

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 Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 891-908(in Chinese with English abstract).

内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩岩石学 及锆石 U-Pb 年龄

陈丽丽 程志国

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩位于大兴安岭中南段, 大地构造位置上处于古亚洲洋构造域、蒙古—鄂霍茨克洋构造域和滨西太平洋构造域的叠加部位。该区域集中保存了大量与造山事件有关的构造和岩浆记录, 是研究大兴安岭地区造山过程、演化及后期造山作用叠加和改造的理想地区。杜尔基花岗岩主要由中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗斑岩组成。从主量元素上看, 杜尔基地区花岗岩属于过铝质高钾钙碱性系列, 整体呈现高硅、高碱、过铝、低钙的特征。岩体中 SiO_2 含量大于 72%, 表现为高分异花岗岩的特征。黑云母是本地区花岗岩中主要的暗色矿物, P_2O_5 与 SiO_2 呈现负相关性, 这些特征指示杜尔基地区花岗岩具有 I 型岩浆岩的特点。本文采用了激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)技术, 对杜尔基地区花岗岩中的锆石进行 U-Pb 同位素测试。测试结果表明, 位于杜尔基镇北侧中细粒二长花岗岩岩体的侵位年龄为 (131.5 ± 0.3) Ma; 位于杜尔基镇中部的正长花岗岩岩体的侵位年龄为 (213 ± 1) Ma, 其中并含有一定量的 (238 ± 2) Ma 的年龄信息, 为捕掳锆石, 表明在正长花岗岩侵位之前可能还存在一期 238 Ma 的岩浆活动; 位于杜尔基镇西侧的正长花岗岩岩体的侵位年龄为 (131 ± 1) Ma, 其中含有一定量的 (150 ± 1) Ma 的年龄信息, 为捕掳锆石, 表明在正长花岗岩侵位前存在一期较早的岩浆活动。可将杜尔基地区花岗岩岩浆活动划分为 3 期: 中晚三叠世(213 Ma), 晚侏罗世(150 Ma), 早白垩世(130 Ma)。杜尔基岩体所呈现的 3 期岩浆活动, 均指示了一个拉张的构造背景, 而缺少与俯冲相关的岩浆活动。从年龄上看, 杜尔基岩体总体缺少早侏罗纪的岩浆活动, 因而与其周边的孟恩陶勒盖锌铅银矿具有成因上的联系的可能性不大。

关键词: 古亚洲洋构造域; 大兴安岭; 杜尔基花岗岩; “花岗岩海”; 锆石 U-Pb 年龄; LA-ICP-MS

中图分类号: P619.22⁺.2; P597⁺.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)04-0891-18

Petrology and zircon chronology 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)

收稿日期: 2014-12-25; 改回日期: 2015-04-17

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”(201110FA22460)资助。

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

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

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2015, 42(4)

Abstract: Located in the southern part of the Da Hinggan Mountains of Inner Mongolia, Dorolj granite lies on the superimposition position between ancient Asian tectonic domain, Mongol–Okhotsk tectonic domain and West Pacific plate tectonic domain. The rocks have preserved large amounts of tectonic and magmatic signatures of two orogenic events, and hence Dorolj granite is an ideal object for studying the orogenic process, evolution and post–orogenic superimposition and transformation. Dorolj granite is composed of four units, i.e., medium–fine grained monzonitic granite, coarse–medium grained monzonitic granite, syenogranite, and medium–fine grained biotite–bearing monzonitic granite. Major elements show that Dorolj granite belongs to peraluminous high K calc–alkaline rock series, and is characterized by high silicon, high alkali, peraluminous nature and low calcium. The biotite is the main dark mineral, and P_2O_5 decreases with increasing SiO_2 . These characteristics indicate that the Dorolj plutons belong to the I–type granite. The authors tried to probe into the petrology and chronology of the Dorolj granite using the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA–ICP–MS). The results show that the medium–fine grained monzonitic granite located on the northern side has the emplacement age of $(132 \pm 0.3)Ma$, whereas the syenogranite granite located in the middle part has the emplacement age of $(213 \pm 1)Ma$ with $(238 \pm 2)Ma$ zircon xenocrysts, indicating that there existed an early magma activity. In addition, the syenogranite located on the western side has the emplacement age of $(131 \pm 1)Ma$ with $(150 \pm 1)Ma$ zircon xenocrysts. Dorolj magmatic ages have a large span and can be divided into three ranges: (1) the late Triassic (213 Ma); (2) the late Jurassic (150 Ma); (3) Early Cretaceous (130 Ma). These three episodes of magma indicate an extensive environment without any subduction events. Based on the age data obtained by the authors, the Dorolj granites lack magmatism of Jurassic period. It is thus held that the Dorolj granites had nothing to do with the Mengentaolegai silver–polymetallic deposit.

Key words: Ancient Asian tectonic domain; Da Hinggan Mountains; Dorolj granite; zircon U–Pb age; LA–ICP–MS

About the first author: CHEN Li–li, female, 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.

中国大兴安岭地区位于中亚造山带的东部,北邻西伯利亚克拉通,南接华北克拉通(图1)^[1–2],其由众多不同构造属性的地体拼合而成,期间伴随着显著的地壳增生事件^[3–5]和多期次、多类型的成矿作用^[6–7],产生了一系列的热液脉型铅锌银、斑岩型铜钼、矽卡岩型铁、造山型金等矿床。因此,对大兴安岭地区的研究具有极其重要的科学意义和经济意义。大兴安岭地区先后受古亚洲洋、蒙古–鄂霍茨克洋和太平洋三个构造体制在时间和空间上的叠加与改造,在如此复杂的构造背景下,对不同时期岩浆活动构造背景的探讨变得非常困难,这三大构造的叠加作用时间及作用范围,是近年来的一个热点。与此同时,大兴安岭地区存在着相当数量的岩浆岩侵入体,其中大多数由花岗质岩石组成(图1)^[8–9],这些花岗质岩石蕴含着大量的岩石圈结构、组成和演化的信息,可以为研究本地区的构造演化提供很多重要的约束^[10–11]。

杜尔基地区花岗岩位于大兴安岭中南段,是本地区出露面积较大的岩体之一(约 $190 km^2$)^[12]。由于处在特殊的地理位置,杜尔基花岗岩体受到了三大构造域的叠加作用,因此,对杜尔基花岗岩的深

入研究将有助于解决叠复区域构造转换这一问题。在之前的研究成果中,前人报道的该岩体的年龄变化范围从 $100\sim 150 Ma$ 不等^[12–14],对于其成岩年龄还存在着较大争议。这些不一致的年龄一方面是由于测试方法的局限性所致,另一方面,可能也表明杜尔基地区花岗岩岩体演化的复杂性,指示其可能存在着多期次的岩浆活动。众所周知,年代学格架的确定对讨论岩体成因、构造背景及构造–岩浆演化具有极其重要的意义^[9]。此外,杜尔基岩体还处在中国一个大型多金属矿集区(Au–Ag–Cu–Pb–Zn–Sn–Fe),基于此,本文试图通过 LA–ICP–MS 锆石测年对杜尔基花岗岩基中的不同岩性单元进行较精确的年龄测定,查明杜尔基花岗岩岩体的成岩年龄,理清本地区花岗岩的时空展布特征,从而为本区域构造演化和找矿方向提供约束。

1 地质背景

大兴安岭地区夹于西伯利亚板块与华北板块之间,从南至北,该区可进一步被划分为松嫩地块、兴安地块和额尔古纳地块,分布在这些板块之间的主要断裂有德尔布干断裂、二连–贺根山断裂、西

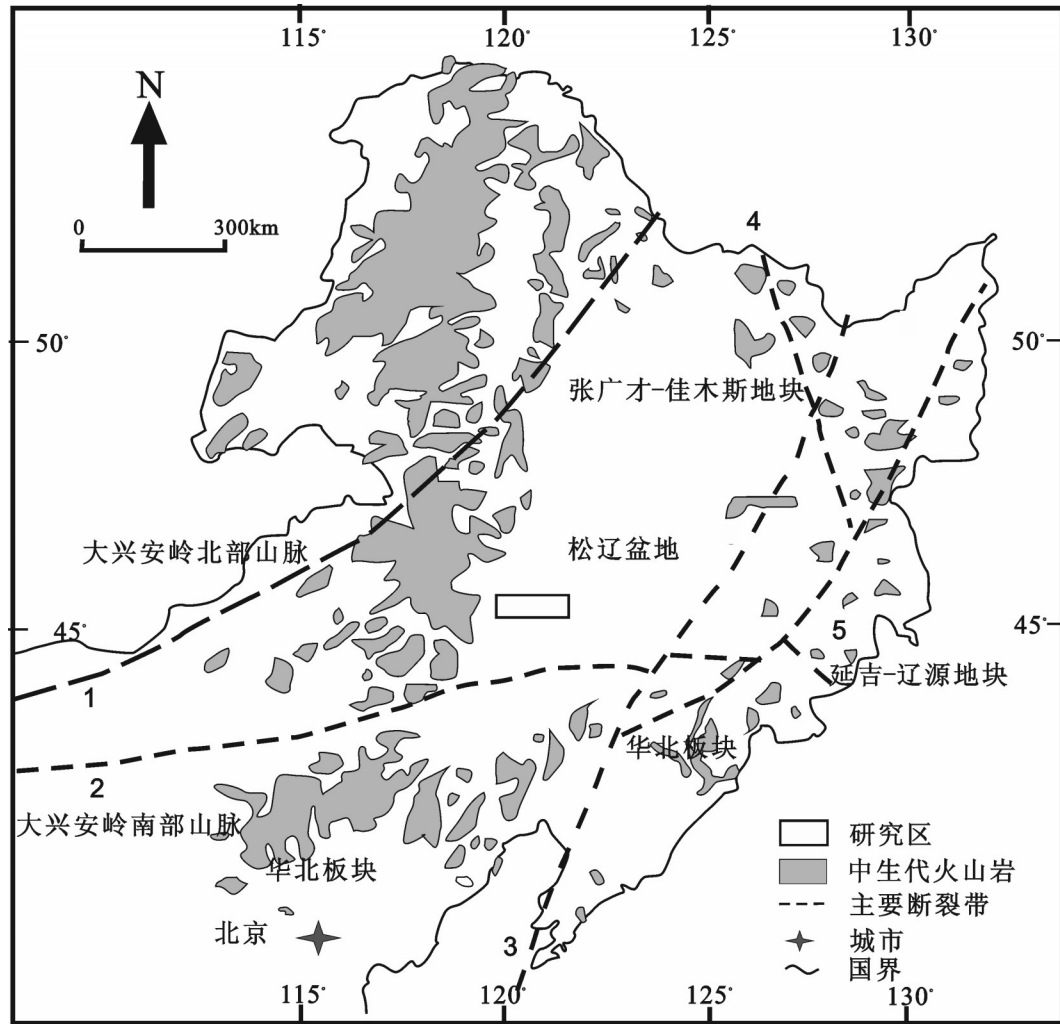


图1 中国东北部大地构造图(据文献[15]修改)

1—索伦—贺根山缝合带;2—西拉木伦河断裂带;3—郯—庐断裂带;4—牡丹江断裂;5—敦—密断裂带

Fig.1 Tectonic map of Northeast China (modified after reference [15])

1—Hegenshan—Solon suture; 2—Xar Moron River fault; 3—Tan—Lu fault; 4—Mudangjiang fault; 5—Dun—Mi fault

拉沐沦断裂、华北地台北缘断裂等。从构造单元上来看,大兴安岭地区是古生代古亚洲洋构造域、中生代蒙古—鄂霍茨克洋构造域和滨西太平洋构造域强烈叠加的一部分。古亚洲洋在晚古生代沿西拉木伦河—长春—延吉一线最终闭合,额尔古纳板块北边的蒙古—鄂霍茨克洋在三叠纪开始发育并于侏罗纪最终闭合,从侏罗纪至今大兴安岭地区一直受到滨西太平洋构造域的影响^[16-17]。关于蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲极性还存在着争议,但是随着研究的深入,越来越多的证据表明蒙古—鄂霍茨克洋存在着南向俯冲^[18-19],这对于大兴安岭地区北部的构造演化及找矿方向具有重要意义。

该区地层从元古宇到新生界均有分布,其中,元古宇主要是一套变质岩,分布在各大陆亲缘性块体中的前寒武纪变质岩基底中,古生界为一套海相碎屑岩—碳酸盐岩和中基性—中酸性火山岩建造,主要分布在中部地区,中生界以陆相沉积地层和火山地层为主,广泛分布于全区,新生界发育大规模的玄武岩,在中西部地区沿沟谷分布。另外,区内还分布着大量的华力西期和燕山期侵入体,面积可达200000 km²,素有“花岗岩海”之称^[20]。

内蒙古兴安盟杜尔基花岗岩位于大兴安岭中南段,是东北地区银、铅、锌矿重要产地之一,距乌兰浩特市西南约300 km。区内出露的地层主要有

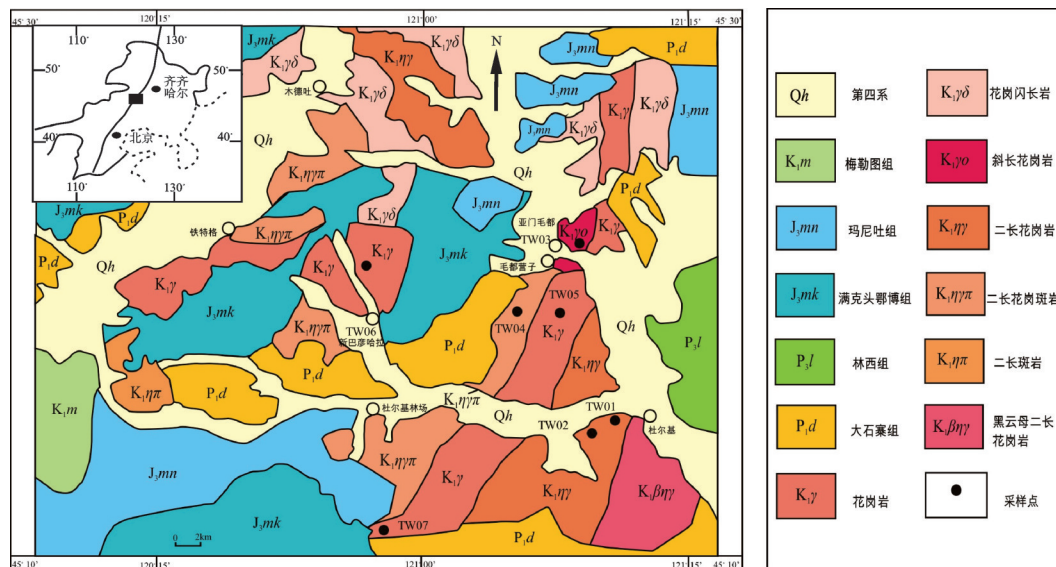


图2 杜尔基地区花岗岩地质简图(据文献[21]修改)

Fig.2 Geological sketch map of Dorolj area (modified after reference [21])

二叠纪片理化凝灰质砂岩,侏罗纪酸性岩及其凝灰岩,第四纪砂砾岩及粘土。杜尔基花岗岩体东南侧被敖兰敖日格岩体侵入,东侧被孟恩陶勒盖岩体侵入,东南侧和西侧分布着中侏罗世火山岩和古生界大石寨组(图2)。杜尔基花岗岩南侧与中侏罗统中性火山岩呈较清楚的侵入接触,火山岩为粗面安山岩,发生一定程度的蚀变,靠近岩体的安山岩中的斜长石斑晶均发生绿帘石、绿泥石化。

本次研究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。杜尔基地区花岗岩整体发生不同程度的蚀变,呈粘土化、绿泥石化。在地貌上,杜尔基花岗岩地势西高东低,岩体呈北窄南宽,面积约190 km²,主要岩性单元为黑云母正长花岗岩、中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、正长花岗岩及二长花岗斑岩(图2)。花岗岩岩体有的部分呈高大山体,有的被第四纪沉积物完全覆盖,露头断续出露,以至于野外接触关系不易查明。杜尔基地区花岗岩明显受北东向断裂构造的控制,有些岩性单元呈断层接触。而且,岩体受后期构造改造明显,发育大量劈理。杜尔基地区花岗岩被后期多种岩脉穿插,如辉绿岩岩脉、花岗斑岩岩脉,岩脉走向为北东向(图3)。

2 岩相学

杜尔基花岗岩主要由中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗斑岩组成。其中,中粗粒二长花岗岩手标本呈肉红色,中粗粒结构,主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英,次要矿物为黑云母,副矿物为磁铁矿(图4-a、b)。钾长石含量为35%~45%,粒度0.15 mm×0.08 mm~5 mm×3.5 mm,自形-半自形板状,黏土化,弱蚀变,可见卡式双晶。斜长石含量约为30%~35%,粒度0.1 mm×0.08 mm~5.2 mm×4 mm,自形-半自形板状、长条状,蚀变较严重,云母化、黏土化。石英含量约为20%~25%,粒度0.08 mm~3.8 mm×2.5 mm,半自形-他形。黑云母含量约为1%,粒度为0.25 mm×0.35 mm~0.1 mm×0.1 mm,片状,强多色性,颜色为浅黄色至深棕色,平行消光。磁铁矿含量约为1%,粒状,不透明,粒径为0.07 mm。

中细粒二长花岗岩手标本呈肉红色,中细粒似斑状,块状构造,主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英,次要矿物为黑云母,副矿物为磁铁矿(图4-c)。钾长石含量30%~40%,粒度0.2 mm×0.2 mm~0.5 mm×0.6 mm,自形、半自形,板状,可见格子双晶,弱蚀变,发生粘土化。斜长石含量为30%~40%,



图3 杜尔基地区花岗岩野外照片

a—斑状花岗岩;b—斑状花岗岩;c—石英斑晶;d—石英二长岩;e—二长花岗岩;f—花岗岩

Fig.3 Field photograph showing Dorolj granite

a—Porphyritic granite;b—Porphyritic granite;c—Quartz phenocryst;d—Quartz monzonite;e—Monzonitic granite;f—Granite

粒度 $0.2\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}\sim 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, 可见聚片双晶, 自形-半自形板状、长条状, 弱蚀变, 黏土化。石英含量约为 30%, 粒度 $0.07\text{ mm}\sim 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$, 他形、半自形。黑云母含量约为 2%, 粒度 $0.13\text{ mm}\times 0.15\text{ mm}\sim 0.27\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$, 片状, 可见一组解理, 弱蚀变, 呈深褐色异常干涉色。磁铁矿呈粒状, 分布于主要矿物之间, 粒度大小为 0.07 mm 。

正长花岗岩呈中粗粒结构, 主要矿物为钾长石、斜长石、石英(图 4-d, e)。钾长石含量为 60%~70%, 粒度 $0.24\text{ mm}\sim 5.2\text{ mm}\times 7\text{ mm}$, 可见卡式双晶, 粒度较大的颗粒包裹石英和斜长石, 板状。石英含量为 10%~15%, 粒度 $0.08\sim 0.8\text{ mm}$, 粒状。斜长石约含 30%, 广泛发育聚片双晶, 粒度 $0.1\text{ mm}\times 0.12\text{ mm}\sim 3.2\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。长石发生弱的黏土化。有些正长花岗岩中含有一定量的黑云母(>5%), 为黑云母正长花岗岩(图 4-f)。

3 样品及测试方法

本次研究采集了中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、正长花岗岩样品用于岩石地球化学分析和锆石 U-Pb 同位素研究。

主量元素分析在中国地质大学(北京)光谱实验室完成。主量元素测试采用 Prodigy 仪器, 功率 1.1 kW, 冷却气 19 L/min, 辅助气 0.3 L/min, 载气 34PSI, 试液提升量 1.2 mL/min, 温度为 22℃, 湿度为 25%。微量和稀土元素分析在湖北省测试中心实验室完成。使用仪器为等离子直读光谱仪(ICAP6300)、电感耦合等离子体质谱仪(X7), 检测温度 25℃, 检测湿度 55%RH。

锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成, 使用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。激光剥蚀的斑束为 $35\text{ }\mu\text{m}$, 能量密度为 $13\sim 14\text{ J/cm}^2$, 频率为 $8\sim 10\text{ Hz}$, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune(LA-MC-ICP-MS)。

4 测试结果

4.1 主量元素

杜尔基花岗岩主量元素分析结果(表 1)显示, 样品中氧化物含量为: SiO_2 73.09%~77.26%, Al_2O_3 12.13%~14.24%, CaO 0.37%~0.89%, TFe_2O_3 0.46%~

2.21%, P_2O_5 0.04%~0.21%, MnO 0.01%~0.04%, TiO_2 0.04%~0.24%, MgO 0.07%~0.33%, Na_2O 3.01%~4.19%, K_2O 4.34%~5.05%。 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 7.78%~8.74%, 里特曼指数 $(\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43))$ 变化范围为 1.77~2.54, 属于钙碱性系列。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.60~0.92, 属高钾钙碱性系列。 $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) > 1$, 为过铝质岩石。总体来看, 岩石整体呈高硅、高钾、富钠、过铝等特征。在 SiO_2 - P_2O_5 图解上(图 5), 大部分样品随着 SiO_2 的增多, P_2O_5 呈现降低的趋势。

将样品数据和前人数据^[12-14] 投图在 SiO_2 - K_2O 图解上, 大部分点落在高钾钙碱性区域, 只有少部分样品落在钾玄岩系列; 在 A/NK - A/CNK 图解上, 所有样品点落在了过铝质区域(图 6)。

4.2 微量元素

样品稀土元素总量($\Sigma\text{REE} = 31.26 \times 10^{-6} \sim 95.17 \times 10^{-6}$), 轻稀土元素含量($\text{LREE} = 28.24 \times 10^{-6} \sim 76.74 \times 10^{-6}$)、重稀土含量($\text{HREE} = 3.02 \times 10^{-6} \sim 18.43 \times 10^{-6}$), 轻稀土元素相对富集($\text{LREE}/\text{HREE} = 4.16 \sim 9.36$)(表 1)。球粒陨石 REE 标准化图解呈右倾型, 具明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.02 \sim 0.20$)、轻重稀土元素分馏较明显($(\text{La}/\text{Yb})_n = 2.32 \sim 9.87$), 重稀土元素分馏较差($(\text{Gd}/\text{Yb})_n = 0.73 \sim 2.48$)。

微量元素具高 Sr($14.97 \times 10^{-6} \sim 683.8 \times 10^{-6}$)、Rb($46.74 \times 10^{-6} \sim 494.2 \times 10^{-6}$) 和低 Yb($0.34 \times 10^{-6} \sim 3.71 \times 10^{-6}$)、Y($2.73 \times 10^{-6} \sim 24.74 \times 10^{-6}$)(表 1), 高 Sr/Y=1.07~23.01 和低 Rb/Sr=0.72~3.12 比值。原始地幔标准化蛛网图显示, 所研究样品富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Cs 和 Sr(图 7)。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

中细粒二长花岗岩样品(TW03-1)中 33 颗锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果见表 3。样品中的锆石多呈长柱状, 部分短柱状, CL 阴极发光图像中有的颗粒发育韵律环带, 有的不发育, 有的还有核。长柱状锆石长 $120\sim 150\text{ }\mu\text{m}$, 宽 $50\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。椭圆状锆石最大可达 $230\text{ }\mu\text{m}$, 最小亦有 $90\text{ }\mu\text{m}$ 。锆石 U 含量为 $120 \times 10^{-6} \sim 3279 \times 10^{-6}$, Pb 含量变化为 $2 \times 10^{-6} \sim 94 \times 10^{-6}$ 。这些锆石的谐和度较好(图 8), 其中, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄为 129~345 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 130~225 Ma, 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(131.3 \pm 0.3)\text{ Ma}$, MSWD=0.3。该加权平均年龄代表岩体的侵位时代。

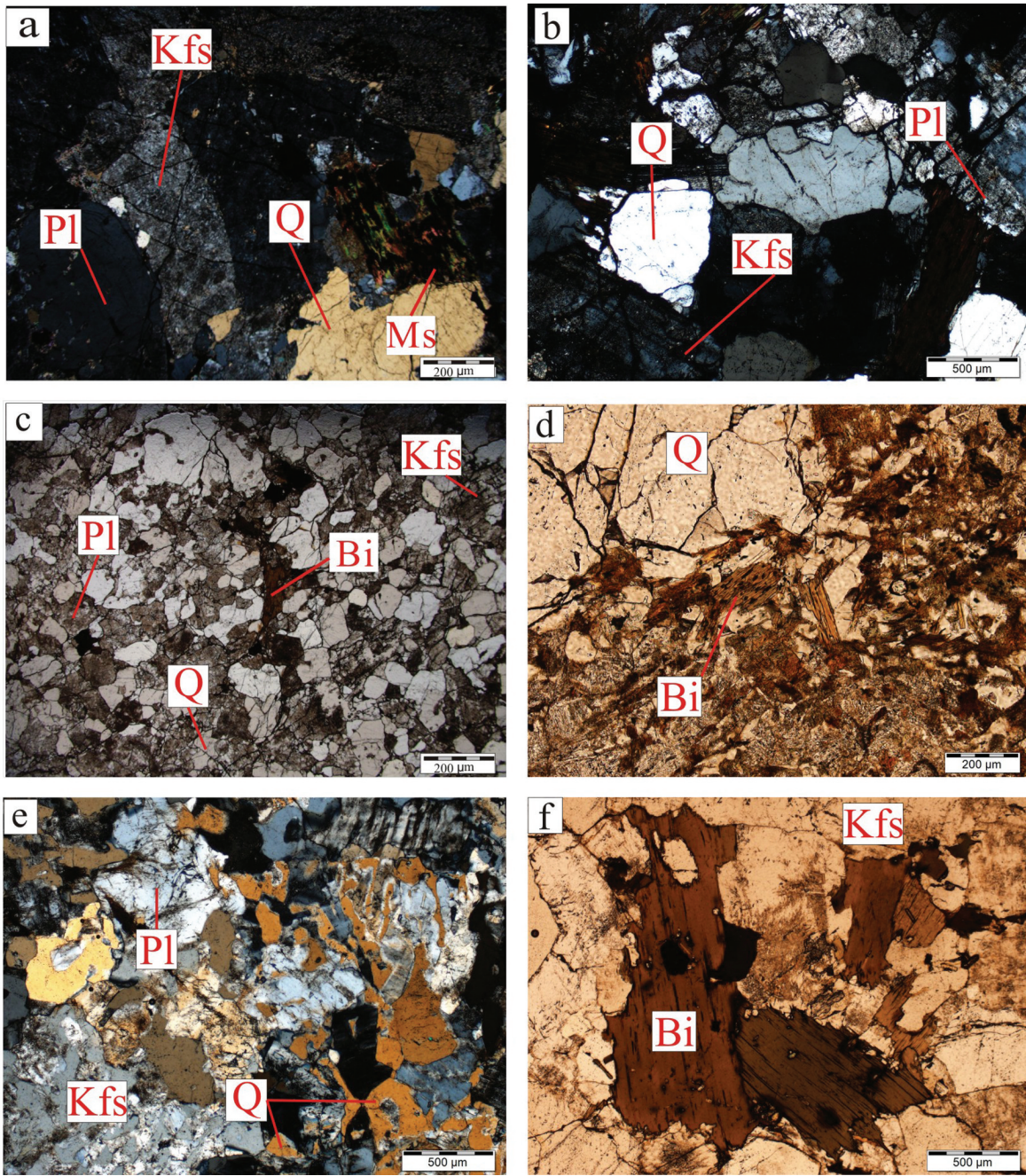


图4 杜尔基花岗岩镜下照片

a—中粗粒二长花岗岩, 正交偏光; b—二长花岗斑岩, 正交偏光; c—中细粒二长花岗岩, 单偏光; d—正长花岗岩, 单偏光; e—正长花岗岩, 正交偏光; f—黑云母正长花岗岩, 单偏光; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Q—石英; Bi—黑云母; Ms—白云母

Fig.4 Photomicrographs of Dorlj rocks

a—Coarse-medium grained monzonitic granite, crossed nicols; b—Porphyritic granite, crossed nicols; c—Medium-fine grained monzonitic granite, plainlight; d—syenogranite, plainlight; e—Syenogranite, crossed nicols; f—Biotite-bearing monzonitic granite, plainlight; Kfs—k-kfeldspar; Pl—Plagioclase; Q—Quartz; Bi—Biotite; Ms—Muscovite

表1 杜尔基地区花岗岩主量元素分析结果(%)、微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Analyses of major elements (%) and trace elements of Dorolj granite(10^{-6})

样品号	TW03-1	TW04-1	TW05-4	TW06-2	TW07-1
	中细粒 二长花岗岩	中细粒 二长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	二长花岗岩
SiO ₂	77.26	76.85	73.92	73.09	73.28
TiO ₂	0.08	0.04	0.24	0.23	0.17
Al ₂ O ₃	12.13	12.51	12.71	14.24	13.56
TF ₂ O ₃	0.81	0.46	2.21	1.84	1.93
MnO	0.02	0.01	0.03	0.03	0.04
MgO	0.08	0.07	0.15	0.33	0.21
CaO	0.37	0.61	0.59	0.4	0.89
Na ₂ O	3.44	3.59	3.01	4.19	3.65
K ₂ O	4.34	4.59	5.05	4.55	4.95
P ₂ O ₅	0.11	0.09	0.21	0.11	0.04
TOTAL	98.64	98.82	98.12	99.01	98.72
Li	3.18	26.2	0.07	5.15	6.1
Sc	2.41	2.75	1.28	2.87	1.92
Ga	19.37	16.55	12.83	18.81	13.65
Rb	494.2	251.8	160.66	238.4	114.98
Zr	83.5	159.4	73.3	219.7	174.8
Nb	8.9	6.25	4.77	7.6	4.57
Cd	0.114	0.042	0.114	0.032	0.044
Cs	9.52	16.42	1.76	4.07	3.43
Hf	5.26	6.16	4.19	7.46	6.48
Ta	6.03	2.43	1.32	2.73	2.26
Pb	27.2	19.35	19.84	29.94	16.49
Th	7.03	13.05	5.33	15.3	14.98
U	5.4	5.18	3.29	3.34	2.48
Ba	30.3	259.3	115.7	248.6	481
Sr	14.97	62.82	59.52	51.27	182.9
La	6.83	4.62	14.25	13.76	11.8
Ce	23.2	15.53	36.68	30.98	27.96
Pr	2.18	1.39	4.4	3.5	3.11
Nd	8.13	5.35	16.9	12.66	11.4
Sm	2.36	1.25	4.15	2.73	2.46
Eu	0.04	0.1	0.35	0.47	0.29
Gd	1.87	1.01	3.58	2	2.13
Tb	0.39	0.17	0.75	0.37	0.4
Dy	2.64	0.85	5.05	2.2	2.68
Ho	0.55	0.16	1.09	0.44	0.55
Er	1.65	0.4	3.17	1.26	1.72
Tm	0.3	0.06	0.54	0.2	0.27
Yb	2.11	0.34	3.71	1.33	1.91
Lu	0.3	0.04	0.53	0.18	0.27
Y	13.96	2.73	24.74	10.13	13.94

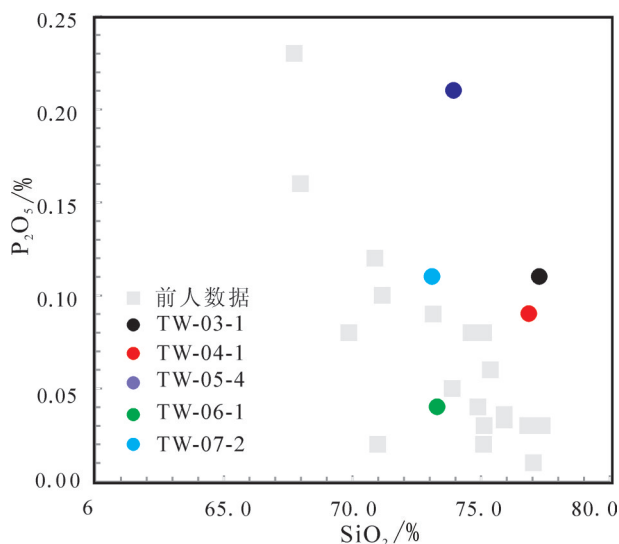


图5 杜尔基地区花岗岩SiO₂-P₂O₅投图
Fig.5 SiO₂-P₂O₅ diagram of Dorolj granite

正长花岗岩(TW05-4)中锆石17颗个锆石U-Th-Pb分析数据见表4,共有两组同位素年龄,分别为(213.0±0.7) Ma和(238.1±1.8) Ma(图9)。一组锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均为(213.0±0.7) Ma(MSWD=0.42, n=11), 11颗锆石多呈柱状,长40~140 μm,长宽比为1.1~2.5。阴极发光图像中韵律环带明显;Pb含量为 1×10^{-6} ~ 110×10^{-6} , U含量为 29×10^{-6} ~ 2969×10^{-6} ,这些锆石的²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄为183~722 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为186~222 Ma,位于谐和曲线之上且谐和度较好。另一组锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均为(238.1±1.8) Ma(MSWD=1.7, n=6), 6颗锆石呈柱状,长柱状锆石长80~150 μm,长宽比为1.2~3.5。阴极发光图像中韵律环带较为明显。锆石Pb含量为 1×10^{-6} ~ 87×10^{-6} , U含量为 19×10^{-6} ~ 2295×10^{-6} 。这些锆石的²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄为220~406 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为220~240 Ma,位于谐和曲线之上且谐和度较好(图11)。因此,正长花岗岩(TW05-4)的侵位年龄应该是(213.0±0.7) Ma,而(238.1±1.8) Ma可能是正长花岗岩侵位时捕掳的另一期岩浆活动记录。

正长花岗岩(TW06-2)中50颗锆石U-Th-Pb同位素测年结果见表4,有两组同位素年龄,分别是(130.5±0.5) Ma和(150.2±0.4) Ma(图12)。一组锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均为(130.5±0.5) Ma(MSWD=3.3, n=29), 29颗锆石呈柱状,长柱状锆石长60~100 μm,长宽比为1~2。韵律环带明显。Pb含量为 4×10^{-6} ~ 56×10^{-6} , U含量为 200×10^{-6} ~ 2718×10^{-6} 。这些锆石的²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄为129~132 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为128~133 Ma,位于谐和曲线之上(图13)。另一组锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均为(150.2±0.4) Ma, (MSWD=0.96, n=21), 21颗锆石呈柱状,长柱状锆石长60~120 μm,长宽比为1~2。韵律环带发育。锆石Pb含量为 4×10^{-6} ~ 56×10^{-6} , U含量为 168×10^{-6} ~ 2393×10^{-6} 。这些锆石的²⁰⁷Pb/²³⁵U年龄为148~151 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为148~152 Ma,位于谐和曲线之上(图14)。正长花岗岩(TW06-2)的侵位年龄为(130.5±0.5) Ma,而(150.2±0.4) Ma的锆石很可能是正长花岗岩侵位时捕掳的更早期岩浆活动的记录。

5 讨论

5.1 岩体侵位时代

前人对该区花岗岩进行过同位素测年,1:20万

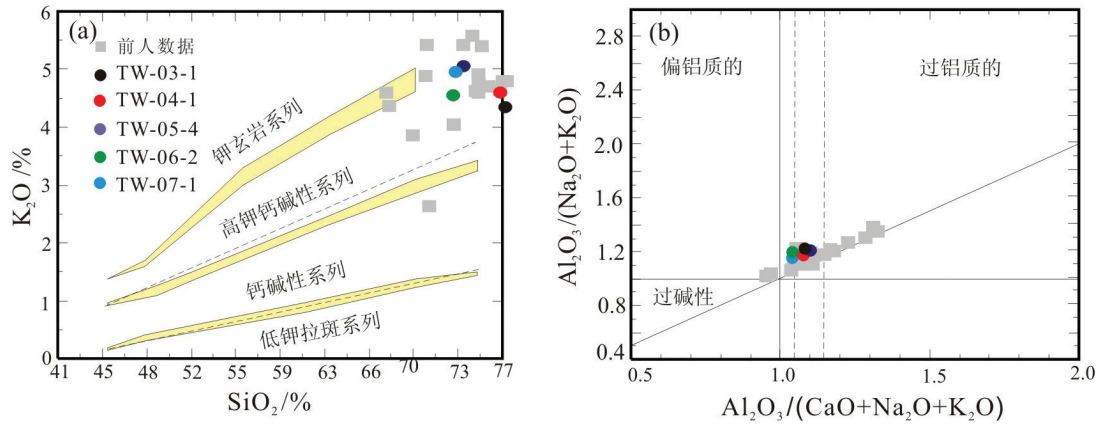


图6 主量元素投图(SiO₂-K₂O引自文献[23]; A/NK-A/CNK引自文献[24])
 Fig.6 Projection of main elements (SiO₂-K₂O after reference [23]; A/NK-A/CNK after reference [24])

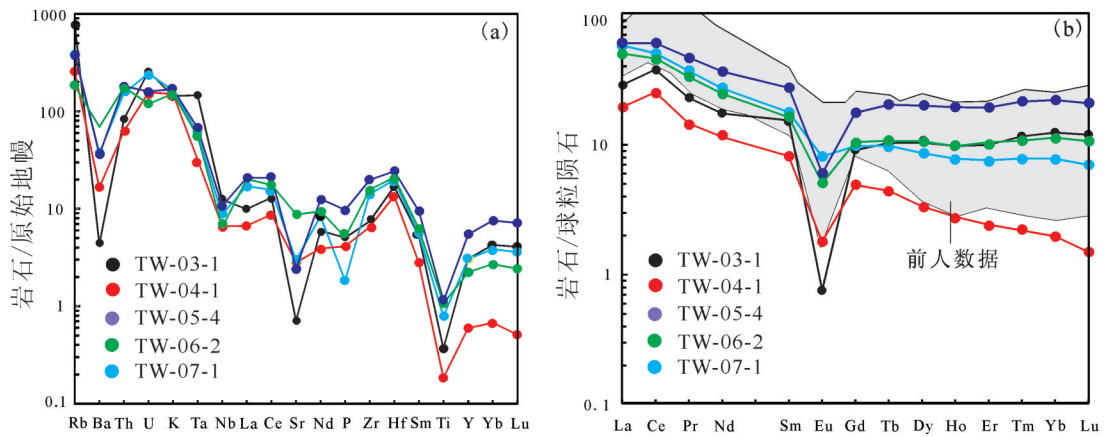


图7 杜尔基花岗岩的微量元素蛛网图(据文献[25])和稀土曲线配分图(据文献[26])
 Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a, normalization values after reference [25]) and chondrite-normalized REE patterns (b, normalization values after reference [26]) of Dorolj granite

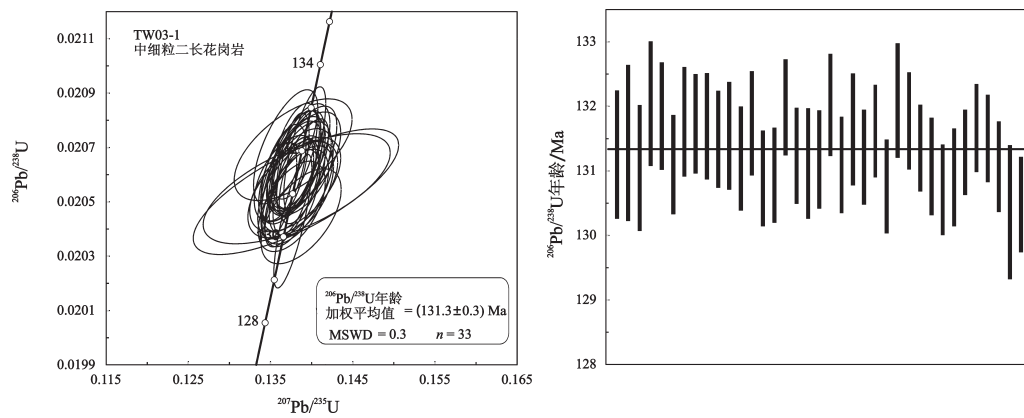


图8 杜尔基中细粒二长花岗岩锆石年龄谐和图和²⁰⁶Pb/²³⁸U平均年龄直方图
 Fig.8 U-Pb concordia diagrams and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted-age histogram of zircons of medium-fine grained monzonitic granite from Dorolj

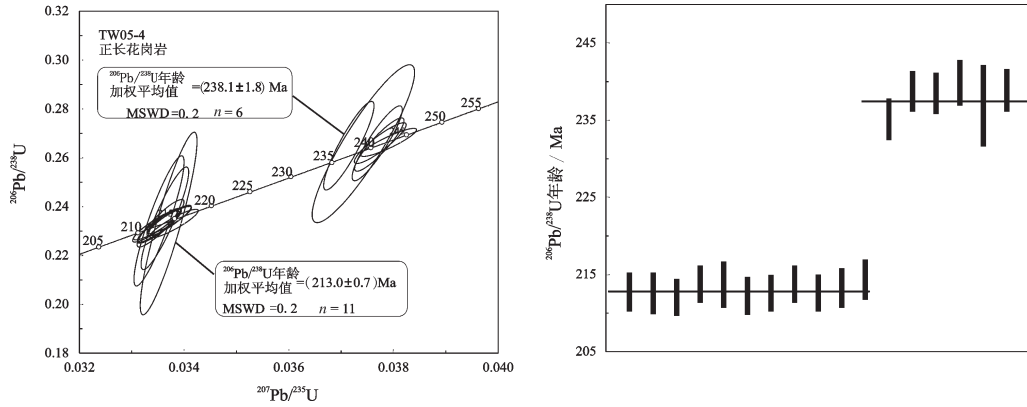


图9 杜尔基正长花岗岩锆石年龄谐和图和²⁰⁶Pb/²³⁸U平均年龄直方图

Fig.9 U–Pb concordia diagrams and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted–age histogram of zircons of the syenogranite from Dorolj granite

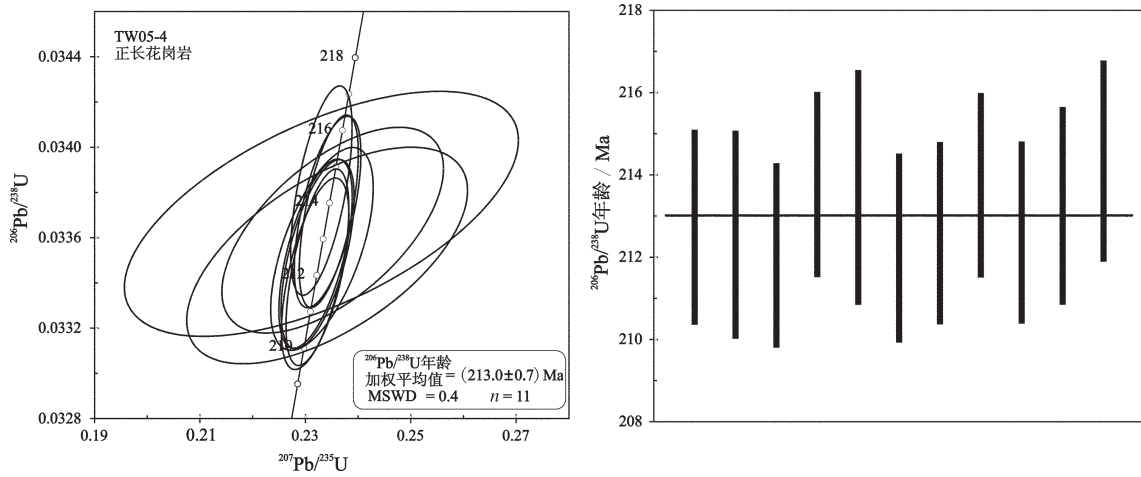


图10 杜尔基正长花岗岩锆石年龄谐和图和²⁰⁶Pb/²³⁸U平均年龄直方图

Fig.10 U–Pb concordia diagrams and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted–age histogram of zircons of the syenogranite from Dorolj granite

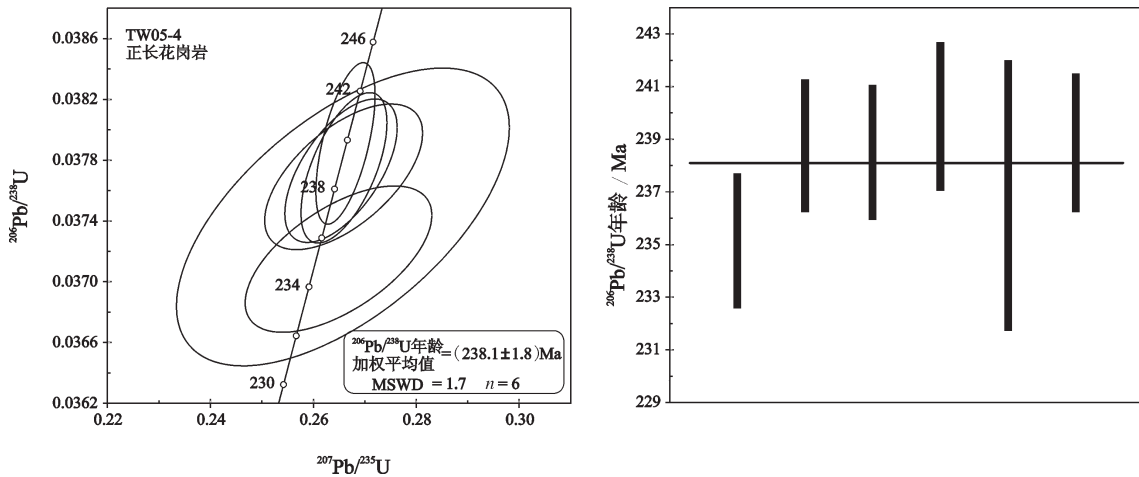


图11 杜尔基正长花岗岩锆石年龄谐和图和²⁰⁶Pb/²³⁸U平均年龄直方图

Fig. 11 U–Pb concordia diagrams and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted–age histogram of zircons of syenogranite from Dorolj granite

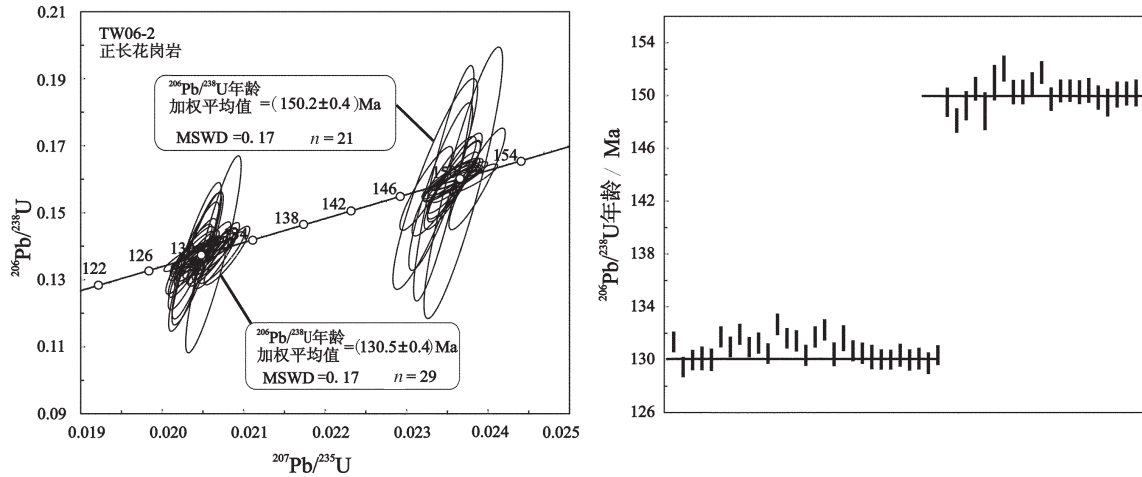


图12 杜尔基花岗岩正长花岗岩锆石年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄直方图

Fig. 12 U-Pb concordia diagrams of zircons $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted-age histogram of the syenogranite from Dorolj

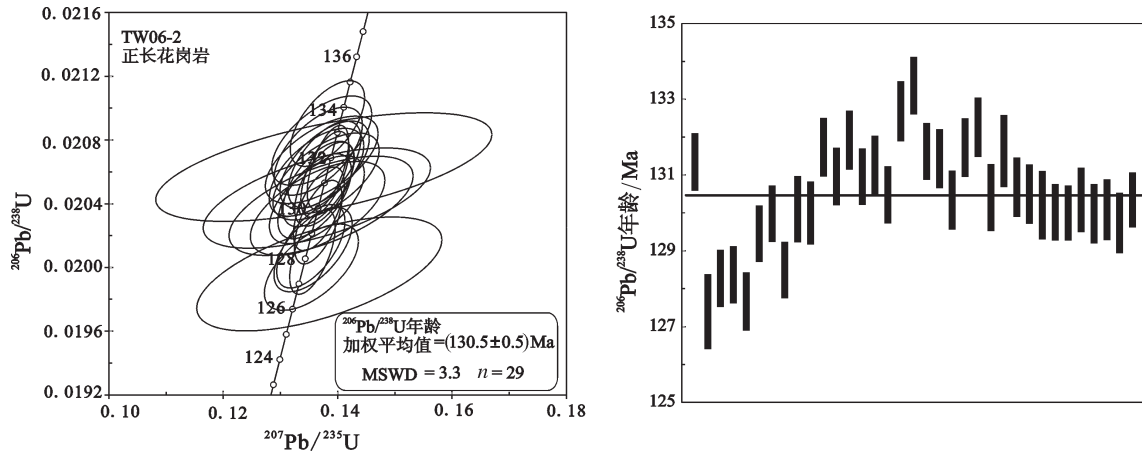


图13 杜尔基正长花岗岩锆石年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄直方图

Fig.13 U-Pb concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted-age histogram of zircons of the syenogranite from Dorolj

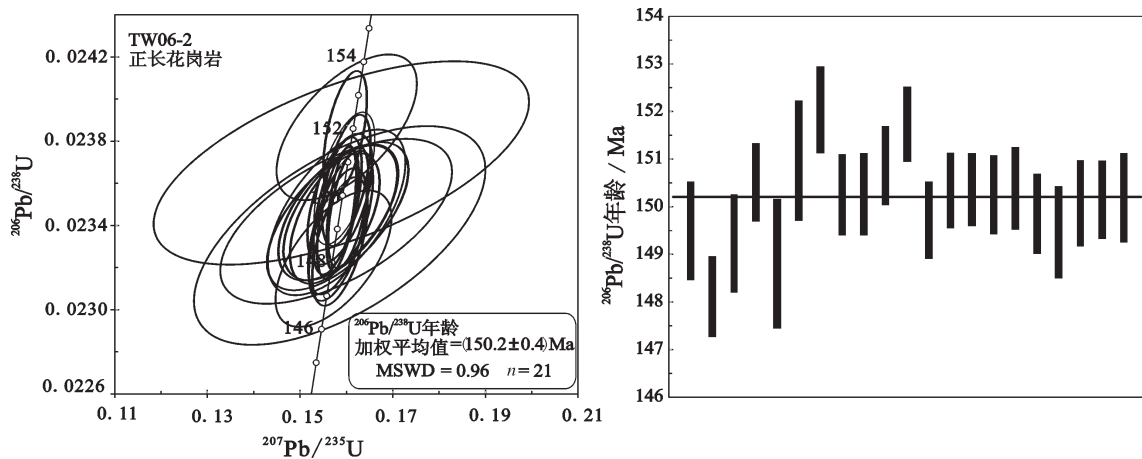


图14 杜尔基正长花岗岩锆石年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄直方图

Fig.14 U-Pb concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted-age histogram of zircons of the syenogranite from Dorolj

《科尔沁右翼中旗幅》区调报告对白岗质花岗岩中钾长石进行了K-Ar法测定,其同位素年龄为127.9 Ma。丛利民等^[12]用了K-Ar法测年技术测得杜尔基地区岩体中细粒二长花岗斑岩年龄(115.9±1.0)Ma、花岗斑岩年龄(120.3±1.1)Ma、中粗粒二长花岗岩年龄(100.2±0.8)Ma和细粒二长花岗岩年龄(105.9±0.8)Ma,年龄范围为100.2~120.3 Ma,平均值为110.6 Ma,并结合野外露头观察、推断杜尔基花岗岩形成于早白垩世。阿木古冷等^[13]、于福生等^[21]利用了这套测年数据并将研究扩展到杜尔基地区西面的铁特格岩体、木德吐岩体,得到年龄变化范围为100.2~120.3 Ma,平均值为111 Ma。江思宏等^[14]采用LA-MC-ICP-MS锆石测年方法对杜尔基地区花岗岩中黑云母正长花岗岩进行了研究(图1),其锆石年龄为(154.5±0.5)Ma,认为该岩体属于侏罗纪。

锆石U-Pb体系是目前已知矿物同位素体系中封闭温度最高的,锆石中Pb的扩散封闭温度可以达到900℃,是确定岩浆岩结晶年龄的理想对象^[27-28]。锆石在花岗岩中作为副矿物广泛存在,极易容易被挑选出来,因此成为了用于花岗岩测年的首选矿物。而K-Ar同位素体系封闭温度较低,可能受到后期地质运动的干扰。由于天山—兴安造山系的北山—内蒙古—吉林造山带多期次的构造活动和岩浆活动在本区表现强烈,故除位于岩体内部相的一个数据外,前人在本区获得的其他K-Ar同位素年龄结果都较锆石U-Pb年龄年轻,可能没有代表真实的岩体形成时代。本次测试结果显示,位于杜尔基地区花岗岩北侧的中细粒二长花岗岩的侵位年龄为(131.5±0.3)Ma;位于中部的正长花岗岩的侵位年龄为(213±1)Ma,并含有一定量的(238±2)Ma的年龄信息,为捕掳锆石;位于西侧的正长花岗岩的侵位年龄为(131±1)Ma,其中含有一定量的(50±1)Ma的年龄信息。结合江思宏等(2011)^[14]对位于杜尔基地区东南侧的黑云母正长花岗岩的锆石U-Pb年龄(150 Ma),得出杜尔基地区岩体主要存在三期岩浆活动:中晚三叠世(213 Ma),岩性以中细粒二长花岗岩为主,分布在杜尔基地区花岗岩的中部;晚侏罗世(150 Ma),岩性以正长花岗岩为主,分布在东南部;早白垩世(130 Ma),岩性以正长花岗岩为主,分布在岩体内部及西部。这与大兴安岭南段火山活动主要集中在晚三叠世—中侏罗世和晚

侏罗世—早白垩世中期两个主要阶段符合^[29]。

5.2 对中国东部中生代构造事件的反映

岩浆活动的分布具有时空上的不均一性,然而,这些岩浆活动的形成和构造环境密切相关^[30-33]。不同的岩石组合在时空上的分布特征可以为构造背景的重建提供重要的信息^[34-36]。前人的研究表明,大兴安岭地区的中生代岩浆活动在构造上同时受古亚洲洋的闭合、蒙古—鄂霍茨克洋的南向俯冲和太平洋板块向北西向俯冲控制^[37-38]。因此,在如此复杂的构造背景下,对不同时期的岩浆活动的构造背景的探讨变得非常困难。一些学者通过统计前人的年代学数据,提出大兴安岭地区的岩浆活动期次,如王召林等^[39]认为大兴安岭地区的花岗岩可分为4个阶段:130~132 Ma、171~190 Ma、229~236 Ma、460~500 Ma,王忠和朱红森^[40]提出大兴安岭中南段的中生代火山岩可划分为晚三叠世、早—中侏罗世、晚侏罗世和早白垩世4个喷发旋回,而Ouyang et al^[41]通过详细地研究该地区的成矿作用的时空分布,认为大兴安岭地区的岩浆活动应该划分为5期,分别为240~205 Ma、190~165 Ma、155~145 Ma、140~120 Ma和115~100 Ma。

前人的研究表明,大兴安岭区域内发育的A型花岗岩的侵位年龄变化范围为241~201 Ma^[42-45]。鉴于A型花岗岩可以指示一个拉张的构造环境,Wu et al^[46]认为东西走向的古亚洲洋在约250 Ma的时候发生最终闭合。因此,中晚三叠世(240~205 Ma)的花岗岩和中亚造山带的后造山的构造环境有关^[42,46]。分布在兴安造山带、辽东半岛、松辽盆地的中早侏罗世(190~165 Ma)花岗岩属于高K钙碱性,并具有弧的特征,因此被认为和太平洋板块的俯冲有关^[47-49]。在晚侏罗世(155~145 Ma),区域内发育拉伸盆地(如海拉尔盆地和松辽盆地等),兴安造山带还出现了花岗岩与双峰式火山岩伴生的岩石组合,表明在晚侏罗世该地区处于一个拉伸的构造环境下^[42,50]。一些学者将其归因于蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲板块断离造成的板内拉张环境^[45]。在早白垩世(140~120 Ma),该区再次发育A型花岗岩,表明再次处于一个拉张环境。而且,早白垩世也是整个中国东部地区岩浆活动的峰值,伴随着大规模的岩石圈减薄^[51-52]。因此,此时的岩浆活动应该处于岩石圈因受太平洋俯冲而大规模减薄、软流圈物质不断上涌的构造背景

表2 杜尔基花岗岩锆石U-Pb年龄数据
Table 2 Zircon U-Pb data of Dorolj granite

样品号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
TW03-1 中细粒二长花岗岩														
1	28	1402	0.0206	0.0002	0.1382	0.0026	0.0487	0.0008	131	1	131	2	135	41
3	9	429	0.0205	0.0002	0.1381	0.0083	0.0488	0.0029	131	1	131	8	137	138
4	43	2073	0.0207	0.0002	0.1392	0.0017	0.0488	0.0005	132	1	132	2	137	25
5	38	1661	0.0207	0.0001	0.1384	0.0025	0.0486	0.0009	132	1	132	2	128	42
6	29	1258	0.0205	0.0001	0.138	0.003	0.0487	0.001	131	1	131	3	134	50
7	31	1375	0.0207	0.0001	0.1389	0.0027	0.0488	0.0009	132	1	132	3	138	43
8	55	2264	0.0206	0.0001	0.1377	0.0013	0.0484	0.0005	132	1	131	1	118	23
9	35	1627	0.0206	0.0001	0.1383	0.0017	0.0486	0.0006	132	1	132	2	129	29
10	16	578	0.0256	0.0002	0.2613	0.0068	0.0741	0.0019	163	1	236	6	1045	52
11	36	1615	0.0206	0.0001	0.1366	0.0018	0.0481	0.0006	131	1	130	2	102	31
12	17	790	0.0206	0.0001	0.1378	0.0026	0.0485	0.0009	132	1	131	2	122	43
14	24	1059	0.0206	0.0001	0.1381	0.002	0.0485	0.0007	132	1	131	2	124	32
16	94	3279	0.0205	0.0001	0.4042	0.0065	0.1429	0.0021	131	1	345	6	2263	25
17	23	1078	0.0205	0.0001	0.138	0.0027	0.0488	0.0009	131	1	131	3	138	46
18	52	2252	0.0207	0.0001	0.138	0.0018	0.0484	0.0006	132	1	131	2	117	29
19	23	1101	0.0206	0.0001	0.1378	0.0026	0.0486	0.0009	131	1	131	2	128	44
20	8	366	0.0205	0.0001	0.1382	0.0075	0.0488	0.0027	131	1	131	7	137	128
21	13	564	0.0232	0.0001	0.1716	0.0044	0.0536	0.0014	148	1	161	4	356	57
22	51	2197	0.0206	0.0001	0.1378	0.0016	0.0486	0.0005	131	1	131	2	129	26
23	48	2279	0.0208	0.0001	0.1381	0.0015	0.0482	0.0005	133	1	131	1	111	24
24	36	1001	0.0355	0.0002	0.3623	0.0035	0.074	0.0007	225	1	314	3	1042	20
25	9	455	0.0207	0.0001	0.1378	0.0047	0.0483	0.0016	132	1	131	5	113	80
26	16	756	0.0205	0.0001	0.1377	0.0036	0.0486	0.0012	131	1	131	3	129	60
27	39	1617	0.0206	0.0001	0.1376	0.0026	0.0484	0.0008	132	1	131	3	117	40
28	18	875	0.0206	0.0001	0.138	0.0037	0.0487	0.0013	131	1	131	3	132	62
29	27	1264	0.0206	0.0001	0.1382	0.002	0.0486	0.0007	132	1	131	2	128	34
31	11	463	0.0207	0.0001	0.1369	0.0026	0.0479	0.0008	132	1	130	2	97	42
32	4	206	0.0207	0.0001	0.1391	0.0029	0.0488	0.0009	132	1	132	3	140	44
33	7	315	0.0206	0.0001	0.1368	0.0025	0.0482	0.0009	131	1	130	2	109	42
34	3	149	0.0205	0.0001	0.136	0.0014	0.048	0.0006	131	1	129	1	101	27
35	8	376	0.0205	0.0001	0.1376	0.0027	0.0487	0.0008	131	1	131	3	134	41
36	5	234	0.0205	0.0001	0.1376	0.0022	0.0487	0.0007	131	1	131	2	131	34
37	6	284	0.0206	0.0001	0.1385	0.0016	0.0488	0.0006	131	1	132	2	139	27
38	6	305	0.0206	0.0001	0.1389	0.0023	0.0488	0.0008	132	1	132	2	138	39
39	5	229	0.0206	0.0001	0.1386	0.0027	0.0488	0.0009	132	1	132	3	137	44
40	4	200	0.0205	0.0001	0.1388	0.0026	0.049	0.0009	131	1	132	2	148	43
41	3	165	0.0204	0.0002	0.1377	0.0015	0.0489	0.0003	130	1	131	1	143	16
43	2	120	0.0204	0.0001	0.1387	0.0032	0.0492	0.001	130	1	132	3	158	49
46	4	181	0.0213	0.0001	0.1458	0.0017	0.0495	0.0006	136	1	138	2	173	27

续表2

样品号	含量/ 10^{-6}		同位素比值				表面年龄/Ma							
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
TW05-4 正长花岗岩														
2	51	1521	0.0336	0.0002	0.2332	0.004	0.0504	0.0008	213	1	213	4	214	36
3	16	410	0.0335	0.0002	0.2341	0.0109	0.0507	0.0024	213	1	214	10	225	108
5	1	29	0.0343	0.0009	0.425	0.0859	0.0898	0.0197	218	6	360	73	1421	420
7	43	1250	0.0334	0.0002	0.2319	0.0026	0.0503	0.0006	212	1	212	2	208	25
10	58	1631	0.0337	0.0002	0.2345	0.0023	0.0504	0.0005	214	1	214	2	215	22
17	8	221	0.0337	0.0002	0.233	0.0153	0.0501	0.0033	214	1	213	14	202	151
19	36	1108	0.0335	0.0002	0.2323	0.0028	0.0503	0.0006	213	1	212	3	207	29
21	69	2044	0.0337	0.0002	0.2342	0.0026	0.0504	0.0006	214	1	214	2	213	26
22	37	1129	0.0335	0.0002	0.232	0.0028	0.0502	0.0006	213	1	212	3	203	29
25	21	614	0.0336	0.0002	0.2352	0.0086	0.0507	0.0018	213	1	214	8	228	82
29	43	1307	0.0309	0.0003	0.2771	0.0036	0.0651	0.0008	196	2	248	3	778	25
33	32	915	0.0334	0.0002	0.2352	0.0028	0.0511	0.0006	212	1	214	3	246	27
36	35	993	0.035	0.0002	0.2438	0.0045	0.0505	0.0009	222	1	222	4	218	42
40	1	31	0.03	0.0002	1.0369	0.0152	0.2503	0.0037	191	1	722	11	3187	23
44	65	2278	0.0292	0.0002	0.1976	0.0053	0.049	0.0013	186	1	183	5	149	61
46	31	908	0.0334	0.0002	0.2293	0.0025	0.0497	0.0005	212	1	210	2	183	25
8	26	758	0.0371	0.0002	0.2649	0.0074	0.0517	0.0014	235	1	239	7	273	61
11	28	719	0.0377	0.0002	0.2654	0.0045	0.051	0.0008	239	1	239	4	241	38
15	52	1476	0.0351	0.0002	0.3078	0.0038	0.0637	0.0008	222	1	273	3	731	26
20	73	1963	0.0379	0.0002	0.2663	0.0023	0.0509	0.0005	240	1	240	2	238	22
23	18	500	0.0374	0.0004	0.2658	0.0132	0.0515	0.0023	237	3	239	12	263	104
TW06-2 正长花岗岩														
1	29	1419	0.0206	0.0001	0.1378	0.0017	0.0485	0.0006	131	1	131	2	126	29
4	32	1500	0.0201	0.0001	0.1356	0.0016	0.0489	0.0006	128	1	129	2	145	28
5	14	705	0.0201	0.0001	0.1357	0.0028	0.0489	0.001	128	1	129	3	145	48
7	12	605	0.02	0.0001	0.1354	0.0034	0.0491	0.0012	128	1	129	3	152	58
10	27	1312	0.0203	0.0001	0.1366	0.0017	0.0488	0.0006	129	1	130	2	140	29
11	25	1211	0.0204	0.0001	0.1367	0.0018	0.0487	0.0006	130	1	130	2	133	31
12	14	715	0.0201	0.0001	0.1353	0.0024	0.0487	0.0009	128	1	129	2	136	42
15	10	504	0.0204	0.0001	0.1365	0.0048	0.0486	0.0017	130	1	130	5	128	83
16	13	662	0.0206	0.0001	0.1377	0.0026	0.0484	0.0009	132	1	131	2	118	44
17	12	586	0.0205	0.0001	0.1367	0.0026	0.0483	0.0009	131	1	130	2	114	44
18	25	1185	0.0207	0.0001	0.1372	0.004	0.0481	0.0014	132	1	131	4	106	68
19	20	903	0.0205	0.0001	0.1377	0.0021	0.0486	0.0007	131	1	131	2	131	36
20	11	554	0.0206	0.0001	0.138	0.0038	0.0486	0.0013	131	1	131	4	130	64
21	16	771	0.0204	0.0001	0.136	0.0026	0.0482	0.0009	130	1	129	3	111	45
22	32	1417	0.0208	0.0001	0.1372	0.0036	0.0479	0.0013	133	1	131	3	92	62
24	30	1476	0.0206	0.0001	0.1383	0.0015	0.0486	0.0005	132	1	132	1	130	25
26	10	460	0.0206	0.0001	0.1363	0.0034	0.048	0.0012	131	1	130	3	99	58
27	18	829	0.0204	0.0001	0.1364	0.0034	0.0484	0.0012	130	1	130	3	120	58
28	25	1191	0.0206	0.0001	0.1377	0.0032	0.0484	0.0011	132	1	131	3	118	54
29	14	643	0.0207	0.0001	0.1366	0.0031	0.0478	0.0011	132	1	130	3	89	53
31	12	559	0.0204	0.0001	0.1364	0.0081	0.0484	0.0028	130	1	130	8	119	139
32	4	200	0.0206	0.0001	0.1376	0.012	0.0484	0.0042	132	1	131	11	117	204
33	56	2718	0.0205	0.0001	0.1374	0.0023	0.0487	0.0008	131	1	131	2	131	38
35	11	560	0.0204	0.0001	0.1381	0.002	0.049	0.0007	130	1	131	2	148	33
36	21	1071	0.0204	0.0001	0.1368	0.0091	0.0486	0.0032	130	1	130	9	130	154
37	6	276	0.0204	0.0001	0.1384	0.0031	0.0493	0.0011	130	1	132	3	160	52
40	28	1409	0.0204	0.0001	0.1367	0.0013	0.0487	0.0005	130	1	130	1	133	22
43	24	1176	0.0204	0.0001	0.1371	0.0077	0.0487	0.0026	130	1	130	7	132	126
44	8	367	0.0204	0.0001	0.1371	0.003	0.0488	0.001	130	1	130	3	139	50
45	17	822	0.0204	0.0001	0.1366	0.002	0.0486	0.0007	130	1	130	2	128	33
46	24	1230	0.0203	0.0001	0.1361	0.0043	0.0486	0.0015	130	1	130	4	127	75
56	6	303	0.0204	0.0001	0.137	0.0015	0.0487	0.0005	130	1	130	1	131	25

下^[53-54]。进入早白垩世晚期(115~100 Ma),由于太平洋俯冲方向的转变,该区域内的岩浆活动再次具有弧的特征,而被认为是与太平洋板块俯冲的环境相关^[53-54]。

位于大兴安岭中南部的杜尔基花岗岩,受东西

走向的古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和南北走向的古太平洋共同影响。杜尔基地区花岗岩锆石U-Pb年龄跨度较大,共发生3期岩浆活动,分别为晚三叠世(213~238 Ma)、晚侏罗世(150 Ma)和早白垩世(130 Ma),从化学成分上看,它们都属于高钾钙碱

表4 花岗岩类型与它们的来源及地球动力学环境关系
(引自文献[55])

Table 4 Granite types and their origin and geodynamic environment(after reference[55])

花岗岩类型		来源	地球动力学环境
含白云母过铝质花岗岩类	MPG	壳源	大陆碰撞
含堇青石过铝花岗岩类	CPG	过铝质花岗岩类	
富钾钙碱性花岗岩类 (高钾-低钙)	KCG	混合源 (地壳+幔壳)	构造体制转换地带
含角闪石钙碱性花岗岩类 (低钾-高钙)	ACG	偏铝质和钙碱性 花岗岩类	俯冲作用
岛弧拉斑玄武质花岗岩类	ATG	幔源	
洋中脊拉斑玄武质花岗岩类	RTG	拉斑玄武质碱性	大洋扩张或大陆
过碱性及碱性花岗岩类	PAG	和过碱性花岗岩 类	的隆起作用 and 裂 谷作用

性系列。黑云母是本地区花岗岩中主要的暗色矿物, P_2O_5 与 SiO_2 呈现负相关性,这些特征指示杜尔基地区花岗岩具有I型岩浆岩的特点。这3期岩浆活动与上述学者的研究成果相对应,表明晚三叠世(213~238 Ma)的斑状二长花岗岩和粗粒二长花岗岩对应一个后造山的环境,晚侏罗世(150 Ma)的斑状钾长花岗岩和黑云母正长花岗岩对应一个板内拉张的环境,而早白垩世(130 Ma)中细粒二长花岗岩可能和华北克拉通大减薄的构造背景下相对应。杜尔基岩体所呈现的3期岩浆活动,均指示了一个拉张的构造背景,而缺少与俯冲相关的岩浆活动,这也与杜尔基岩体的岩石地球化学特征所呈现出来的非弧特征是一致的(没有显示出高场强元素的负异常,如Nb、Ta、Zr、Hf等)。

Barbarin综合考虑了花岗岩类的矿物学、岩石学和地球化学特征^[55],以海西造山带演化为基础,将花岗岩形成的构造环境划分为大陆碰撞、构造体制转换地带、俯冲作用、大洋扩张或大陆的隆起作用 and 裂谷作用。花岗岩的类型划分为白云母过铝质花岗岩(MPG)、堇青石过铝质花岗岩类(CPG)、富钾钙碱性花岗岩(KCG)、含角闪石钙碱性花岗岩类(ACG)、岛弧拉斑玄武质花岗岩类(ATG)或大洋中

脊拉斑玄武质花岗岩类(RTG)、过碱质碱性花岗岩类(PAG)。它们的来源及地球动力学环境如表4。

从主微量元素上看,杜尔基地区花岗岩属于过铝质高钾钙碱性系列,整体呈现高硅、高碱、过铝、低钙的特征。通过镜下观察,黑云母是本地区花岗岩中主要的暗色矿物。与表4进行对比发现杜尔基地区花岗岩比较符合KCG类型,其来源为混合源,地球动力学环境为构造体制转换地带。

5.3 与孟恩陶勒盖银铅锌矿床成矿之间的关系

由于受三个构造域的叠加作用,杜尔基岩体处在一个大的多金属成矿区内,其周边地区具有良好成矿条件,如在杜尔基岩体东南侧的孟恩花岗岩中就发育着大型热液脉型铅锌银矿(孟恩陶勒盖矿床)。孟恩陶勒盖矿床呈脉状直接发育在孟恩岩体中心,被认为与花岗岩具有成因上的联系^[14]。然而,目前的研究仍然没有查清具体是哪个岩体与成矿有直接联系。张炯飞等^[56]对矿床中云英岩阶段的白云母进行了Ar-Ar法测试并获得了180 Ma的坪年龄,认为可以代表矿床的形成年龄。江思宏等^[14]对孟恩陶勒盖矿床的寄主岩体中的黑云母斜长花岗岩和白云母斜长花岗岩分别做了测试,结果显示,寄主岩体的成岩年龄(240 Ma)远远大于矿床成矿年龄,因此,孟恩岩体不太可能与矿床有成因上的联系。但是,由于本地区中生代岩浆活动广泛发育,并不能排除在孟恩岩体周边地区存在和矿床有关联的岩体的可能性。在矿床西侧的杜尔基岩体被有些学者认为可能和成矿有关。而解决杜尔基岩体与孟恩陶勒盖银铅锌矿之间的联系问题的关键就是二者的形成年龄是否能够耦合。江思宏等^[14]报道了杜尔基岩体中距离孟恩岩体最近的黑云母花岗岩的年龄为154 Ma,同样小于孟恩岩体的成矿年龄。然而,如前所述,杜尔基岩体岩性组合复杂,那么,是否存在其他的岩性单元和成矿有关联呢?

根据本次研究结果,杜尔基岩体的岩浆活动时限为130~238 Ma,似乎涵盖了孟恩陶勒盖银铅锌矿的成矿年龄。但是,经过详细对比发现,杜尔基岩体尽管年龄上跨度较大,但是从岩浆活动的期次上看,恰恰缺少和成矿年龄(180 Ma)相对应的活动期次,即缺少早侏罗世的岩浆活动。因此,杜尔基岩体很难和孟恩陶勒盖银铅锌矿的成矿作用存在成因上的联系。当然,也有可能是成矿岩体仍未出露

或已经被稍晚期次的岩浆活动完全改造。

6 结 论

(1) 杜尔基地区花岗岩是由中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗斑岩等岩性组成的杂岩体。

(2) 杜尔基地区岩浆活动年龄跨度较大,可分为3期:晚三叠世(213~238 Ma),晚侏罗世(150 Ma),早白垩世(130 Ma)。杜尔基岩体所呈现的三期岩浆活动,均指示了一个拉张的构造背景,而缺少与俯冲相关的岩浆活动。

(3) 杜尔基地区花岗岩里特曼指数变化范围为1.77~2.54,为钙碱性系列,在SiO₂-K₂O上投在了高钾钙碱性系列区域,在A/NK-A/CNK图解上投在了过铝质岩石区域,总体来看,杜尔基地区花岗岩属于高钾钙碱性系列过铝质岩石,整体呈现高硅,高碱,过铝,贫铁、镁、锰,低磷、钛、钙的特征。

(4) 从年龄上看,杜尔基岩体缺少早侏罗纪的岩浆活动,因而不大可能与其周边的孟恩陶勒盖铋铅银矿具有成因上的联系。

致谢:感谢徐东卓、邱磊、张国庆同学在野外的无私帮助,感谢中国地质大学(北京)冯子齐、田雪萍、李希等同学对笔者学习上的帮助;感谢邓晋福老师、周肃老师、王瑜老师、刘翠老师、周红英老师、秦虹老师、宝宏岩高工对实验、野外工作的帮助。

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 Geological and 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, 23(4): 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] Gao J, Klemd R, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. Tectonophysics, 2011, 499: 118-131.
- [6] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 4607-4626.
- [7] Yakubchuk A S, Seltmann R., Shatov V, et al. The Altaids: tectonic evolution and metallogeny[J]. Society of Economic Geologists Newsletters, 2001, 46: 7-14.
- [8] 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-mantle metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 259-269(in Chinese with English abstract).
- [9] 周漪, 葛文春, 王青海. 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(5): 1-23.
Zhou Yi, Ge Wenchun, Wang Qinghai. Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(5): 1-23 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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).
- [11] 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 Yanshan orogenic belt in Yanshan era[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(2): 157-165 (in Chinese with English abstract).
- [12] 丛利民, 李国志. 内蒙古兴安盟杜尔基花岗岩特征研究[J]. 甘肃地质, 2008, 17(3): 74-79.
Cong Limin, Li Guozhi. Study on characteristics of Duerji intrusive in Xinganmeng area of Inner Mongolia[J]. Gansu Geology, 2008, 17(3): 74-79(in Chinese with English abstract).
- [13] 阿木古冷, 吉珍娃, 董德君, 等. 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, 2009, 30(1): 1-8.

- A Muguleng, Ji Zhenwa, Dong Dejun, et al. Lithogeochemical characteristics and tectonic setting of Early Cretaceous intrusive rocks from Duerji area in the middle part of Daxin' an Mountains[J]. Resources Survey & Environment, 2009, 30(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [14] 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 Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1755-1769 (in Chinese with English abstract).
- [15] Guo F, Fan W, Gao X.F, et al. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth[J]. Lithos, 2010, 120: 563-578.
- [16] 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
- [17] 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.
- [18] 王伟, 许文良, 王枫, 等. 满洲里-额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石U-Pb年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约[J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 88-105.
- Wang Wei, Xu Wenliang, Wang Feng, et al. Zircon U-Pb chronology and assemblages of Mesozoic granitoids in the Manzhouli-Erguna area, NE China: Constraints on the regional tectonic evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(1): 88-105 (in Chinese with English abstract).
- [19] 曾维顺, 周建波, 董策, 等. 蒙古-鄂霍茨克洋俯冲的记录: 额尔古纳地区八大关变质杂岩的证据[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1948-1960.
- Zeng Weishun, Zhoujianbo, Dong Ce, et al. Subduction record of Mongol-Okhotsk Ocean: Constrains from Badaguan metamorphic complexes in the Erguna massif, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(7): 1948-1960(in Chinese with English abstract).
- [20] 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.
- [21] 阿木古冷, 吉珍娃, 董德君, 等. 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, 2009, 30(1): 1-8.
- Amu Guleng, Ji Zhenwa, Dong Dejun, et al. Lithogeochemical characteristics and tectonic setting of Early Cretaceous intrusive rocks from Duerji area in the middle part of Daxin' an Mountains[J]. Resources Survey & Environment, 2009, 30(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [22] 侯可军, 李延河, 田有容. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位U-Pb定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Youqing. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting LA-MC-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- [23] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [24] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 635-643.
- [25] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and process[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. London. Spec. Publ., 1989, 42: 313-345.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell. Scientific Publications, 1985: 143-209.
- [27] Lee J, Williams I, Ellis D. Pb, U and Th diffusion in nature zircon[J]. Nature, 1997, 159-162.
- [28] Cherniak D J, Watson E.B. Pb diffusion in zircon [J]. Chemical Geology, 2000, 5-24.
- [29] 张万益, 聂凤军, 刘树文, 等. 大兴安岭南段西坡金属矿床特征及成矿规律[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1583-1599.
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Liu Shuwen, et al. Characteristics and metallogenic regularities of ore deposits on the western slope of the southern section of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1583-1599 (in Chinese with English abstract).
- [30] Groves D I, Bierlein F P. Geodynamic settings of mineral deposit systems[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 19-30.
- [31] Bierlein F P, Groves D I, Cawood P A. Metallogeny of accretionary orogens—the connection between lithospheric processes and metal endowment [J]. Ore Geology Reviews, 2009, 36: 282-292.
- [32] Mao J W, Chen Y B, Chen M H, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. Mineralium Deposita, 2013, 48: 267-294.
- [33] Zhai M G, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: link with secular changes in the evolving Earth[J]. Gondwana

- Research, 2013, 24: 275–297.
- [34] Hu R Z, Zhou M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China —an introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 579–588.
- [35] Pirajno F, Seltmann R, Yang Y. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2: 157–185.
- [36] Li S R, Santosh M. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.03.002>.
- [37] Dmitry V M, Valery A V, Alexey Y K, et al. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18, 400–419.
- [38] Donskaya T V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, et al. Late Paleozoic– Mesozoic subduction– related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million– year history of the Mongol– Okhotsk Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.1007.1023>.
- [39] 王召林, 金凌, 李占龙, 等. 大兴安岭中北段莫尔道嘎地区含矿斑岩的锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 796–810.
Wang Zhaolin, Jin Jun, Li Zhanlong, et al. Zircon U–Pb ages and Hf isotopic characteristics of mineralized porphyries in the Mordaoga area, northern– central Da Hinggan Mountains, and their metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 796– 810(in Chinese with English abstract).
- [40] 王忠, 朱洪森. 大兴安岭中南段中生代火山岩特征及演化[J]. *中国区域地质*, 1999, 18(4): 351–358.
Wang Zhong, Zhu Hongsen. Temporal and spatial evolution of the Mesozoic volcanism in mid– southern Daxinganling Mountain[J]. *Regional Geology of China*, 1999, 18(4): 351–358 (in Chinese with English abstract).
- [41] Ouyang H G, Mao J W, Santosh M, et al. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism in NE China and surrounding regions: Perspectives from spatio– temporal distribution patterns of ore deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.011>.
- [42] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A–type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 143–173.
- [43] Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y, et al. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range[C]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 2097–2105.
- [44] Xu W L, Pei F P, Gao F H, et al. Zircon U– Pb age from basement granites in Yishu granben and its tectonic implications[J]. *Earth Sciences*, 2008, 33: 145–150.
- [45] Wang F, Xu W L, Meng E, et al. Caledonian Amalgamation of the Songnen– Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 234: 234–248.
- [46] 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.
- [47] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I–type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 2003, 241–273.
- [48] Gao F H, Xu W L, Yang D B, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating from granitoids in southern basement of Songliao basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50: 995–1004.
- [49] Chu S X, Liu J M, Xu J H, et al. Zircon U– Pb dating, petrogenesis and tectonic significance of the granodiorite in the Sankuanggou skarn Fe– Cu deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28: 433–450.
- [50] Jahn B M, Litvinovsky B A, Zanzvilevich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian– Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2009, 113: 521–539.
- [51] Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re–Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198: 307–322.
- [52] Zhu R X, Chen L, Wu F Y, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science in China (Series D)*, 2011, 54: 789–797.
- [53] Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large– scale mineralization in the North China and adjacent areas: implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Sciences of China (Series D)*, 2003, 46: 838–851.
- [54] Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23: 1217–1238.
- [55] Barbarin B A. Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999, 605–626.
- [56] 张炯飞, 庞庆邦, 朱群, 等. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌矿床白云母 Ar–Ar 年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 2003, 22(3): 253–255.
Zhang Jiongfei, Pang Qingbang, Zhu Qun, et al. mengentaolegai Ag– Pb– Zn deposit in Inner Mongolia: Ar– Ar age of muscovite and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(3): 253–255.