-10-07	24.66	32.92	0.749	0.06274	0.00643	0.72495	0.07083	0.0848	0.0021	699	168	554	42	525	12
ZD-10-08	68.39	124.43	0.550	0.06106	0.00179	0.71113	0.02634	0.08488	0.00079	641	64	545	16	525	5
ZD-10-09	69.98	65.24	1.073	0.06592	0.00351	0.76386	0.04458	0.08403	0.00135	804	95	576	26	520	8
ZD-10-10	85.21	87.4	0.975	0.06119	0.00343	0.69816	0.04044	0.08407	0.00119	646	100	538	24	520	7
ZD-10-11	38.97	71.7	0.544	0.06287	0.0032	0.72876	0.0397	0.08604	0.00188	704	79	556	23	532	11
ZD-10-12	25.81	45.8	0.564	0.06222	0.00457	0.70986	0.05181	0.084	0.00139	682	129	545	31	520	8
ZD-10-13	29.85	53.62	0.557	0.06106	0.00256	0.69523	0.0331	0.08403	0.00109	642	80	536	20	520	7
ZD-10-14	52.01	71.25	0.730	0.06913	0.00414	0.79835	0.05061	0.08395	0.00136	903	104	596	29	520	8
ZD-10-15	51.03	54.96	0.928	0.06111	0.00218	0.71444	0.02989	0.0847	0.00105	643	68	547	18	524	6
ZD-10-16	53.33	141.18	0.378	0.05891	0.00157	0.69674	0.02193	0.08597	0.00072	564	54	537	13	532	4
ZD-10-17	87.85	103.73	0.847	0.06313	0.00244	0.74189	0.03271	0.08506	0.00113	713	71	564	19	526	7
ZD-10-18	76.65	138.94	0.552	0.05685	0.00185	0.67415	0.02613	0.08566	0.00085	486	68	523	16	530	5
ZD-10-19	61.67	109.42	0.564	0.05943	0.00169	0.6984	0.02397	0.08511	0.00071	583	60	538	14	527	4
ZD-10-20	36.36	51.97	0.700	0.06511	0.00298	0.75858	0.0357	0.0854	0.00114	778	77	573	21	528	7
ZD-10-21	40.46	93.78	0.431	0.0619	0.00229	0.71781	0.02711	0.08494	0.00115	671	57	549	16	526	7
ZD-10-22	69.91	119.1	0.587	0.06065	0.00199	0.71371	0.02507	0.08552	0.00086	627	58	547	15	529	5
ZD-10-23	89.92	114.25	0.787	0.05923	0.00267	0.68429	0.03221	0.084	0.00149	576	71	529	19	520	9
ZD-10-24	99.35	125.81	0.790	0.05819	0.00269	0.68246	0.03696	0.08453	0.00135	537	91	528	22	523	8
ZD-10-25	58.54	77.54	0.755	0.06627	0.00353	0.76657	0.03993	0.08486	0.00143	815	81	578	23	525	9
ZD-10-26	36.4	52.92	0.688	0.06001	0.00524	0.70435	0.06435	0.08491	0.00188	604	161	541	38	525	11

2) 潜山岩石主要形成于新元古代, 年龄集中在 500~600 Ma, 最老的原岩年龄 $1006 \pm 12 \sim 946 \pm 5$ Ma, 形成于中元古代末期和新元古代早期。变质岩原岩年龄主要集中在 $616 \pm 6 \sim 526.5 \pm 2.7$ Ma, 变质年龄在 $553 \pm 19 \sim 464 \pm 5$ Ma。为新元古带末期到寒武纪早期; 岩浆岩的年龄主要集中在 $621 \pm 16 \sim 525.3 \pm 2.5$ Ma, 从年代学特征看, 二长花岗岩与二长岩和正长岩不是同期结晶分异造成, 而是早期形成; 二长岩和正长岩为结晶分异形成(时代接近), 晚于二长花岗岩。

基金项目

中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“乍得 Bongor 盆地花岗岩潜山成藏条件分析与有

利目标评价”(2013D-902)。

参考文献 (References)

- [1] 陆松年. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 952-957.
- [2] 史玉玲, 侯读杰, 窦立荣, 等. 乍得 Bongor 盆地原油母质生源特征[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(1): 5-9.
- [3] 宋红日, 窦立荣, 肖坤叶, 等. Bongor 盆地油气成藏地质条件及分布规律初探[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 762-767.
- [4] 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 379-386.
- [5] 李德威, 廖群安, 袁晏明, 等. 喜马拉雅中段日玛那麻粒岩锆石 U-Pb 年代学[J]. 科学通报, 2003, 48(20): 2176-2179.
- [6] 吴福元, 孙德有, 李惠民, 等. 松辽盆地基底岩石的锆石 U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2000, 45(6): 656-660.
- [7] 姜丽萍, 柴风梅, 杨富圈, 等. 新疆阿尔泰两棵树铁矿区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石定年及地质意义[J]. 现代地质, 2011, 25(4): 712-719.
- [8] 陈高潮, 魏仙样, 忤康林, 等. 内蒙古西部阿拉善右旗下石炭统白山组碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及意义[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 955-961.
- [9] 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.
- [10] Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., Li, H.M., Günther, D. and Wu, F.Y. (2004) Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geo-analytical Research*, **28**, 353-370. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x>
- [11] 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.
- [12] 钱一雄, 何治亮, 蔡习尧, 等. 塔中地区上泥盆统东河砂岩和志留系砂岩的锆石特征、SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 石油学报, 2007, 23(11): 3003-3014.
- [13] Hermann, J., Rubatto, D. and Korsakov, A. (2001) Multiple Zircon Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **141**, 66-82. <http://dx.doi.org/10.1007/s004100000218>
- [14] 唐俊华, 顾连兴, 张尊忠, 等. 咸水泉片麻状花岗岩锆石热液增边阴极发光及稀土元素特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(7): 769-777.