doi: **10.12029/gc20160406**

陈丽丽, 程志国. 内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩矿物学特征和Hf同位素研究[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1189−1199.

Chen Lili, Cheng Zhiguo. Mineralogical and Hf isotope study of the Dorolj granite in Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1189−1199(in Chinese with English abstract).

内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩矿物学特征和Hf同位素研究

陈丽丽 程志国

（中国地质大学（北京）地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083）

提要：杜尔基花岗岩基位于大兴安岭中南段，且处在大兴安岭一个大型多金属矿集区（Au−Ag−Cu−Zn−Sn−Fe）中。区内岩浆活动复杂，成矿元素多样，其中，杜尔基花岗岩是本地区出露面积较大（约190 km²）的岩体之一。为厘清区内不同花岗质岩石的源区特征及其与成矿的关系，文章对杜尔基地区花岗岩的主要岩性单元二长花岗岩和正长花岗岩进行了系统的矿物学和Hf同位素组成研究。结果表明：二长花岗岩的主要矿物为斜长石（32%）、钾长石（45%）、石英（20%），次要矿物为黑云母、角闪石和辉石等暗色矿物（3%）；正长花岗岩的主要组成矿物为石英（10%~15%）、钾长石（60%~70%）和斜长石（30%），次要矿物为黑云母（5%），在这两种花岗岩中均广泛发育条纹长石。黑云母主要为铁质黑云母和铁叶云母，角闪石为韭闪石和普通角闪石，辉石为普通辉石。矿物学特征均指示杜尔基花岗岩主要为I型花岗岩。二长花岗岩ε_{Hf}为−1.6~17.6，正长花岗岩ε_{Hf}为−3.3~12.2。杜尔基花岗岩Hf同位素特征指示其源区为新生的地壳物质，可能是来自地幔的底侵玄武质岩浆发生重熔的结果。

关 键 词：杜尔基花岗岩；大兴安岭；Hf同位素；矿物学

中图分类号：P588.12⁺1 **文献标志码**：A **文章编号**：1000−3657(2016)04−1189−11

Mineralogical and Hf isotope study of the Dorolj granite in Hinggan League, Inner Mongolia

CHEN Li−li，CHENG Zhi−guo

(*State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geoscience*，*Beijing* 100083, *China*)

Abstract：The Doroji granite is located in the southern part of the Da Hinggan Mountains, lying in a polymetallic ore−forming zone (Au−Ag−Cu−Zn−Sn−Fe) of the Da Hinggan Mountains. There are various kinds of magmatic rocks in this area, with multiple metallogenic elements, and Doroji granite is one of the biggest plutons, with an exposed area of about 190 km². To clarify the source of the Doroji granite and the relationship with the mineralization, the authors conducted a systematic study of the mineralogy and Hf

收稿日期：2016−01−11；**改回日期**：2016−03−22

基金项目：国家国际科技合作专项"中美环太平洋成矿带成矿规律对比与资源评价技术研究"（2011DFA22460），中国地质调查局"老矿山典型矿床成矿规律总结研究"（12120113086400）资助。

作者简介：陈丽丽，女，1988年生，硕士，地质工程专业；E−mail：08chenlili@163.com。

通讯作者：程志国，男，1987年，博士生，岩浆岩石学专业；E−mail：cugbczg@163.com。

isotopic compositions. Doroji granite is dominated by monzonitic granite and syenogranite. The monzonitic granite is composed of plagioclase (32%), K−feldspar (45%), quartz (20%), with miner biotite, muscovite, amphibole and pyroxene (3%). The syenogranite consists of quartz (10%−15%), K−feldspar (60%−70%), plagioclase (30%) with minor biotite (about 5%). Perthites is well developed in the monzonitic granite and syenogranite. Biotites are mainly ferribiotite and siderophyllite. Amphiboles are mainly kaersutite and hornblende. Pyroxenes are augites. The mineralogy indicates that the Doroji granite belongs to I−type. The εHf values of monzonitic granite range from −1.6 to 17.6, and the εHf values of syenogranite range from −3.3 to 12.2. Hf isotopic compositions of the Doroji granite indicates that the source was the juvenile crust, resulting from the remelting of the depleted basaltic rocks.

Key words: Dorolj granite; Da Hinggan Mountains; Hf isotopes; mineralogy

About the first author: CHEN Li−li, famale, born in 1988, master, majors in geological engineering; E−mail: 08chenlili@163.com.

About the corresponding author: CHENG Zhi−guo, male, born in 1987, doctor, majors in igneous petrology; E−mail: cugbczg@163.com.

Fund support: Supported by International Scientific and Technological Cooperation Projects for Countries “China and the US Pacific Metallogenic Regularity Comparison and Resource Evaluation Technology” (No. 2011DFA22460) and China Geological Survey Program(No.12120113086400)).

中亚造山带位于西伯利亚克拉通、塔里木—华北克拉通之间，由众多岩浆弧、微型陆块、洋壳残留物拼合而成，期间伴随着显著的地壳增生事件[1−5]。大兴安岭位于中亚造山带的东段，其中存在着相当数量的中酸性侵入体，这些花岗质岩石蕴藏着大量的岩石圈结构、组成和演化的信息[5−8]，可以为研究中亚造山带的构造演化提供重要约束。杜尔基岩体出露于大兴安岭中南段，是该地区比较重要的岩体之一，然而，目前关于该岩体的成因争议依然很大[9−10]，杜尔基花岗岩是否为典型的I型花岗岩以及它们的源区特征为何亟待研究，也只有理清这一点，才能更好对构造背景提供约束。本文报道了杜尔基花岗岩的矿物学和Hf同位素特征，期望对这一问题的解决有所帮助。

1 地质背景

内蒙古兴安盟杜尔基花岗岩位于距乌兰浩特市西南约300 km，大地构造位置上处于古亚洲构造域和滨西太平洋构造域的叠加部位[12−13]，区内分布着超过200000 km^{2}华力西期和燕山期中酸性侵入体，享有“花岗岩海”之称[14]。杜尔基花岗岩位于大兴安岭中南段（图1），区内出露的地层主要有二叠

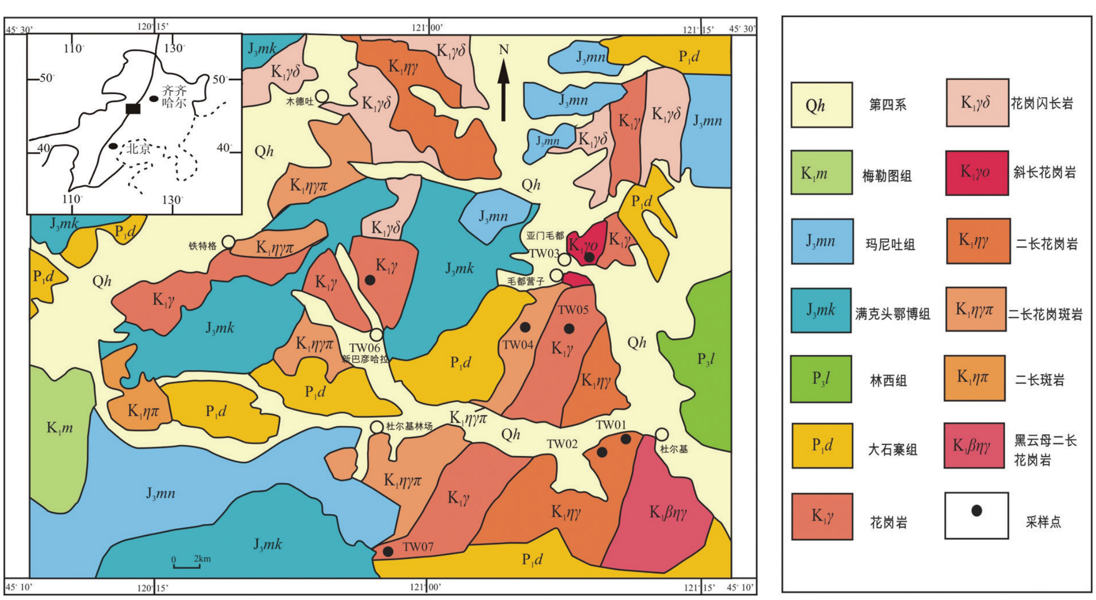

图1 杜尔基地区花岗岩地质简图（据文献[11]修改）
Fig.1 Geological sketch map of Dorolj area（modified after reference [11]）

纪大石寨组合林西组片理化凝灰质砂岩,主要分布在研究区南侧一带,侏罗纪玛尼吐组合满克头鄂博组凝灰岩分布较广,呈北东-南西向展布在研究区中,白垩纪梅勒图组安山质凝灰岩和角砾岩主要零星分布在研究区的西侧。另外,第四系在研究区分布广泛。以杜尔基镇为中心进行了野外调查,包含杜尔基镇北部区域、吐列毛杜区域、毛杜营子区域、新巴彦哈拉区域和杜尔基镇西部区域。野外路线为孟恩陶勒盖铅矿矿区-杜尔基南-杜尔基北-杜尔基林场-亚门毛都-毛杜营子-新巴彦哈拉-杜尔基西。杜尔基地区花岗岩整体发生不同程度的蚀变,呈黏土化、绿泥石化。在地貌上,杜尔基地区花岗岩二长花岗岩分布在杜尔基岩体东部,成岩时代约为130 Ma。二长花岗岩结构从中粗粒二长花岗岩向中细粒二长花岗岩逐渐过渡,主要组成矿物为斜长石(32%)、钾长石(45%)、石英(20%),次要矿物为黑云母、角闪石和辉石等暗色矿物(3%;图2)。另外,岩石发生一定程度的蚀变,可见少量的绢云母。正长花岗岩在研究区中部和东部均有分布,根据前人的成果[7,9,11],位于中部的正长花岗岩的年龄为130 Ma,位于东部的正长花岗岩年龄为213 Ma[10],两个时代的正长花岗岩的结构和构造特征相似,均具有中粗粒结构,块状构造,主要组成矿物为石英(10%~15%)、钾长石(60%~70%)和斜长石(30%),次要矿物为黑云母(约5%),岩石发生轻度的黏土化和云母化。黑云母正长花岗岩主要分布在杜尔基岩体的东南部,江思宏等报道了其成岩时代为154 Ma左右[9],结构为中细粒结构,矿物组成为石英(15%)、钾长石(50%~60%)和斜长石(15%~20%),黑云母含量较高,约为10%。

2 测试方法

本文对杜尔基花岗岩中的二长花岗岩和正长花岗岩采取样品,进行了系统的矿物学和Hf同位素研究。首先将二长花岗岩和正长花岗岩制成标准的探针片,进行详细的薄片岩石学研究,电子探针测试在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室完成。实验条件为加速电压15 kV,电流 1×10^{-8} A,束斑2~5 μm,分别对花岗岩中的长石、云母、角闪石和辉石等矿物进行测试,对分析的数据采取ZAF修正法校正。

锆石U-Pb微区Hf同位素测定分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,在LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年的基础上,进行锆石微区Hf同位素进行了分析,利用193 nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的斑束直径为50 μm,能量密度为10~11 J/cm², 频率为8~10 Hz,激光剥蚀物质以He为载气送入Neptune(LA-MC-ICP-MS)。利用

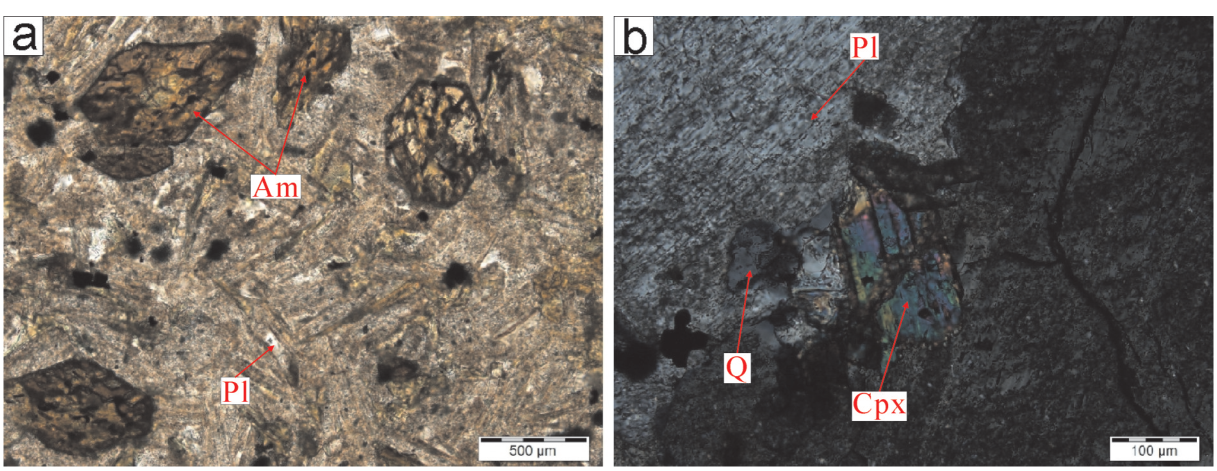

图2 杜尔基地区二长花岗岩镜下图解
a—二长花岗岩中的角闪石颗粒,单偏光;b—二长花岗岩中的辉石颗粒,正交偏光;
Q—石英;Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石;Am—角闪石
Fig.2 Microscopic illustration of adamellite from Dorolj area
a-Amphibole grains in monzonitic granite, plane-polarized light; b-Pyroxene grains in monzonitic granite, crossed-polarized light;
Q-Quartz;Pl-Plagioclase;Cpx-Clinopyroxene;Am-Amphibole

澳大利亚Macquarie大学大陆地球化学演化和矿床成因研究中心（GEMOC）标准锆石GJ-1（$^{176}Hf/^{177}Hf$=0.7325进行指数归一化校正）。详细测试流程及仪器运行条件等参见文献[15]。

3 测试结果

3.1 矿物学

长石是花岗岩的主要组成矿物，其矿物组成如表1所示。在二长花岗岩中，长石呈自形半自形板状，钾长石含量为35%~45%，粒度分布在0.15 mm×0.08 mm~5 mm×3.5 mm，斜长石含量约为30%~35%，粒度变化范围为0.1 mm×0.08 mm~5.2 mm×4 mm，且广泛发育条纹长石，其中钾长石为正长石，成分变化范围为$Ab_{2.19-14.75}An_{0.00-0.14}Or_{85.23-97.81}$，斜长石变化范围为$Ab_{88.73-99.71}An_{0.13-15.93}Or_{0.07-0.65}$，多为钠长石和更长石（图3-a）。在位于杜尔基岩体东部的正长花岗岩（213 Ma）中，钾长石含量为60%~70%，粒度在(0.24~5.2) mm×7 mm，其成分变化范围为$Ab_{5.54-62.4}An_{0.00-1.15}Or_{36.45-94.46}$(图3-a)，斜长石含量较低，多作为钠长石与钾长石构成条纹长石，其成分变化集中在$Ab_{97.3-98.23}An_{1.60-2.44}Or_{0.18-2.45}$范围内(图3-a)。位于杜尔基岩体中部的正长花岗岩（130 Ma）中，钾长石为Na-正长石，斜长石为更长石（图3-a）。

另外，在二长花岗岩中，还含有一定量的暗色矿物，如云母、角闪石、辉石等。镜下观察显示，黑云母呈片状分布于长石和石英之间，含量约为2%，粒度变化范围为0.13 mm×0.15 mm~0.27 mm×0.5 mm，发育一组解理，可见深褐色异常干涉色，测试

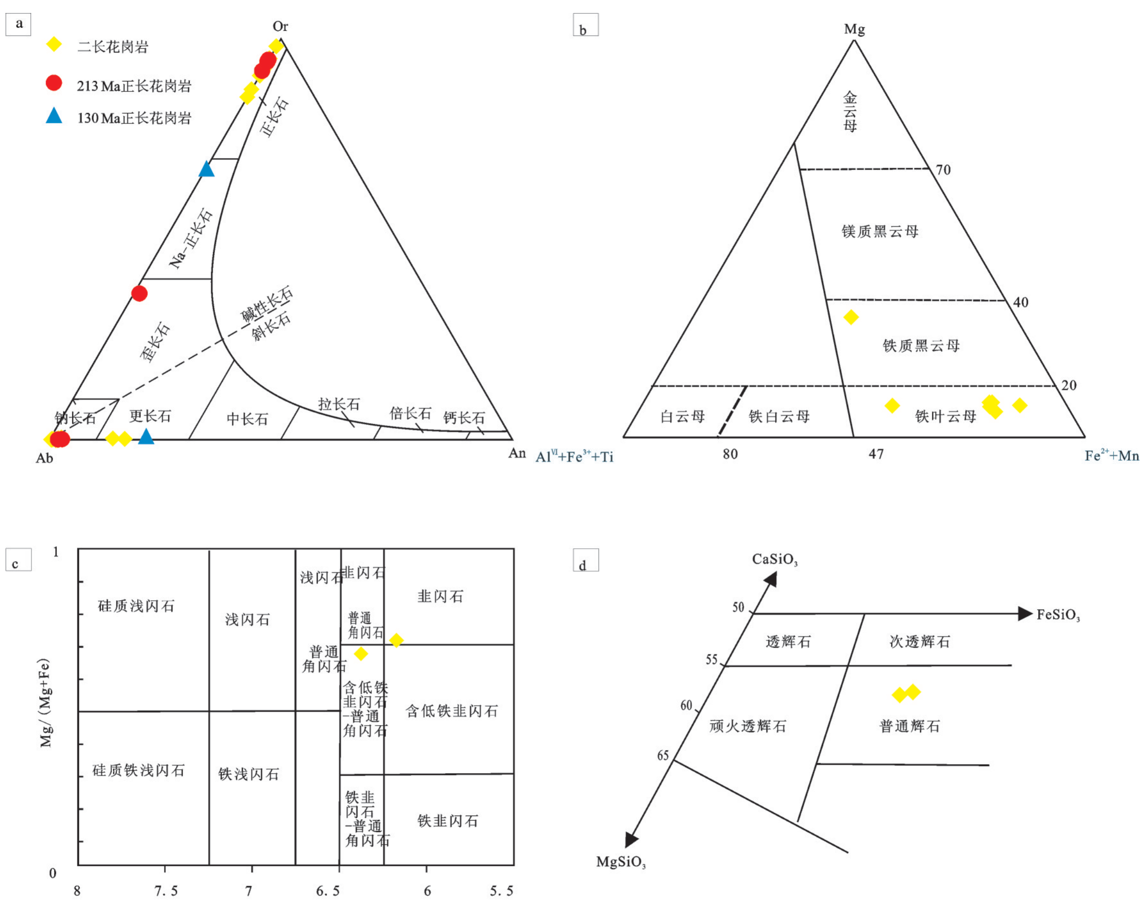

图3 内蒙古杜尔基岩体二长花岗岩和正长花岗岩的矿物学图解

a—长石分类图解；b—云母分类图解（据[16]）；c—角闪石分类图解（据[17]）；d—辉石分类图解（据[18]）

Fig.3 Mineralogical diagrams of the monzonitic granite and syenogranite in Doroji, Inner Mongolia

a–The classification of feldspar; b–The classification of biotite (after reference [16]);c–The classification of amphibole (after reference [17]); d–The classification of clinopyroxene (modified after reference [18])

表1 杜尔基地区花岗岩长石电子探针数据(%)

Table 1 Major element analyses of the feldspar in the Doroji granites(%)

分析项目	TW-01-2	TW-01-2	TW-01-1	TW-01-1	TW-02-1	TW-03-1	TW-03-1	TW-04-1	TW-04-1	TW-04-1	TW-04-1	TW-04-1	TW-04-3
	Pl	Pl	Pl	Pl	Kfs	Pl	Kfs	Pl	Pl	Pl	Kfs	Kfs	Pl
SiO_2	68.78	68.99	68.94	68.28	64.24	68.00	65.21	67.42	67.57	67.68	65.13	64.70	67.49
TiO_2	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Al_2O_3	19.86	19.63	20.93	20.08	17.80	19.35	17.92	21.09	21.16	21.10	18.47	18.36	20.58
FeO	0.14	0.16	0.13	0.21	0.00	0.02	0.00	0.03	0.03	0.03	0.06	0.00	0.06
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
CaO	0.32	0.32	0.40	0.35	0.00	0.12	0.01	0.24	0.27	0.24	0.03	0.01	0.10
Na_2O	11.05	11.17	10.35	11.03	0.25	11.31	1.05	10.59	10.46	10.42	0.83	0.57	10.83
K_2O	0.07	0.02	0.11	0.07	16.78	0.06	15.3	0.01	0.03	0.02	15.13	15.78	0.04
Total	100.22	100.29	100.86	100.02	99.07	98.88	99.54	99.44	99.57	99.50	99.65	99.44	99.11
Si	2.99	3.00	2.97	2.98	3.01	3.00	3.02	2.95	2.95	2.96	3.00	3.00	2.97
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.02	1.01	1.06	1.03	0.98	1.01	0.98	1.09	1.09	1.09	1.00	1.00	1.07
Fe	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Na	0.93	0.94	0.87	0.93	0.02	0.97	0.09	0.90	0.89	0.88	0.07	0.05	0.92
K	0.00	0.00	0.01	0.00	1.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.89	0.93	0.00
Total	4.97	4.97	4.93	4.97	5.01	4.98	4.99	4.95	4.95	4.94	4.98	4.99	4.96
Ab	98.02	98.31	97.25	97.90	2.19	99.09	9.41	98.72	98.44	98.63	7.65	5.18	99.28
An	1.55	1.58	2.10	1.71	0.00	0.58	0.05	1.22	1.40	1.25	0.14	0.03	0.48
Or	0.43	0.11	0.65	0.39	97.81	0.33	90.54	0.07	0.15	0.12	92.21	94.79	0.24

分析项目	TW-04-3	TW-04-3	TW-04-2	TW-04-2	TW-04-2	TW-04-3	TW-04-2	DT04-06	DT04-06	DT04-06	DT04-06	TW-07-01	TW-07-01
	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Pl	Pl
SiO_2	68.31	68.79	67.76	67.90	67.08	64.87	65.19	49.35	49.49	64.86	65.39	66.82	67.32
TiO_2	0.05	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.66	0.36	0.00	0.00	0.01	0.00
Al_2O_3	19.70	19.68	21.77	19.47	21.49	18.39	18.96	35.64	36.30	18.20	18.34	21.03	20.98
FeO	0.00	0.04	0.00	0.07	0.09	0.00	0.01	1.60	1.13	0.01	0.00	0.13	0.05
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.86	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.04	0.05	0.31	0.03	0.33	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.49	0.49
Na_2O	11.04	11.04	10.40	11.55	10.12	0.64	0.63	0.33	0.31	1.68	1.40	10.74	10.39
K_2O	0.05	0.03	0.05	0.03	0.03	15.32	15.07	9.03	8.71	14.77	14.39	0.04	0.06
Total	99.19	99.62	100.31	99.05	99.18	99.22	99.87	97.49	97.00	99.51	99.52	99.27	99.28
Si	3.00	3.00	2.94	2.99	2.94	3.01	2.99	2.30	2.31	3.00	3.01	2.94	2.95
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.02	1.01	1.11	1.01	1.11	1.00	1.03	1.96	2.00	0.99	1.00	1.09	1.08
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
Na	0.94	0.93	0.87	0.99	0.86	0.06	0.06	0.03	0.03	0.15	0.12	0.92	0.88
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.88	0.54	0.52	0.87	0.84	0.00	0.00
Total	4.96	4.96	4.94	5.00	4.93	4.97	4.96	4.98	4.95	5.01	4.98	4.98	4.95
Ab	99.50	99.60	98.08	99.71	98.03	5.96	6.00	5.31	5.17	14.75	12.89	97.34	97.09
An	0.20	0.23	1.62	0.13	1.77	0.00	0.03	0.00	0.09	0.02	0.00	2.45	2.54
Or	0.30	0.17	0.30	0.16	0.20	94.04	93.97	94.69	94.73	85.23	87.11	0.21	0.37

续表1

分析	TW07-2	TW07-2	TW07-2	TW-05-2	TW-05-2	TW-05-3	TW-05-3	TW-05-3	TW-05-3	TW-05-3	TW06-3	TW06-3
项目	Pl	Pl	Kfs	Pl	Kfs	Kfs	Kfs	Pl	Kfs	Pl	Pl	Kfs
SiO_2	64.08	65.05	65.19	68.23	65.27	64.97	64.40	67.79	64.50	67.05	63.41	65.84
TiO_2	0.02	0.03	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00
Al_2O_3	21.80	21.48	17.97	20.64	18.17	18.03	17.96	21.19	17.91	19.95	22.49	18.71
FeO	0.11	0.18	0.03	0.06	0.03	0.05	0.02	0.00	0.06	0.00	0.24	0.05
MgO	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	3.49	2.94	0.01	0.32	0.00	0.00	0.00	0.45	0.01	0.23	4.26	0.01
Na_2O	10.14	10.50	0.92	10.94	0.68	0.62	0.64	9.84	0.94	6.76	9.16	3.70
K_2O	0.06	0.08	15.79	0.03	16.14	16.09	16.03	0.04	15.79	6.01	0.19	11.71
Total	99.71	100.28	99.91	100.25	100.33	99.78	99.08	99.34	99.22	100.05	99.79	100.03
Si	2.84	2.86	3.01	2.97	3.01	3.01	3.01	2.96	3.00	2.98	2.81	3.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.14	1.11	0.98	1.06	0.99	0.98	0.99	1.09	0.98	1.04	1.18	1.00
Fe	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.17	0.14	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.20	0.00
Na	0.87	0.90	0.08	0.92	0.06	0.06	0.06	0.83	0.08	0.58	0.79	0.33
K	0.00	0.00	0.93	0.00	0.95	0.95	0.95	0.00	0.94	0.34	0.01	0.68
Total	5.03	5.03	5.00	4.97	5.00	5.00	5.01	4.91	5.01	4.96	5.00	5.01
Ab	83.73	86.20	8.13	98.23	6.05	5.54	5.72	97.30	8.28	62.40	78.70	32.41
An	15.93	13.35	0.03	1.60	0.00	0.00	0.00	2.44	0.03	1.15	20.22	0.06
Or	0.34	0.45	91.84	0.18	93.95	94.46	94.28	0.25	91.69	36.45	1.09	67.52

结果显示黑云母多为铁质黑云母和铁叶云母(表2,图3−b)。另外,角闪石和辉石作为粒间矿物出现,角闪石主要是韭闪石和普通角闪石(表3,图3−c),辉石为普通辉石(表3,图3−d)。

3.2 Hf同位素

杜尔基花岗岩中的锆石呈短柱状、长柱状双锥自形晶,颗粒较大,长度为90~200 μm,CL图像具有明显的振荡环带,呈现出岩浆锆石的典型特征。本次研究分别对二长花岗岩、正长花岗岩进行了Hf同位素分析,结果见表4。对已完成U−Pb测年的32颗二长花岗岩(U−Pb年龄为131 Ma[10])中锆石的Hf同位素分析得出,$^{176}Hf/^{177}Hf$比值变化范围为0.282648~0.283189,平均值为0.282908,$\varepsilon_{Hf}(t)$范围为−1.6~17.6,平均值为7.68,二阶段亏损地幔模式年龄(T_{DM2})变化范围为581~1290 Ma。位于杜尔基岩体东部的正长花岗岩样品(U−Pb年龄为213 Ma[10])中,27个锆石测点$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282737~0.282989,平均值为0.282926,$\varepsilon_{Hf}(t)$范围为3.3~12.2,平均值为10.11,二阶段亏损地幔模式年龄(T_{DM2})变化范围497~1037 Ma。另外,对一颗U−Pb年龄为448 Ma的锆石的测试结果显示,初始$^{176}Hf/^{177}Hf$偏小(0.282390),$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−3.8。位于杜尔基岩体中部的正长花岗岩样品(U−Pb年龄为130 Ma[10])中的锆石测点$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282844~0.282970,平均值为0.282910,$\varepsilon_{Hf}(t)$范围为5.4~9.8,平均值为7.82,二阶段亏损地幔模式年龄(T_{DM2})变化范围557~842 Ma。

4 讨 论

4.1 矿物学对杜尔基花岗岩源区的指示

花岗岩的矿物学特征可以成为区分其类型的重要标志之一。不同类型的花岗岩往往会呈现出不同的矿物学组合,比如,S型花岗岩以出现过铝的矿物(白云母、铁铝榴石、堇青石等)为特征,A型花岗岩常出现富钠的角闪石和辉石,而I型花岗岩中普遍含有角闪石。根据本文的测试结果,二长花岗岩中并没有发现铁铝榴石等过铝矿物,暗色矿物主要为黑云母、角闪石和辉石,而且角闪石和辉石均不是富钠的变种,矿物学总体呈现出一个I型花岗

表2 杜尔基地区花岗岩黑云母电子探针数据(%)
Table 2 Major element analyses of the biotite in the Doroji granites(%)

分析项目	TW-03-1	TW-03-1	TW-03-1	TW-03-1	TW-03-2	TW07-2	TW07-2	TW07-2	TW-01-2	TW-07-01	TW-07-01
SiO_2	46.52	47.49	46.99	48.64	36.54	31.63	34.84	35.83	30.19	36.69	36.53
TiO_2	0.23	0.26	0.33	0.10	4.19	0.99	2.50	2.12	0.06	1.92	1.76
Al_2O_3	29.85	30.02	30.64	32.54	15.72	13.77	13.05	12.67	18.88	11.89	12.05
FeO	7.18	7.35	6.08	4.90	15.83	34.95	31.73	30.60	29.41	31.01	30.47
MnO	0.40	0.51	0.28	0.17	0.11	0.47	0.59	0.63	0.37	0.81	0.72
MgO	0.60	0.67	0.69	0.56	12.85	5.66	3.57	4.14	5.02	4.81	4.73
CaO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Na_2O	0.30	0.22	0.35	0.37	0.68	0.11	0.16	0.05	0.10	0.08	0.03
K_2O	9.24	8.52	9.34	8.35	7.96	4.56	9.01	9.35	0.50	9.25	9.29
Total	96.13	96.53	95.65	96.39	94.55	92.28	95.89	95.79	84.57	97.77	96.52
Si	3.15	3.18	3.18	3.21	2.75	2.67	2.83	2.90	2.62	2.91	2.92
Al^{IV}	0.85	0.82	0.82	0.79	1.25	1.33	1.17	1.10	1.38	1.09	1.08
Al^{VI}	1.53	1.56	1.62	1.73	0.14	0.04	0.08	0.10	0.55	0.02	0.06
Ti	0.01	0.01	0.02	0.00	0.24	0.06	0.15	0.13	0.00	0.11	0.11
Fe^{3+}	0.41	0.41	0.34	0.27	0.33	0.17	0.18	0.18	0.55	0.25	0.23
Fe^{2+}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	2.30	1.98	1.89	1.58	1.81	1.81
Mn	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05
Mg	0.06	0.07	0.07	0.05	1.44	0.71	0.43	0.50	0.65	0.57	0.56
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.03	0.05	0.05	0.10	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00
K	0.80	0.73	0.81	0.70	0.76	0.49	0.93	0.96	0.06	0.93	0.95
Total	6.87	6.84	6.91	6.82	7.67	7.83	7.82	7.82	7.45	7.75	7.77
MF	0.12	0.13	0.16	0.16	0.59	0.22	0.16	0.19	0.23	0.21	0.21
$Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti$	1.95	1.98	1.98	2.01	0.70	0.28	0.41	0.42	1.11	0.38	0.39
$Fe^{2+}+Mn$	0.02	0.03	0.02	0.01	0.68	2.33	2.02	1.93	1.61	1.86	1.86
Ti/(Mg+Fe+Ti+Mn)	0.02	0.02	0.04	0.01	0.09	0.02	0.05	0.05	0.00	0.04	0.04
Al/(Al+Mg+Fe+Ti+Mn+Si)	0.39	0.39	0.40	0.42	0.20	0.19	0.18	0.18	0.26	0.16	0.17

岩的特征,指示其源区仍以火成岩为主。

4.2 Hf同位素对杜尔基花岗岩源区的制约

Zr和Hf具有相似的地球化学性质,二者可以通过类质同象存在于锆石中,锆石中可以含有1%~2%的HfO_2,同时具有极低的Lu/Hf比值(<0.002)[19-20],锆石形成后的Hf同位素受放射性同位素^{176}Lu衰变而形成的^{176}Hf影响较小。另外,锆石具有很高的Hf同位素封闭温度,有能力保留锆石的初始Hf同位素特征。因此,锆石Hf同位素常常作为研究岩石成因的有效手段[21-22],最新的研究表明,锆石Hf同位素对示踪花岗岩源区有着重要意义[23-26],如果花岗质岩石具有正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值,则被认为它们可能是起源于亏损地幔或者是新生地壳部分熔融的产物,若呈现出负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值,则说明花岗质岩石可能起源于古老地壳的重融[7,27]。杜尔基花岗岩中的二长花岗岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化范围为−1.6~17.6,213 Ma的正长花岗岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$范围为3.3~12.2,130 Ma正长花岗岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$范围为5.4~9.8(图4−a),由此可见,杜尔基地区花岗岩的Hf同位素特征以$\varepsilon_{Hf}(t)$正值为特征,说明岩浆源区是以新生的地壳物质为主。通过数据统计显示,它们的初始$^{176}Hf/^{177}Hf$值集中分布在0.2829附近,$\varepsilon_{Hf}(t)$值亦相互重叠(图4−b),二阶段模式年龄分布在500~800 Ma,指示杜尔基花岗岩中各岩性单元可能来自于同一个源区。杜尔基地区花岗岩位于以NE

表3 杜尔基地区花岗岩角闪石电子探针数据(%)

Table 3 Major element analyses of the amphibole in the Doroji granites(%)

分析项目	TW-03-2	TW-03-2
	二长花岗岩	二长花岗岩
SiO_2	40.92	41.92
TiO_2	1.98	2.62
Al_2O_3	13.32	10.65
FeO	11.72	13.69
MnO	0.09	0.17
MgO	13.05	12.08
CaO	10.74	10.66
Na_2O	2.44	2.33
K_2O	0.13	0.15
F	0.19	0.44
Cl	0.01	0.02
Total	94.59	94.72
Si	6.19	6.40
Al^{IV}	1.81	1.60
Al^{VI}	0.57	0.31
Ti	0.23	0.30
Fe^{3+}	0.28	0.41
Fe^{2+}	1.20	1.34
Mn	0.01	0.02
Mg	2.95	2.75
Ca	1.74	1.74
Na	0.72	0.69
K	0.03	0.03
Total	15.72	15.59
Si_T*	6.19	6.40
Al_T	1.81	1.60
Al_C	0.57	0.31
Fe^{3+}_C	0.28	0.41
Ti_C	0.23	0.30
Mg_C	2.95	2.75
Fe^{2+}_C	0.98	1.23
Fe^{2+}_B	0.22	0.11
Mn_B	0.01	0.02
Ca_B	1.74	1.74
Na_B	0.02	0.12
Ca_A	0.00	0.00
Na_A	0.69	0.56
K_A	0.03	0.03

走向为主的岩浆带中，呈现出I型花岗岩的特征，因此为地幔岩浆-热作用与地壳物质重熔的产物。

表4 杜尔基地区花岗岩辉石电子探针数据(%)

Table 4 Major element analyses of the feldspar in the Doroji granites(%)

分析项目	TW-03-2	TW-03-2
	二长花岗岩	二长花岗岩
SiO_2	51.91	51.94
TiO_2	0.50	0.37
Al_2O_3	2.06	1.89
Cr_2O_3	0.04	0.02
FeO	10.31	10.47
MnO	0.20	0.35
MgO	13.59	13.55
CaO	19.90	20.28
Na_2O	0.40	0.35
K_2O	0.00	0.00
Total	98.86	99.20
Si	1.96	1.96
$Al^{(iv)}$	0.04	0.04
$Al^{(vi)}$	0.05	0.04
Ti	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00
Fe^{3+}	0.00	0.00
Fe^{2+}	0.33	0.33
Mn	0.01	0.01
Mg	0.76	0.76
Ca	0.80	0.82
Na	0.03	0.03
K	0.00	0.00
Wo	41.69	42.06
En	39.62	39.11
Fs	17.20	17.52
Ac	1.50	1.31

5 结 论

本文对杜尔基地区花岗岩中的主要岩性单元二长花岗岩和正长花岗岩做了系统的矿物学和Hf同位素研究。两种花岗岩均广泛发育条纹长石，二长花岗岩中的暗色矿物主要是黑云母、角闪石和辉石，而且不是碱性变种，指示其为I型花岗岩的矿物学特征。另外，结合锆石Hf同位素研究，表明起源

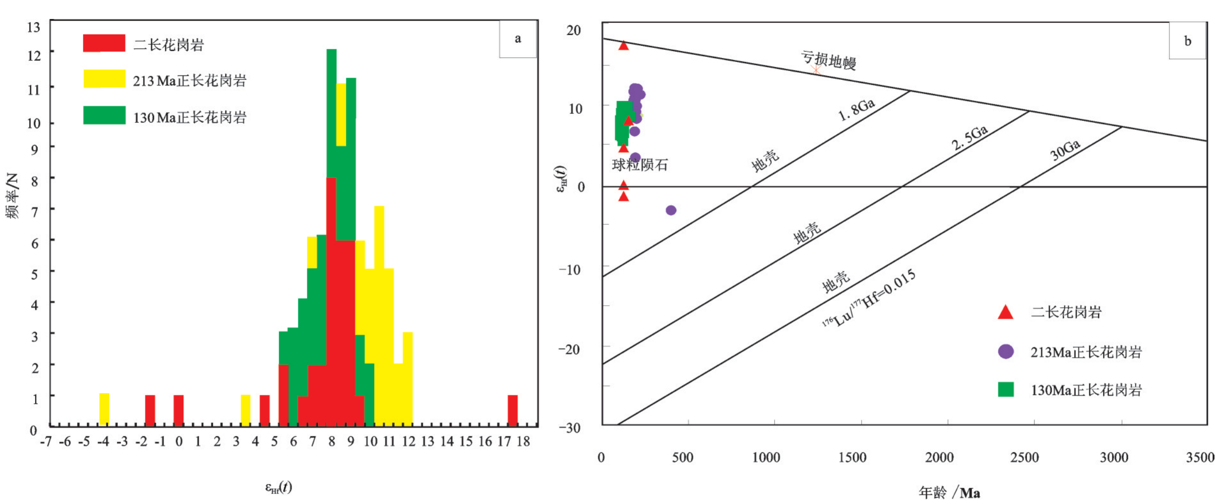

图4 杜尔基地区岩体中锆石Hf同位素直方图和特征

Fig.4 Hf isotopic histograms and features of zircons from the Doroji granites

表5杜尔基地区花岗岩Hf同位素数据

Table 5 Hf isotopic compositions of the Doroji granites

二长花岗岩	Age /Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Lu/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Hf/^{177}Hf(corr)$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
TW.03.1.1	131	0.11	0.0024	0.282913	0.000023	5	7.6	500	698	-0.9274
TW.03.1.3	131	0.0594	0.0008	0.282922	0.000031	5.3	8.1	465	668	-0.9769
TW.03.1.4	132	0.2283	0.0011	0.282822	0.000032	1.8	4.6	611	896	-0.9681
TW.03.1.5	132	0.1013	0.0005	0.282904	0.000027	4.7	7.5	487	706	-0.9842
TW.03.1.6	131	0.1265	0.0007	0.282897	0.000032	4.4	7.2	499	724	-0.9803
TW.03.1.7	132	0.1712	0.0013	0.282648	0.000043	-4.4	-1.6	863	1290	-0.9607
TW.03.1.8	132	0.1848	0.0004	0.282685	0.000049	-3.1	-0.2	790	1201	-0.9878
TW.03.1.9	132	0.1229	0.0027	0.282929	0.000021	5.6	8.2	479	662	-0.9191
TW.03.1.10	163	0.0637	0.0006	0.282903	0.000034	4.6	8.1	489	690	-0.9832
TW.03.1.12	132	0.0662	0.0003	0.282959	0.000039	6.6	9.5	408	581	-0.9916
TW.03.1.14	132	0.1078	0.0007	0.283189	0.000056	14.8	17.6	410	590	-0.9776
TW.03.1.16	131	0.1949	0.0041	0.282923	0.000036	5.3	7.9	509	684	-0.8757
TW.03.1.17	131	0.097	0.0004	0.282928	0.000023	5.5	8.4	452	652	-0.9868
TW.03.1.18	132	0.1544	0.0007	0.282918	0.000034	5.1	8	471	677	-0.9778
TW.03.1.19	131	0.0937	0.0006	0.282939	0.000031	5.9	8.7	440	629	-0.981
TW.03.1.20	131	0.0805	0.0003	0.282844	0.000033	2.5	5.4	568	843	-0.9908
TW.03.1.21	148	0.2186	0.0018	0.282937	0.000045	5.8	8.9	456	630	-0.9455
TW.03.1.22	131	0.0968	0.0036	0.282892	0.000024	4.2	6.8	549	752	-0.8901
TW.03.1.23	133	0.1476	0.0005	0.282942	0.00003	6	8.9	434	620	-0.9847
TW.03.1.24	225	0.1201	0.001	0.282877	0.000021	3.7	8.5	531	714	-0.9688
TW.03.1.25	132	0.1129	0.0014	0.282877	0.000021	3.7	6.5	537	774	-0.9586
TW.03.1.26	131	0.1081	0.0004	0.282945	0.00004	6.1	9	428	613	-0.9883
TW.03.1.28	131	0.1044	0.001	0.282853	0.000037	2.9	5.6	566	826	-0.9695
TW.03.1.31	132	0.0967	0.0019	0.282932	0.000031	5.6	8.4	466	652	-0.9416
TW.03.1.32	132	0.1993	0.0008	0.282923	0.000036	5.3	8.2	464	666	-0.9759
TW.03.1.34	131	0.1306	0.0004	0.282923	0.000029	5.3	8.2	459	663	-0.9874
TW.03.1.36	131	0.1719	0.0061	0.282942	0.000031	6	8.4	509	653	-0.817
TW.03.1.37	131	0.1338	0.0016	0.282921	0.000032	5.3	8	477	675	-0.9505
TW.03.1.39	132	0.1833	0.0006	0.282941	0.00003	6	8.8	435	622	-0.982
TW.03.1.40	131	0.1197	0.0004	0.28295	0.000029	6.3	9.2	421	601	-0.9867
TW.03.1.43	130	0.1767	0.0033	0.282935	0.000027	5.8	8.3	478	652	-0.9011
TW.03.1.47	134	0.1897	0.0004	0.282945	0.000035	6.1	9	428	611	-0.9886
正长花岗岩	Age /Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Lu/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Hf/^{177}Hf(corr)$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1} /Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
TW.05.4.2	213	0.0615	0.0011	0.282988	0.000024	7.7	12.2	375	470	-0.966
TW.05.4.3	213	0.1109	0.0011	0.28293	0.000028	5.6	10.1	458	603	-0.967
TW.05.4.5	218	0.097	0.0006	0.282955	0.000026	6.5	11.2	416	538	-0.9805
TW.05.4.7	212	0.074	0.0003	0.282935	0.000025	5.8	10.4	440	584	-0.9924
TW.05.4.10	214	0.0713	0.0001	0.282942	0.000019	6	10.7	430	567	-0.9963
TW.05.4.17	214	0.0598	0.0002	0.282902	0.000025	4.6	9.3	485	657	-0.9946
TW.05.4.19	213	0.082	0.0007	0.282951	0.000023	6.3	10.9	423	552	-0.9775
TW.05.4.21	214	0.1289	0.0014	0.282926	0.000027	5.5	10	466	613	-0.9587
TW.05.4.22	213	0.0832	0.0006	0.28294	0.000021	5.9	10.5	438	577	-0.9813
TW.05.4.30	214	0.1419	0.0007	0.282737	0.000031	-1.2	3.3	725	1037	-0.9775
TW.05.4.36	218	0.0657	0.0005	0.282937	0.000027	5.8	10.6	440	577	-0.9855
TW.05.4.33	212	0.1074	0.0014	0.282946	0.000047	6.2	10.6	438	569	-0.958
TW.05.4.40	191	0.043	0.0001	0.282945	0.000025	6.1	10.3	425	574	-0.9977
TW.05.4.44	186	0.1157	0.0008	0.282894	0.000024	4.3	8.3	506	699	-0.9754
TW.05.4.46	212	0.0935	0.0042	0.282989	0.000024	7.7	11.8	407	497	-0.8741
TW.05.4.8	235	0.0397	0.0004	0.282819	0.00002	1.7	6.8	604	834	-0.9877
TW.05.4.14	238	0.0267	0.0005	0.282909	0.00002	4.8	10	480	629	-0.9853
TW.05.4.15	222	0.0673	0.0004	0.282905	0.000022	4.7	9.5	484	648	-0.9872
TW.05.4.16	448	0.0699	0.0003	0.28239	0.000024	-13.5	-3.8	1197	1667	-0.9896
TW.05.4.24	232	0.1413	0.001	0.282972	0.000022	7.1	12	397	495	-0.9695
TW.05.4.27	239	0.0379	0.001	0.282957	0.00002	6.5	11.6	418	525	-0.9701
TW.05.4.28	221	0.0896	0.0013	0.282951	0.000031	6.3	11	431	554	-0.9597
TW.05.4.36	222	0.0751	0.0005	0.282901	0.000027	4.6	9.4	491	657	-0.9842
TW.05.4.38	221	0.0786	0.0003	0.282873	0.00002	3.6	8.4	527	720	-0.9919
TW.05.4.41	221	0.0839	0.0008	0.282951	0.000021	6.3	11.1	424	547	-0.9759
TW.05.4.42	221	0.0814	0.0003	0.282936	0.000018	5.8	10.6	440	577	-0.99
TW.05.4.43	220	0.0701	0.0017	0.282956	0.000022	6.5	11.1	428	546	-0.9485
TW.05.4.48	221	0.0787	0.0005	0.282959	0.000021	6.6	11.4	411	528	-0.9839
TW.06.2.1	131	0.063	0.0002	0.282844	0.000021	2.5	5.4	566	842	-0.9953
TW.06.2.2	148	0.0789	0.001	0.282959	0.000026	6.6	9.8	416	576	-0.9689
TW.06.2.4	128	0.0696	0.0002	0.282902	0.000018	4.6	7.4	485	711	-0.9935
TW.06.2.5	128	0.053	0.0001	0.282886	0.000023	4	6.8	507	748	-0.9964

续表5

正长花岗岩	Age /Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Lu/^{177}Hf(corr)$	$^{176}Hf/^{177}Hf(corr)$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1} /Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
TW.06.2.7	128	0.0574	0.0004	0.282866	0.000024	3.3	6.1	538	794	-0.9882
TW.06.2.9	151	0.0987	0.0011	0.28293	0.000031	5.6	8.8	457	639	-0.9669
TW.06.2.10	129	0.0558	0.002	0.282949	0.000026	6.3	8.9	440	614	-0.9401
TW.06.2.11	130	0.0487	0.0003	0.282951	0.00002	6.3	9.2	419	600	-0.992
TW.06.2.12	128	0.0558	0.0002	0.28292	0.000021	5.2	8	461	671	-0.9943
TW.06.2.14	130	0.0582	0.0006	0.282862	0.00002	3.2	6	546	803	-0.9827
TW.06.2.15	130	0.044	0.0002	0.282863	0.000019	3.2	6.1	539	798	-0.995
TW.06.2.17	131	0.0576	0.0002	0.282877	0.00002	3.7	6.6	520	767	-0.9947
TW.06.2.18	132	0.0675	0.0006	0.282886	0.000029	4	6.9	514	748	-0.9807
TW.06.2.19	131	0.0549	0.0005	0.282917	0.000024	5.1	8	469	678	-0.985
TW.06.2.20	131	0.0865	0.0006	0.282941	0.000028	6	8.8	436	624	-0.9811
TW.06.2.21	130	0.0947	0.0013	0.282901	0.000028	4.5	7.3	502	720	-0.9602
TW.06.2.24	132	0.0862	0.0007	0.282873	0.000028	3.6	6.4	533	778	-0.9793
TW.06.2.26	131	0.063	0.0004	0.282872	0.000029	3.5	6.4	531	780	-0.9869
TW.06.2.27	130	0.0425	0.0001	0.282901	0.000026	4.6	7.4	487	713	-0.9958
TW.06.2.28	132	0.0449	0.0009	0.282898	0.000021	4.5	7.3	500	721	-0.9736
TW.06.2.29	132	0.0578	0.0003	0.282951	0.000023	6.3	9.2	419	599	-0.9909
TW.06.2.30	152	0.03	0.0012	0.282882	0.000031	3.9	7.1	527	748	-0.9639
TW.06.2.31	130	0.0536	0.0001	0.28292	0.000025	5.2	8.1	460	670	-0.9963
TW.06.2.33	131	0.0808	0.0002	0.282933	0.000026	5.7	8.5	443	641	-0.9945
TW.06.2.34	150	0.0424	0.0006	0.282927	0.000017	5.5	8.7	456	645	-0.9821
TW.06.2.38	150	0.0318	0.0001	0.282922	0.000025	5.3	8.6	457	653	-0.9974
TW.06.2.39	151	0.0439	0.0004	0.282942	0.000021	6	9.3	432	608	-0.9893
TW.06.2.41	152	0.0591	0.001	0.282952	0.000025	6.4	9.6	426	589	-0.9694
TW.06.2.45	130	0.0815	0.0002	0.28297	0.000028	7	9.8	392	557	-0.9932
TW.06.2.13	149	0.0302	0.0001	0.28291	0.000019	4.9	8.1	473	680	-0.9972

于地幔的新生地壳物质在杜尔基地区花岗岩的形成中起主导作用。

参考文献(References):

[1]邓晋福, 腾吉文, 彭聪, 等. 中国地球物理场特征及深部地质与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
Deng Jinfu, Teng Jiwen, Peng Chong, et al. Chinese Geophysical Field Character and Deep Geologicaland Prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008(in Chinese).

[2] Xiao W J, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. Gondwana Research, 2012, 1−12.

[3] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京:地质出版社, 1999.
Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. Looked from the Global Tectonic, China——China and its Adjacent Area Tectonic Map Brief Explanation[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1999(in Chinese).

[4] Jahn B M , Wu F, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asian: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 2000, 23(2): 82−92.

[5] 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 火成岩构造组合与壳−幔成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 259−269.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Igneous petrotectonic assemblage and crust−mantlemetallogenic system[J]. Earth Science Fronties, 1999, 6(4): 259− 269(in Chinese with English abstract).

[6] 周漪, 葛文春, 王清海. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(05): 1−23.
Zhou Yi, Ge Wenchun, Wang Qinghai. Petrogenesisof Mesozoic granite in Wulanhaote region, cental Da Hinggan Mountains: Constraints from geochemistry and Sr− Nd− Hf isotope[J]. Acta Petrologicaet Mineralogica, 2011, 30(5): 1− 23 (in Chinese with English abstract).

[7] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J].长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313−318.
Wu Fuyuan, Sun Haide. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(4): 313− 318(in Chinese with English abstract).

[8] 邓晋福，赵国春，苏尚国，等. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(2): 157−165 .
Deng Jinfu, Zhao Guochun, Su Shangguo, et al. Structure overlap and tectonic setting of Yanshanorogenicbelt in Yanshan era[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(2): 157− 165 (in Chinese with English abstract).

[9] 江思宏，聂凤军，刘翼飞，等. 内蒙古孟恩陶勒盖银多金属矿床及其附近侵入岩的年代学[J]. 吉林大学报(地球科学版), 2011,41(6):1755−1769.
Jing Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, et al. Geochronology of Intrusive Rocks Occurring in and around the Mengentaolegai

Silver- Polymetallic Deposit, Inner Mongolia[J]. Journal of Jinlin University(Earth ScienceEdition), 2011, 41(6): 1755- 1769 (in Chinese with English abstract).

[10] 陈丽丽，程志国.内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩岩石学及锆石U-Pb年龄[J].中国地质, 2015, 42(4): 891-908.
Chen Lili,Cheng Zhiguo. Petrology and zircon chronology of the Dorolj granite in HingganLeague,Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 891-908(in Chinese with English abstract).

[11] 于福生, 吉珍娃, 王彦华. 大兴安岭中南段杜尔基地区早白垩世侵入岩岩石地球化学特征及构造环境[J].资源调查与环境, 2012,30(1): 1-8.
Yu Fusheng, Ji Zhenwa, Wang Yanhua. Study on characteristics of Mesozoic intrusive rocks in Suolunzhenarea,Ulanhot, Inner Mongolia[J]. Resources Survey & Environment, 2012, 33(1):1-8 (in Chinese withEnglish abstract).

[12] Wang H, Ren Y S, Hou H N. The genesis and mineralization age of the Dashihe Mo deposit in Yanbian, Jilin Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011,1：96-97.

[13]Wang J G, He Z Z, Xu W L. Petrogenesis of riebeckite rhyolites in the southern Da Hinggan Mts:Geochronological and geochemical evidence[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 853-863.

[14] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 1-30.

[15] 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等.锆石Hf同位素组成的LA-MC-ICP-MS测定 [J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1508-1513.
Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, et al. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10):1508- 1513(in Chinese with English abstract).

[16] Foster M D.Interpretation of the composition of trioctahedralmicas[J]. U S Geological Survey Professional Paper, 1960, 354(B): 11-49.

[17] Leake B E, Woolley A R, Arps CES. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new mineral and mineral names[J]. American Mineralogist, 1997, 82, 1019-1037.

[18] 鲍佩声，苏梨，翟庆国，等.新疆巴楚地区金伯利岩角砾橄榄岩物质组成及含矿性研究[J]. 地质学报，2009，83(9): 1276-1301.
Bao Peisheng, Su Li, Zhai Qingguo, et al. Compositions of the kimberlitic brecciated peridotite in the Bachu area, Xinjiang and its ore-bearing potentialities[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83：1276-1301 (inChinese with English abstract).

[19] 凌文黎, 程建萍. Lu-Hf同位素体系对若干基础地质问题的新制约(之一)——地球早期演化 [J].地质科技情报, 1999, 18(1): 79-84.
Ling Wenli, Cheng Jianping. New constraints of Lu- Hf isotope on some critical geological issues (Ⅰ): Early evolution of the earth [J].Geological Science and Technology Information, 1999, 18(1): 79-84 (inChinese with English abstract).

[20] 李献华, 梁细荣, 韦刚健, 等，锆石Hf同位素组成的LAM-MC-ICPMS精确测定 [J]. 地球化学, 2003, 32(1): 86-90.
Li Xianhua, Liang Xirong, Wei Gangjian, et. Precise analysis of zircon Hf isotopes by LAM-MC-ICPMS [J]. Geochimica, 2003, 32(1): 86-90 (inChinese with English abstract).

[21] Andersen T , Griffin W L , Pearson N J . Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: The Hf isotope evidence[J]. Journal of Petrology, 2002, 43(9): 1725-1747.

[22] Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U- Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons[J].Precambrian Research, 2004, 131 (3-4): 231-282.

[23] Vervoort J D, Patchett P J. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60 (19): 3717-3733.

[24] Scherer E E, Cameron K L, Blichert Toft J. Lu- Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm- Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(19): 3413-3432.

[25] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma genesis, S.E China: In- situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtanigneous complexes[J]. Lithos, 2002, 61(3/4): 237-269.

[26] Zhang D Y, Zhang Z C, EncarnacionJ,et al. Petrogenesis of the Kekesai composite porphyry intrusion, western Tianshan, NW China:Implications for metallogenesis, tectonic evolution and continental growth during Late Paleozoic Time[J]. Lithos, 2012, 146-147: 65-79.

[27] 邱检生，肖娥，胡建，等. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因：锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约[J].岩石学报, 2008, 24(11): 2468-2484.
Qiu Jiansheng, Xiao Er, Hu Jian, et. Petrogenesis of highly fractionated I- type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U- Pb geochronology, geochemistry and Nd- Hfisotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2468-2484 (in Chinese with English abstract).