

佳木斯地块东部二叠纪锦山花岗杂岩体的成因及其地质意义

毕君辉, 葛文春, 张彦龙, 杨 浩, 王智慧

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要:报道了佳木斯地块东部锦山花岗杂岩体的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果、全岩地球化学和锆石 Hf 同位素特征, 确定了花岗质岩石的形成时代、源区性质及其地球动力学背景, 同时也为中亚造山带东段的构造演化提供重要线索。花岗岩的锆石主要呈自形—半自形晶, 发育显著的震荡生长环带, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值在 0.12~1.20 之间, 显示其典型的岩浆成因。测年结果表明这些花岗质岩石形成于早—中二叠世 (260~278 Ma)。地球化学特征显示: 花岗质岩石 $w(\text{SiO}_2)$ 值为 66.75%~70.10%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 4.40%~5.23%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 值为 0.77%~2.80%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 0.18~0.61, A/CNK 值为 0.97~1.14; 这些岩石富集大离子亲石元素 (Rb、Ba 和 K), 相对亏损高场强元素 (Nb、Ta、P、Zr、Ti 和 Hf)。锆石原位 Hf 同位素分析显示, 花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.8~7.7 之间, 两阶段 Hf 模式年龄介于 953~1 578 Ma 之间。该区花岗质岩石属于偏铝质—弱过铝质的低钾—中钾钙碱性 I 型花岗岩, 原始岩浆起源于中—新元古代增生的下地壳物质的部分熔融。结合区域研究资料, 研究区内早—中二叠世花岗岩就位于活动大陆边缘环境, 其形成可能与佳木斯地块东侧古大洋板块的西向俯冲作用有关。

关键词:花岗岩; 二叠纪; 锆石 U-Pb 定年; 岩石成因; 活动大陆边缘; 俯冲作用; 佳木斯地块
中图分类号: P595; P597 **文献标志码:** A

Petrogenesis of Permian Jinshan Granitic Complex in the Eastern Jiamusi Massif and Its Geological Implications

BI Jun-hui, GE Wen-chun, ZHANG Yan-long, YANG Hao, WANG Zhi-hui

(School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: Zircon LA-ICPMS U-Pb dating results, whole rock geochemistry and zircon Hf isotopic characteristics of Jinshan granitic complex in the eastern Jiamusi massif were reported, the formation age, source characteristics and geodynamics setting of these granitic rocks were identified in order to find the tectonic evolution of the eastern segment of Central Asian orogenic belt. Zircons from Jinshan granite rocks are euhedral-subhedral in shape, and display distinctly oscillatory zoning structures, and values of $w(\text{Th})/w(\text{U})$ are 0.12-1.20, indicating a magmatic origin. The dating results show that the granitic rocks form in Early-Middle Permian (260-278 Ma). The geochemical characteristics show that $w(\text{SiO}_2)$, $w(\text{Na}_2\text{O})$, $w(\text{K}_2\text{O})$, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ and A/CNK values of the granitic rocks are 66.75%-70.10%, 4.40%-5.23%, 0.77%-2.80%, 0.18-0.61 and 0.97-1.14, respectively; these rocks are rich in large ion lithophile elements (Rb,

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41330206); 中国地质调查局地质大调查项目 (2012000100350001)

作者简介: 毕君辉 (1988-), 女, 黑龙江佳木斯人, 理学硕士研究生, E-mail: biying2746@126.com。

通讯作者: 葛文春 (1963-), 男, 黑龙江富锦人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: gewenchun@jlu.edu.cn。

Ba and K) and depleted in high field strength elements (Nb, Ta, P, Zr, Ti and Hf). In-situ Hf isotope analysis reveals that $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of the granite rocks are $-0.8-7.7$, and the two-stage Hf model ages are 953-1 578 Ma. These granitic rocks belong to low-middle potassium calc-alkaline I-type granites with metaluminous-weakly peraluminous. The primary magma originates from the partial melting of Mesoproterozoic-Neoproterozoic accreted lower crust. Combined with the regional geological investigation, the Early-Middle Permian granites in the study area are emplaced in an active continental margin setting, which is likely related to the westward subduction of Paleo-oceanic plate beneath the Jiamusi massif.

Key words: granite; Permian; zircon U-Pb dating; petrogenesis; active continental margin; subduction; Jiamusi massif

0 引言

中国东北地区位于中亚造山带东段^[1-2],为典型的显生宙增生造山带,Sengor 等将其称为阿尔泰构造拼贴带^[3]。东北地区经历了古亚洲洋和太平洋两大构造域演化阶段以及若干中、小块体复杂拼贴演化历史的构造拼贴^[4-6],自西北向东南依次为额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块、佳木斯地块和兴凯地块^[7-9]。此外,东北地区广泛发育古生代—中生代花岗岩^[10-13]。近年来,不少学者对大兴安岭地区花岗岩的形成时代、地壳增生以及区域构造演化历史进行了较为详细的研究^[1,14-22],而对黑龙江东部花岗岩(特别是古生代花岗岩)的研究则相对薄弱^[10]。随着佳木斯地块麻山杂岩约 500 Ma 变质年龄的报道和显生宙花岗岩年龄的确定,使该地块的基底组成和构造属性等问题成为国内外学者研究的热点之一^[7-8,23-29]。目前,佳木斯地块花岗岩的研究主要集中在南部穆棱—牡丹江、鸡西等地区,对佳木斯地块东部的研究十分匮乏,不利于提高和完善对佳木斯地块的整体认识。研究区位于佳木斯地块东部的锦山地区,此前并没有同位素年代学资料记载该区花岗质岩石的形成时代,制约了对本区花岗岩成因及其地质意义的研究。基于此,笔者通过对锦山花岗杂岩体锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,明确岩体的形成时代及其成因,并结合区域地质资料,进一步探讨了该区的构造背景及其动力学机制等问题。

1 地质概况及样品特征

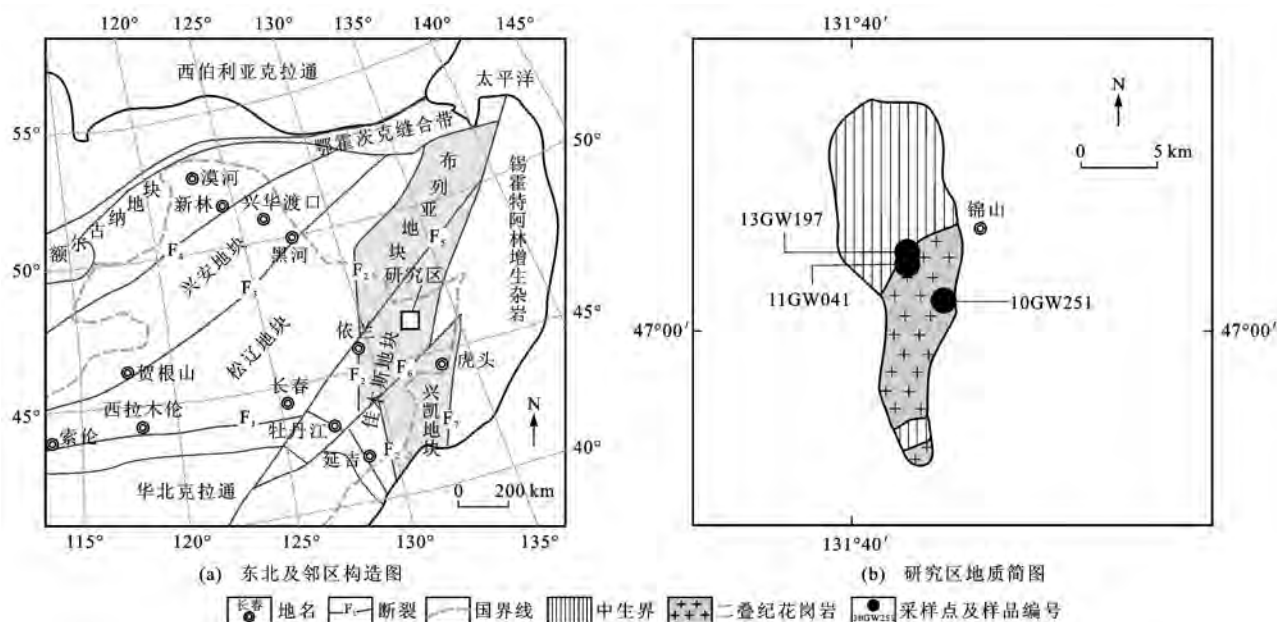
佳木斯地块是中亚造山带在中国东北的一个重要构造单元^[3],也是兴蒙造山带若干变质地体中最著名的一个,地处西伯利亚克拉通和华北克拉通之间。该地块呈 SN 向带状展布,向南、北可分别延伸到兴凯地块和俄罗斯境内的布列亚地块[图 1(a)]。

Wilde 等研究认为它们有着一致的早期地壳演化史,称其为佳木斯—兴凯—布列亚地块^[24-25,30]。佳木斯地块东缘发育晚古生代跃进山增生杂岩,与中生代就位的那丹哈达地体相邻,西以嘉荫—牡丹江断裂为界。

佳木斯地块的结晶基底主要由麻粒岩相—角闪岩相变质的麻山杂岩和大量出露的花岗质岩石组成。黑龙江省地质矿产局报道佳木斯地块形成于太古代^[31],但近期研究结果表明,该地块麻粒岩相变质作用发生在约 500 Ma^[23-32],并且主要存在 515~530、254~270 Ma 两期花岗质岩浆作用^[9-10]。其中,两期花岗质岩石分别形成于泛非期变质造山作用和古大洋板块的俯冲作用,共同侵入到麻山杂岩中,是佳木斯地块的重要组成部分。此外,该地块东缘还发育有二叠纪火山岩^[33]。

兴凯地块位于中亚造山带最南端^[34],大部分出露于俄罗斯境内,只有少部分延伸到中国东北[图 1(a)]。中国的兴凯地块主要由前寒武纪变质基底岩石和各时代的花岗质岩石组成。其中,前寒武纪变质基底岩石零星出露,其变质程度及岩石特征相当于佳木斯地块的麻山杂岩^[31]。兴凯地块的花岗质岩石主要有与泛非期变质造山作用有关的花岗岩^[8]、大面积未变形的具有活动大陆边缘属性的二叠纪花岗岩^[30,35]以及造山后扩张伸展环境下的三叠纪花岗岩^[35]。

锦山花岗杂岩体位于黑龙江省富锦市锦山镇西南,大地构造位置属于佳木斯地块东部[图 1(a)]。该岩体呈 SN 向展布的岩株状产出,主要被白垩纪东大岭组和第四系所覆盖。黑龙江省地质矿产局依据岩石类型和地层对比,将本区花岗岩划分为古元古代^[31]。本文通过详细的野外地质调查表明,锦山花岗杂岩体主要岩石类型为二长花岗岩和花岗闪长岩,局部可见晚期侵入的辉绿岩脉,但由于受野外出



F₁ 为索伦—西拉木伦—长春断裂; F₂ 为嘉荫—牡丹江断裂; F₃ 为贺根山—黑河断裂; F₄ 为新林—喜贵图断裂; F₅ 为伊通—依兰断裂; F₆ 为敦化—密山断裂; 图(a)引自文献[36]; 图(b)引自文献[31]

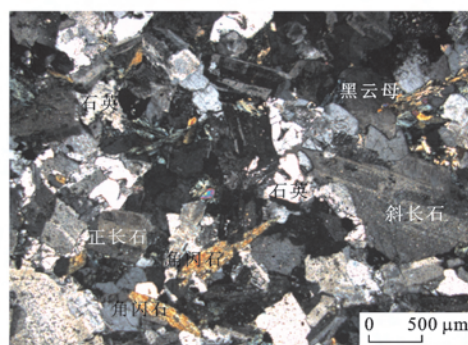
图 1 东北及邻区构造图和研究区地质简图

Fig. 1 Tectonic Map of Northeast China and Its Adjacent Areas and Geological Sketch Map of the Study Area

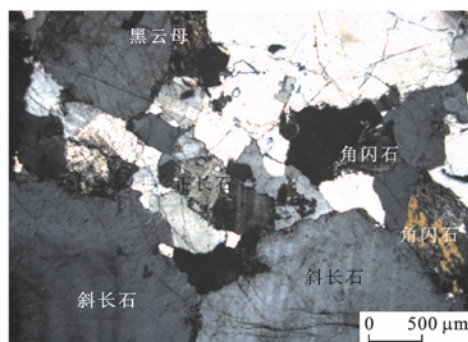
露情况的限制,并未见岩性变化的直接证据。

细粒角闪黑云二长花岗岩呈细粒花岗结构和块状构造。主要矿物为石英(体积分数为 20%~25%)、斜长石(30%~40%)、正长石(20%~30%)、黑云母(5%~8%)和角闪石(低于 5%)。石英呈他形粒状且波状消光;斜长石呈半自形板柱状,聚片双晶发育,绢云母化蚀变严重,边部可见蠕虫构造,粒径 0.2~0.8 mm;正长石呈半自形板柱状,卡式双晶发育,局部可见高岭土化蚀变;黑云母呈鳞片状,粒径 0.2~0.5 mm,普遍发育绿泥石化蚀变[图 2(a)]。副矿物主要为锆石、磷灰石和少量不透明矿物等。

中细粒黑云花岗闪长岩呈中细粒花岗结构和主体块状构造,局部可见弱片麻状构造。主要矿物为石英(体积分数为 25%~30%)、斜长石(40%~50%)、碱性长石(10%~15%)和黑云母(5%~10%),含少量角闪石。石英呈他形粒状且波状消光,粒径为 0.2~0.8 mm;斜长石呈半自形板柱状,聚片双晶发育清晰,个别颗粒可见环带结构,粒径大小不等(0.5~3 mm);碱性长石呈半自形—他形板柱状,以条纹长石为主,局部可见高岭土化蚀变,粒径 0.5~1.5 mm;黑云母呈鳞片状,绿泥石化发育,具有普鲁士蓝的异常干涉色;普通角闪石呈柱状,具有浅绿—绿色多色性[图 2(b)]。副矿物主要为锆石、榍石,以及少量磷灰石和不透明矿物等。



(a) 二长花岗岩(单片光)



(b) 花岗闪长岩(单片光)

图 2 花岗质岩石的镜下显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of Granite Rocks

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

用于锆石 U-Pb 定年的样品均采自天然露头 and

采石场的新鲜样品。样品的破碎和锆石的挑选工作在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。在阴极发光(CL)图像基础上,采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱计(LA-ICPMS)法对锆石进行微区原位单点 U-Pb 同位素定年。试验在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,分析仪器为由美国 New Wave Research Inc. 公司生产的激光剥蚀进样系统(UPI93SS)和由美国 AGILENT 科技有限公司生产的 Agilent7500a 型四级杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子体质谱仪(LA-ICPMS),激光束斑直径为 $36\ \mu\text{m}$,激光器工作频率为 $10\ \text{Hz}$ 。试验中,采用氦气作为剥蚀物质的载气,利用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,利用哈佛大学国际标准锆石 91500 作为外部校正^[37],单个数据点误差类型为 1σ ,加权平均年龄误差类型为 2σ 。样品的同位素比值计算选用澳大利亚 Glitter 4.4 数据处理软件,并采用 Andersen 的方法对同位素比值进行校正^[38],以消除普通 ^{204}Pb 的影响。

2.2 Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。试验采用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 Geolas-193 nm 准分子激光取样系统(LA-MC-ICPMS),激光束斑直径 $36\ \mu\text{m}$,激光频率 $8\ \text{Hz}$ 。详细测试流程以及仪器运行原理等参见文献^[39]。试验过程中,标准锆石 GJ-1 和 MUD 测定的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 值分别为 $0.282\ 020 \pm 0.000\ 008$ 、 $0.282\ 508 \pm 0.000\ 007$,该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致^[40-41]。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中,采用 Blichert-Toft 等所推荐的球粒陨石值^[42],Hf 同位素单阶段模式年龄(T_{DM1})以亏损地幔为参考计算,两阶段模式年龄(T_{DM2})采用大陆地壳平均组成来计算。

2.3 主量、微量和稀土元素分析

主量、微量和稀土元素的分析均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中,主量元素在 RigakuR1X 型荧光光谱仪(XRF)上进行,微量、稀土元素的分析采用 PEElan6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。测量采用自动进样的方式,以外部标准校正方法进行。对国际标样玄武岩(BHVO-1、BCR-2)和安山岩(AGV-1)的分析结果表明,主量元素分析精度优于 5% ,微量元素分析精度一般优于 10% ^[43]。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

3 件样品的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年数据列于表 1。阴极发光(CL)图像显示:锆石多呈自形一半自形晶,发育有明显的岩浆振荡环带(图 3)。较高的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值($0.12 \sim 1.20$)表明锆石具有典型的岩浆成因^[36-38]。

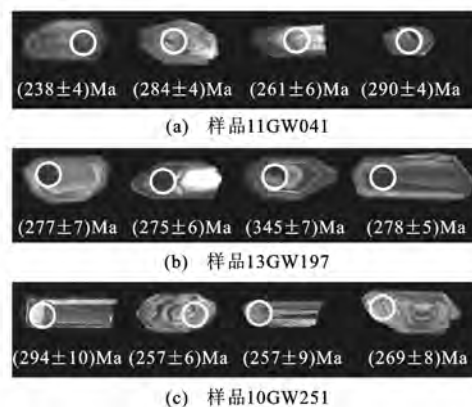


图3 花岗岩岩石的代表性锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL Images of the Representative Zircons from Granite Rocks

样品 11GW041 采自黑龙江省富锦市锦山镇仁义村西南采石场($47^{\circ}05'00.2''\text{N}$, $131^{\circ}42'32.9''\text{E}$),岩石类型为细粒角闪黑云二长花岗岩。22 个锆石分析点的测试结果表明,所测锆石的同位素分析数据均落在谐和线上及其附近[图 4(a)]。其中 10 个锆石分析点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄集中分布在 $253 \sim 267\ \text{Ma}$ 之间,加权平均值为 $(261 \pm 3)\text{Ma}$,平均标准权重偏差(MSWD)为 0.90 ,应代表岩浆结晶年龄;另有 11 个锆石分析点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 $(288 \pm 4)\text{Ma}$,MSWD 值为 2.0 ;1 个锆石的谐和年龄为 $(502 \pm 7)\text{Ma}$,应为岩体捕获的早期岩浆锆石。

样品 13GW197 采自黑龙江省富锦市锦山镇仁义村西南采石场($47^{\circ}05'02.6''\text{N}$, $131^{\circ}42'29.3''\text{E}$),岩石类型为细粒角闪黑云二长花岗岩。18 个锆石分析点的测试数据均分布在谐和线上及其附近。其中 16 个锆石分析点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄集中分布在 $272 \sim 286\ \text{Ma}$ 之间,年龄加权平均值为 $(278 \pm 3)\text{Ma}$,MSWD 值为 0.37 [图 4(b)],代表了岩浆结晶年龄;另外 2 个锆石分析点的年龄分别为 (342 ± 5) 、 $(345 \pm 7)\text{Ma}$,可能为捕获锆石;其余锆石分析点可能因后期不同程度的放射性成因 Pb 丢失,导致数据点远离谐和线分布而未参与计算。

表 1 花岗质岩石的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

Tab. 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb Dating Results of Granite Rocks

分析点 编号	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
11GW041-01	11	90	233	0.39	0.333 83 \pm 0.012 70	0.046 12 \pm 0.000 68	292 \pm 10	291 \pm 4
11GW041-02	10	190	195	0.98	0.293 27 \pm 0.012 14	0.041 40 \pm 0.000 62	261 \pm 10	262 \pm 4
11GW041-03	28	248	619	0.40	0.294 79 \pm 0.008 63	0.041 62 \pm 0.000 58	262 \pm 7	263 \pm 4
11GW041-04	43	774	912	0.85	0.307 43 \pm 0.010 67	0.041 02 \pm 0.000 60	272 \pm 8	259 \pm 4
11GW041-05	9	167	166	1.01	0.323 96 \pm 0.014 48	0.045 17 \pm 0.000 69	285 \pm 11	285 \pm 4
11GW041-06	15	241	281	0.86	0.321 97 \pm 0.012 94	0.044 90 \pm 0.000 67	283 \pm 10	283 \pm 4
11GW041-07	50	810	1 077	0.75	0.285 16 \pm 0.008 42	0.040 04 \pm 0.000 57	255 \pm 7	253 \pm 4
11GW041-08	7	93	128	0.73	0.318 15 \pm 0.021 99	0.045 04 \pm 0.000 72	280 \pm 17	284 \pm 4
11GW041-09	36	233	395	0.59	0.643 13 \pm 0.018 99	0.081 06 \pm 0.001 15	504 \pm 12	502 \pm 7
11GW041-10	4	59	72	0.82	0.322 79 \pm 0.030 10	0.044 87 \pm 0.000 84	284 \pm 23	283 \pm 5
11GW041-11	29	468	609	0.77	0.291 87 \pm 0.009 78	0.041 27 \pm 0.000 59	260 \pm 8	261 \pm 4
11GW041-12	20	318	418	0.76	0.290 77 \pm 0.009 72	0.040 88 \pm 0.000 59	259 \pm 8	258 \pm 4
11GW041-13	28	352	613	0.57	0.290 48 \pm 0.009 44	0.040 92 \pm 0.000 58	259 \pm 7	259 \pm 4
11GW041-14	12	178	205	0.87	0.345 25 \pm 0.015 31	0.048 00 \pm 0.000 71	301 \pm 12	302 \pm 4
11GW041-15	13	300	250	1.20	0.298 79 \pm 0.018 68	0.041 70 \pm 0.000 69	265 \pm 15	263 \pm 4
11GW041-16	18	173	355	0.49	0.335 37 \pm 0.011 71	0.046 41 \pm 0.000 68	294 \pm 9	292 \pm 4
11GW041-17	21	331	436	0.76	0.299 48 \pm 0.010 85	0.041 67 \pm 0.000 61	266 \pm 8	263 \pm 4
11GW041-18	11	246	217	1.14	0.330 40 \pm 0.018 60	0.042 23 \pm 0.000 68	290 \pm 14	267 \pm 4
11GW041-19	7	113	134	0.84	0.332 76 \pm 0.017 42	0.046 08 \pm 0.000 73	292 \pm 13	290 \pm 4
11GW041-20	5	43	104	0.42	0.335 35 \pm 0.016 98	0.046 68 \pm 0.000 74	294 \pm 13	294 \pm 5
11GW041-21	10	180	183	0.99	0.323 33 \pm 0.014 06	0.045 16 \pm 0.000 70	284 \pm 11	285 \pm 4
11GW041-22	10	205	175	1.17	0.368 47 \pm 0.021 15	0.045 86 \pm 0.000 73	319 \pm 16	289 \pm 4
13GW197-01	7	107	129	0.83	0.331 71 \pm 0.013 02	0.045 35 \pm 0.000 95	291 \pm 10	286 \pm 6
13GW197-02	82	1 370	2 729	0.50	0.190 29 \pm 0.002 31	0.025 50 \pm 0.000 38	177 \pm 2	162 \pm 2
13GW197-03	84	1 590	2 538	0.63	0.209 50 \pm 0.002 48	0.027 37 \pm 0.000 41	193 \pm 2	174 \pm 3
13GW197-04	6	70	109	0.65	0.322 48 \pm 0.015 49	0.043 94 \pm 0.001 07	284 \pm 12	277 \pm 7
13GW197-05	7	106	132	0.80	0.326 18 \pm 0.012 95	0.043 66 \pm 0.000 96	287 \pm 10	275 \pm 6
13GW197-06	12	103	228	0.45	0.317 09 \pm 0.008 76	0.044 34 \pm 0.000 79	280 \pm 7	280 \pm 5
13GW197-07	6	64	84	0.76	0.403 52 \pm 0.017 83	0.054 91 \pm 0.001 16	344 \pm 13	345 \pm 7
13GW197-08	20	213	378	0.56	0.315 44 \pm 0.007 31	0.044 06 \pm 0.000 76	278 \pm 6	278 \pm 5
13GW197-09	56	389	892	0.44	0.400 91 \pm 0.005 17	0.054 54 \pm 0.000 82	342 \pm 4	342 \pm 5
13GW197-10	21	187	307	0.61	0.451 59 \pm 0.008 87	0.054 50 \pm 0.000 91	378 \pm 6	342 \pm 6
13GW197-11	42	907	893	1.02	0.290 50 \pm 0.004 55	0.035 46 \pm 0.000 56	259 \pm 4	225 \pm 3
13GW197-12	4	54	75	0.71	0.316 63 \pm 0.016 31	0.044 67 \pm 0.001 05	279 \pm 13	282 \pm 6
13GW197-13	8	90	143	0.63	0.334 04 \pm 0.012 02	0.043 99 \pm 0.000 94	293 \pm 9	278 \pm 6
13GW197-14	5	46	96	0.49	0.332 82 \pm 0.014 63	0.043 76 \pm 0.001 05	292 \pm 11	276 \pm 6
13GW197-15	10	138	177	0.78	0.325 90 \pm 0.011 23	0.044 17 \pm 0.000 91	286 \pm 9	279 \pm 6
13GW197-16	44	470	845	0.56	0.342 90 \pm 0.007 69	0.043 05 \pm 0.000 76	299 \pm 6	272 \pm 5
13GW197-17	14	152	247	0.62	0.320 54 \pm 0.007 68	0.044 87 \pm 0.000 78	282 \pm 6	283 \pm 5

续表 1

分析点 编号	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
13GW197-18	35	503	625	0.81	0.318 75±0.005 66	0.043 88±0.000 71	281±4	277±4
13GW197-19	28	297	523	0.57	0.327 83±0.006 11	0.043 91±0.000 72	288±5	277±4
13GW197-20	10	158	176	0.90	0.313 61±0.011 42	0.044 02±0.000 88	277±9	278±5
13GW197-21	34	315	593	0.53	0.373 45±0.006 22	0.048 80±0.000 78	322±5	307±5
13GW197-22	60	1 277	1 907	0.67	0.208 76±0.004 32	0.025 48±0.000 43	193±4	162±3
13GW197-23	2	26	41	0.63	0.318 08±0.028 92	0.043 83±0.001 40	280±22	277±9
13GW197-24	4	35	89	0.39	0.312 19±0.015 56	0.043 62±0.001 06	276±12	275±7
10GW251-01	61	421	749	0.56	0.567 68±0.011 30	0.073 60±0.001 48	457±7	458±9
10GW251-02	87	743	1 013	0.73	0.568 26±0.010 21	0.074 40±0.001 46	457±7	463±9
10GW251-03	42	259	510	0.51	0.599 57±0.016 25	0.073 86±0.001 64	477±10	459±10
10GW251-04	31	304	376	0.81	1.145 50±0.024 18	0.051 48±0.001 24	775±11	324±8
10GW251-05	59	506	673	0.75	0.619 33±0.011 70	0.074 36±0.001 49	489±7	462±9
10GW251-06	85	996	890	1.12	0.568 49±0.009 97	0.074 25±0.001 45	457±6	462±9
10GW251-07	8	59	108	0.55	0.258 64±0.043 64	0.040 74±0.001 52	234±35	257±9
10GW251-08	59	380	720	0.53	0.585 21±0.013 04	0.074 04±0.001 53	468±8	460±9
10GW251-09	15	181	230	0.79	0.414 30±0.052 06	0.046 63±0.001 62	352±37	294±10
10GW251-10	56	253	660	0.38	0.584 07±0.016 67	0.074 71±0.001 70	467±11	464±10
10GW251-11	10	90	157	0.57	0.313 27±0.036 35	0.042 68±0.001 28	277±28	269±8
10GW251-12	61	535	656	0.82	0.675 66±0.012 06	0.073 59±0.001 47	524±7	458±9
10GW251-13	30	141	297	0.47	0.701 00±0.020 99	0.086 02±0.001 99	539±13	532±12
10GW251-14	39	143	454	0.32	0.549 42±0.031 66	0.072 80±0.001 71	445±21	453±10
10GW251-15	36	177	357	0.49	0.735 43±0.024 34	0.086 02±0.002 13	560±14	532±13
10GW251-16	38	65	478	0.14	0.592 98±0.021 17	0.074 60±0.001 89	473±13	464±11
10GW251-17	56	248	649	0.38	0.625 07±0.017 79	0.073 87±0.001 42	493±11	459±9
10GW251-18	34	215	380	0.57	0.644 63±0.009 87	0.074 50±0.001 44	505±6	463±9
10GW251-19	27	392	492	0.80	0.355 54±0.020 61	0.039 37±0.000 88	309±15	249±5
10GW251-20	45	313	500	0.63	0.577 23±0.008 60	0.074 74±0.001 43	463±6	465±9
10GW251-21	21	229	346	0.66	0.297 38±0.020 11	0.040 68±0.000 89	264±16	257±6
10GW251-22	24	470	461	1.02	0.345 77±0.022 08	0.035 92±0.000 83	302±17	227±5
10GW251-23	65	456	651	0.70	0.810 10±0.041 71	0.073 29±0.001 71	603±23	456±10
10GW251-24	30	94	361	0.26	0.585 97±0.011 14	0.074 43±0.001 50	468±7	463±9

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物质量分数; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素的同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量;分析点编号以 11GW041 开头的分析点为二长花岗岩;分析点编号以 13GW197 开头的分析点为二长花岗岩;分析点编号以 10GW251 开头的分析点为花岗闪长岩。

样品 10GW251 采自黑龙江省富锦市锦山镇南采石场(47°02′02.5″N,131°43′12.7″E),岩石类型为中细粒黑云花岗闪长岩。24 个锆石分析点的结果表明,18 个锆石分析点的同位素分析数据落在谐和线上及其附近[图 4(c)]。其中 3 个锆石分析点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 $(260\pm 8)\text{Ma}$, MSWD 值为 0.81,代表样品岩浆结晶年龄;另有 13 个锆石分析点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值

为 $(461\pm 5)\text{Ma}$, MSWD 值为 0.12;2 个锆石分析点的谐和年龄分别为 (532 ± 13) 、 $(532\pm 12)\text{Ma}$,应为岩体捕获的早期岩浆锆石;其余锆石分析点可能因放射性成因 Pb 丢失,导致其远离谐和线分布。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量和微量元素

主量和微量元素分析结果及相关参数列于表 2。由表 2 可以看出,研究区内 6 个花岗质岩石样

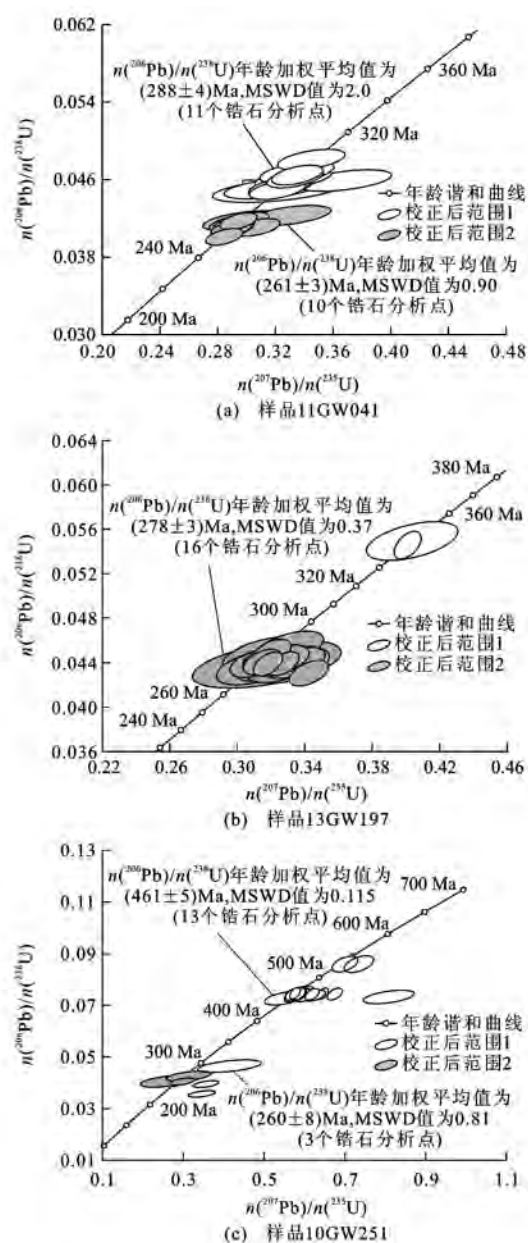


图4 花岗质岩石的锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia Diagrams of Granite Rocks

品的主量、微量元素特征较为一致。 SiO_2 含量(质量分数,下同)主要介于 66.75%~70.10%之间, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 4.40%~5.23%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 值为 0.77%~2.80%, $w(\text{Na}_2\text{O})+w(\text{K}_2\text{O})$ 值为 5.18%~7.84%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 0.18~0.61, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值为 14.36%~15.67%, A/CNK 值为 0.97~1.14。在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图解中,呈现出准铝质—弱过铝质特征[图 5(a)];在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,整体具有中钾钙碱性系列的特征[图 5(b)]。

在稀土元素配分模式中,所有样品均表现为轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)亏损和 Eu 异常较弱的特征[图 6(a)]。二长花岗岩的稀

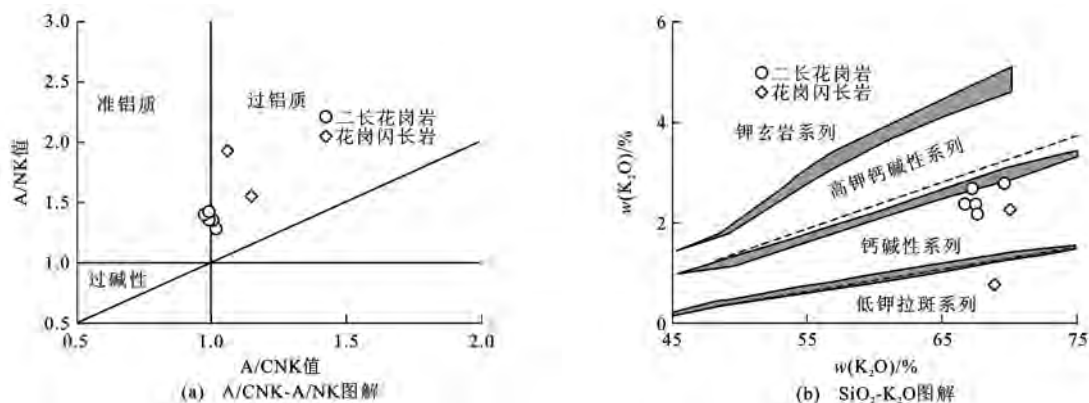
土元素总含量为 $(127.88 \sim 140.36) \times 10^{-6}$, $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 值为 $(5.67 \sim 6.24) \times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 5.03~5.77, $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 3.94~4.46, Eu 异常为 0.72~0.96;花岗闪长岩的稀土元素总含量为 $(92.83 \sim 97.24) \times 10^{-6}$, $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 值为 $(11.61 \sim 14.63) \times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 15.01~21.09, $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 11.32~14.41, Eu 异常为 0.84~1.05。在原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 6(b)]中,花岗质岩石整体上表现出富集 Rb、Ba 和 K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、P、Ti、Zr 和 Hf 等高场强元素(HFSE)的特征。花岗闪长岩的高场强元素亏损较明显,可能暗示着岩浆源区或岩浆结晶分异过程中磷灰石、金红石和含钛(如钛铁矿、榍石等)等副矿物存在分离结晶作用。此外,研究区内样品的 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值和 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值存在较大分异,可能是花岗质岩浆对源区的继承性造成的。

3.2.2 锆石 Hf 同位素

锆石原位 Lu-Hf 同位素测试结果见表 3 和图 7。所测锆石在形成后具有较低的放射性成因 ^{176}Hf 积累($n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值绝大多数小于 0.002),因此, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值基本代表了其形成时的初始值。

二长花岗岩(样品 11GW041)共分析了 15 个锆石分析点(表 3),其中 7 个捕获锆石分析点的年龄介于 288~502 Ma,它们的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 值介于 0.282 649~0.282 726 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.2~3.7, T_{DM1} 值为 765~962 Ma, T_{DM2} 值为 1 052~1 339 Ma。7 个岩浆锆石分析点的年龄介于 253~263 Ma 之间, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 值介于 0.282 642~0.282 771 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.8~5.3, T_{DM1} 值为 699~927 Ma, T_{DM2} 值为 953~1 339 Ma(图 7)。花岗闪长岩(样品 10GW251)共分析了 24 个锆石分析点(表 3),其中 14 个捕获锆石分析点的年龄介于 461~532 Ma 之间,它们的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 值介于 0.282 592~0.282 731 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.5~8.6, T_{DM1} 值为 741~932 Ma, T_{DM2} 值为 1 094~1 527 Ma。3 个岩浆锆石的年龄介于 257~269 Ma 之间, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 值介于 0.282 604~0.282 770 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 1.5~7.7, T_{DM1} 值为 587~843 Ma, T_{DM2} 值为 1 013~1 578 Ma(图 7)。

锦山地区不同岩性的花岗质岩石具有一致的锆石 Hf 同位素特征,即锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.8~7.7 之间,两阶段 Hf 模式年龄介于 953~1 578 Ma 之



图(a)引自文献[44];图(b)引自文献[45]

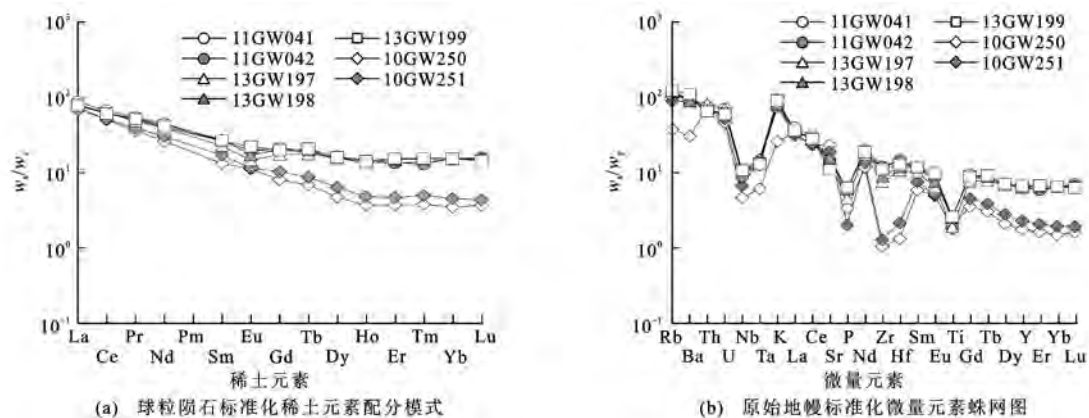
图5 花岗质岩石的 A/CNK-A/NK 图解和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解Fig. 5 A/CNK-A/NK Diagram and $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ Diagram of Granite Rocks w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; w_p 为原始地幔含量; 图(a)引自文献[46]; 图(b)引自文献[47]

图6 花岗质岩石的球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram of Granite Rocks

间。另外,捕获锆石也表现出相似的特征。

4 讨论

4.1 晚古生代花岗岩的形成时代

通过对锦山花岗杂岩体中3个具有代表性的样品进行精确的锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素定年测试研究,所测样品的锆石主要呈自形一半自形晶,振荡生长环带清晰(图2),样品具有相对较高的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(0.12~1.20),显示其岩浆成因的特征。锆石 U-Pb 定年结果表明,3个样品的成岩年龄分别为 (261 ± 3) 、 (278 ± 3) 、 (260 ± 8) Ma(表1、图4),表明锦山花岗杂岩体形成于早一中二叠世岩浆的多次侵入,并非黑龙江省地质矿产局确定的新元古代^[31]。

锦山花岗杂岩体的锆石 U-Pb 定年结果与佳木斯地块曾报道过的二叠纪花岗质岩浆活动的时代(254~284 Ma)一致。代表性岩体有美作岩体(年龄为 (259 ± 4) Ma)、柴河岩体((254 ± 5) Ma)、楚山

岩体((256 ± 5) Ma)、石场岩体((267 ± 2) Ma)、六连岩体((284 ± 2) Ma)等^[9,48-49],反映了佳木斯地块存在二叠纪岩浆活动。这也得到了佳木斯地块东部二叠世(263~293 Ma)火山岩的支持^[33]。另外,兴凯地块同样存在该期岩浆活动,代表性花岗岩体有杨田寨南山岩体(年龄为 (257 ± 2) Ma)、朝鲜屯岩体((287 ± 3) Ma)和兴凯镇东发村晚二叠世流纹岩((264 ± 7) Ma)等^[30,35,50]。上述定年结果揭示出,佳木斯—兴凯地块在二叠纪均发生大规模的构造-岩浆热事件,表明它们可能有着相同的早期地质演化历史。

4.2 岩石成因

花岗质岩石的起源可以分为幔源岩浆的结晶分异^[51]、岩浆混合过程^[52]和地壳物质的部分熔融^[35]。本文所研究的花岗质岩石具有高 Si 和贫 Ca、Fe、Mg 以及过渡族元素(Sc、Ti、Cr)的地球化学属性,结合研究区内未发现铁镁质侵入体,表明它们起源于地壳物质的部分熔融,而不是幔源岩浆的结晶分

表 2 花岗质岩石的主量、微量和稀土元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Major, Trace and Rare Earth Elements of Granite Rocks

样品编号	10GW250	10GW251	11GW041	11GW042	13GW197	13GW198	13GW199
岩性	花岗闪长岩	花岗闪长岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩
$w(\text{SiO}_2)/\%$	68.93	70.10	67.52	67.67	69.64	66.75	67.23
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	15.66	15.67	15.22	14.92	14.36	14.98	14.68
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	3.04	2.25	4.15	4.15	3.41	4.30	4.34
$w(\text{MgO})/\%$	1.31	0.93	1.07	1.14	0.83	1.17	1.15
$w(\text{MnO})/\%$	0.06	0.04	0.09	0.10	0.08	0.10	0.08
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.42	0.39	0.55	0.56	0.41	0.54	0.56
$w(\text{CaO})/\%$	3.70	2.00	2.32	2.60	2.08	2.59	1.70
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.77	2.26	2.37	2.18	2.80	2.38	2.69
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	4.40	4.62	5.23	5.02	4.57	4.80	5.15
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.07	0.04	0.13	0.13	0.10	0.13	0.14
烧失量/ $\%$	1.20	1.26	1.33	1.44	1.35	1.90	1.89
$w_{\text{total}}/\%$	99.57	99.57	99.98	99.91	99.62	99.64	99.61
$(w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O}))/\%$	5.18	6.88	7.60	7.20	7.37	7.18	7.84
$w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$	0.18	0.49	0.45	0.43	0.61	0.50	0.52
A/NK 值	1.94	1.56	1.36	1.41	1.36	1.43	1.29
A/CNK 值	1.06	1.14	0.99	0.97	1.00	0.99	1.01
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	6.90	5.73	10.30	11.00	7.66	10.30	11.10
$w(\text{V})/10^{-6}$	66.20	43.90	52.90	51.60	33.60	54.50	58.30
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	22.60	10.70	4.53	3.86	3.48	4.14	5.09
$w(\text{Co})/10^{-6}$	7.38	4.60	7.06	7.39	4.25	6.73	6.92
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	10.90	3.90	4.25	4.60	2.34	3.08	2.63
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	6.41	5.96	19.60	15.80	6.79	9.79	10.50
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	54.40	36.90	71.30	65.60	52.50	68.10	68.90
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	20.30	17.70	13.20	12.70	15.20	16.70	15.30
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	23.40	55.90	72.80	67.60	80.20	77.40	76.30
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	487.00	394.00	300.00	283.00	261.00	329.00	227.00
$w(\text{Y})/10^{-6}$	7.96	10.30	29.10	28.10	28.50	30.40	29.80
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	3.28	4.73	6.99	6.32	7.52	7.54	7.52
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	0.20	0.14	0.41	0.32	0.41	0.40	0.30
$w(\text{Cd})/10^{-6}$	0.06	0.03	0.02	0.03	0.07	0.08	0.07
$w(\text{In})/10^{-6}$	0.04	0.02	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	0.05	0.07	0.12	0.08	25.40	0.25	1.90
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	1.28	1.91	3.30	2.66	2.93	4.84	4.38
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	208.00	598.00	620.00	636.00	598.00	618.00	758.00
$w(\text{La})/10^{-6}$	22.80	21.10	26.80	24.00	24.50	24.70	24.30
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	40.60	41.50	54.00	49.00	49.80	50.10	49.00
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	4.39	4.75	6.62	6.18	5.91	6.34	6.28
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	15.70	18.00	26.90	23.90	23.50	26.10	25.10
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	2.58	3.33	5.22	5.14	4.44	5.37	5.18

续表 2

样品编号	10GW250	10GW251	11GW041	11GW042	13GW197	13GW198	13GW199
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.82	0.85	1.44	1.45	1.07	1.26	1.63
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	2.08	2.67	5.53	5.07	4.52	5.19	5.14
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.33	0.41	0.91	0.89	0.83	0.95	0.99
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	1.52	2.05	5.00	5.00	5.01	5.28	5.17
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.27	0.35	1.03	0.96	0.98	1.06	1.02
$w(\text{Er})/10^{-6}$	0.78	0.98	2.81	2.84	3.12	3.20	3.21
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.12	0.16	0.45	0.42	0.49	0.51	0.50
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	0.73	0.95	3.13	3.22	3.23	3.19	3.19
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.12	0.14	0.52	0.49	0.48	0.48	0.46
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.250	0.610	0.510	0.540	0.618	0.563	0.522
$w(\text{W})/10^{-6}$	0.40	0.37	0.53	0.47	0.30	0.59	0.59
$w(\text{Tl})/10^{-6}$	0.11	0.32	0.46	0.36	0.40	0.47	0.48
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	13.50	10.80	12.00	6.60	12.00	9.10	7.27
$w(\text{Th})/10^{-6}$	6.10	6.43	6.26	5.41	6.83	5.75	5.45
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.97	1.07	1.45	1.31	1.46	1.26	1.24
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	11.60	14.20	133.00	132.00	84.20	99.10	122.00
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	0.41	0.66	4.50	4.30	3.25	3.60	3.90
$\delta(\text{Eu})$	1.05	0.84	0.81	0.86	0.72	0.72	0.96
$\delta(\text{Ce})$	0.92	0.96	0.95	0.95	0.97	0.94	0.93
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	86.89	89.53	120.98	109.67	109.22	113.87	111.49
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	5.94	7.71	19.38	18.89	18.66	19.86	19.67
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	14.63	11.61	6.24	5.81	5.85	5.73	5.67
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	92.83	97.24	140.36	128.56	127.88	133.73	131.16
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	21.09	15.01	5.77	5.03	5.11	5.22	5.14
$w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	14.41	11.32	4.46	3.94	3.99	4.06	3.97

注: w_{total} 为主量元素总含量; w_{REE} 为稀土元素总含量; w_{LREE} 为轻稀土元素总含量; w_{HREE} 为重稀土元素总含量; $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值; $\delta(\cdot)$ 为元素异常。

异或壳幔岩浆的混合作用,同时也得到该期花岗岩中含有较老的锆石颗粒或残留的支持^[9]。所有样品均具有准铝质—弱过铝质(A/NK 值大于 1.0, A/CNK 值小于 1.1)的低钾—中钾钙碱性系列岩石特征(图 5),并结合岩石中角闪石的出现(图 2),揭示出这些花岗质岩石属于壳源成因的 I 型花岗岩^[53]。另外,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-0.8 \sim 7.7$ 之间,两阶段 Hf 模式年龄介于 $953 \sim 1\,578$ Ma 之间(表 3、图 7),反映岩浆源区岩石应为新增生的年轻地壳物质。然而,研究区内的花岗岩具有多样性的地球化学组成,强烈地表明这些花岗质岩石具有不同的成因过程。

花岗闪长岩的地球化学特征显示其具有强亏损的重稀土元素和较弱的 Eu 异常,相对高的 $w(\text{Sr})$ 值($(394 \sim 487) \times 10^{-6}$)、 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 值($38.25 \sim 61.18$)、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值($15.01 \sim 21.09$)、

$w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值($11.32 \sim 14.41$)和低的 $w(\text{Yb})$ 值($(0.73 \sim 0.95) \times 10^{-6}$)、 $w(\text{Y})$ 值($(7.96 \sim 10.30) \times 10^{-6}$) (表 2、图 6),表明其母岩起源于下地壳物质的部分熔融,高压(高于 $1\,500$ MPa)残留相中存在石榴子石和辉石,而无斜长石^[54-56]。试验研究表明,下地壳玄武岩或角闪岩的部分熔融可导致源区石榴子石和辉石的残留^[57]。因此,可以认为花岗闪长岩起源于高压条件下地壳基性岩石的部分熔融。

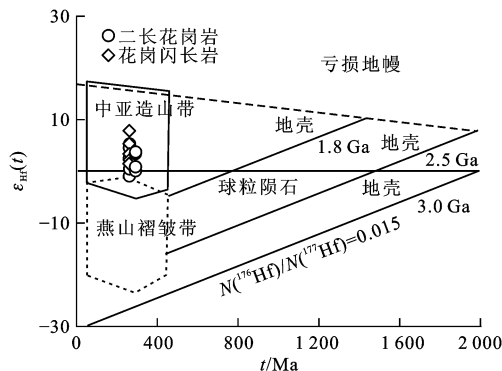
相比之下,二长花岗岩具有相对高的 $w(\text{Yb})$ 值($(3.13 \sim 3.23) \times 10^{-6}$)、 $w(\text{Y})$ 值($(28.1 \sim 30.4) \times 10^{-6}$)和 w_{HREE} 值以及低的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值($14.68\% \sim 17.82\%$)、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值($5.03 \sim 5.77$)、 $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值($3.94 \sim 4.46$)、 $w(\text{Sr})$ 值($(227 \sim 431) \times 10^{-6}$),明显亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素[图 6(b)]。这些地球化学特征同岛弧或活动大

表 3 花岗质岩石的锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Zircon Hf Isotope of Granite Rocks

分析点编号	t/Ma	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	$N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
10GW250-01	461	0.029 283	0.000 763	$0.282\,178 \pm 0.000\,023$	-21.0	-11.1 ± 0.8	1 506	2 837	-0.98
10GW250-02	461	0.044 529	0.001 231	$0.282\,438 \pm 0.000\,022$	-11.8	-2.0 ± 0.8	1 158	2 027	-0.96
10GW250-03	461	0.029 600	0.000 821	$0.282\,666 \pm 0.000\,023$	-3.7	6.2 ± 0.8	826	1 289	-0.98
10GW250-04	260	0.025 751	0.000 739	$0.282\,683 \pm 0.000\,019$	-3.1	2.4 ± 0.7	801	1 491	-0.98
10GW250-05	461	0.032 669	0.000 914	$0.282\,593 \pm 0.000\,019$	-6.3	3.5 ± 0.7	932	1 527	-0.97
10GW250-06	260	0.024 996	0.000 660	$0.282\,682 \pm 0.000\,020$	-3.2	2.4 ± 0.7	801	1 493	-0.98
10GW250-07	461	0.025 644	0.000 742	$0.282\,604 \pm 0.000\,021$	-5.9	4.0 ± 0.7	911	1 486	-0.98
10GW250-08	461	0.029 155	0.000 786	$0.282\,669 \pm 0.000\,021$	-3.6	6.3 ± 0.7	821	1 279	-0.98
10GW250-09	260	0.033 965	0.000 921	$0.282\,676 \pm 0.000\,021$	-3.4	2.2 ± 0.7	815	1 516	-0.97
10GW250-10	461	0.034 548	0.000 924	$0.282\,697 \pm 0.000\,022$	-2.6	7.2 ± 0.8	785	1 195	-0.97
10GW250-11	260	0.034 917	0.000 970	$0.282\,657 \pm 0.000\,024$	-4.1	1.5 ± 0.8	843	1 578	-0.97
10GW250-12	461	0.035 087	0.000 998	$0.282\,648 \pm 0.000\,022$	-4.4	5.5 ± 0.8	855	1 351	-0.97
10GW250-13	532	0.038 769	0.001 117	$0.282\,695 \pm 0.000\,024$	-2.7	8.6 ± 0.8	792	1 118	-0.97
10GW250-14	461	0.037 698	0.001 162	$0.282\,730 \pm 0.000\,026$	-1.5	8.3 ± 0.9	742	1 094	-0.96
10GW250-15	532	0.026 160	0.000 795	$0.282\,591 \pm 0.000\,024$	-6.4	5.1 ± 0.8	931	1 438	-0.98
10GW250-16	461	0.035 373	0.001 116	$0.282\,664 \pm 0.000\,020$	-3.8	6.0 ± 0.7	836	1 305	-0.97
10GW250-17	461	0.021 312	0.000 814	$0.282\,726 \pm 0.000\,030$	-1.6	8.3 ± 1.1	741	1 098	-0.98
10GW250-18	461	0.020 966	0.000 620	$0.282\,311 \pm 0.000\,023$	-16.3	-6.3 ± 0.8	1 315	2 411	-0.98
10GW250-19	260	0.009 629	0.000 247	$0.282\,830 \pm 0.000\,013$	2.1	7.7 ± 0.5	587	1 013	-0.99
10GW250-20	461	0.033 355	0.000 922	$0.282\,684 \pm 0.000\,021$	-3.1	6.8 ± 0.7	804	1 237	-0.97
10GW250-21	260	0.041 081	0.001 565	$0.282\,769 \pm 0.000\,026$	-0.1	5.4 ± 0.7	695	1 228	-0.95
10GW250-22	260	0.029 779	0.000 825	$0.282\,710 \pm 0.000\,019$	-2.2	3.4 ± 0.7	764	1 404	-0.98
10GW250-23	461	0.024 795	0.000 799	$0.282\,706 \pm 0.000\,019$	-2.3	7.6 ± 0.7	769	1 162	-0.98
10GW250-24	461	0.038 482	0.000 958	$0.282\,727 \pm 0.000\,021$	-1.6	8.2 ± 0.7	743	1 099	-0.97
11GW041-01	261	0.062 064	0.002 456	$0.282\,648 \pm 0.000\,030$	-4.4	0.9 ± 1.1	889	1 225	-0.93
11GW041-02	261	0.095 817	0.003 528	$0.282\,641 \pm 0.000\,030$	-4.6	0.5 ± 1.1	927	1 253	-0.89
11GW041-03	261	0.048 808	0.001 801	$0.282\,715 \pm 0.000\,026$	-2.0	3.4 ± 0.9	777	1 067	-0.95
11GW041-04	261	0.053 823	0.002 039	$0.282\,766 \pm 0.000\,028$	-0.2	5.2 ± 1.0	709	956	-0.94
11GW041-05	261	0.032 390	0.001 233	$0.282\,503 \pm 0.000\,027$	-9.5	-4.0 ± 1.0	1 066	1 537	-0.96
11GW041-06	261	0.023 860	0.000 950	$0.282\,709 \pm 0.000\,024$	-2.2	3.4 ± 0.8	768	1 071	-0.97
11GW041-07	261	0.068 840	0.002 559	$0.282\,693 \pm 0.000\,027$	-2.8	2.5 ± 0.9	825	1 124	-0.92
11GW041-08	261	0.068 015	0.002 633	$0.282\,629 \pm 0.000\,035$	-5.0	0.2 ± 1.2	922	1 269	-0.92
11GW041-09	261	0.062 659	0.002 313	$0.282\,690 \pm 0.000\,022$	-2.9	2.4 ± 0.8	826	1 131	-0.93
11GW041-10	261	0.067 487	0.002 546	$0.282\,726 \pm 0.000\,029$	-1.6	3.7 ± 1.0	778	1 052	-0.92
11GW041-11	261	0.065 829	0.002 599	$0.282\,771 \pm 0.000\,034$	0.0	5.3 ± 1.2	712	951	-0.92
11GW041-12	261	0.070 105	0.002 575	$0.282\,749 \pm 0.000\,032$	-0.8	4.5 ± 1.1	744	999	-0.92
11GW041-13	261	0.037 600	0.001 514	$0.282\,765 \pm 0.000\,029$	-0.2	5.3 ± 1.0	699	951	-0.95
11GW041-14	261	0.023 191	0.000 903	$0.282\,710 \pm 0.000\,029$	-2.2	3.4 ± 1.0	765	1 068	-0.97
11GW041-15	261	0.066 111	0.002 356	$0.282\,597 \pm 0.000\,029$	-6.2	-0.8 ± 1.0	962	1 339	-0.93

注:分析点编号以 10GW250 开头的分析点为花岗闪长岩;分析点编号以 11GW041 开头的分析点为二长花岗岩;误差类型为 2σ ; $\epsilon_{\text{Hf}} = [(N(^{167}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf}))_i / (N(^{167}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf}))_{\text{CHUR}} - 1] \times 10^4$, 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为年龄 t 对应的 ϵ_{Hf} 值; $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 为现今 ϵ_{Hf} 值; $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为富集系数。

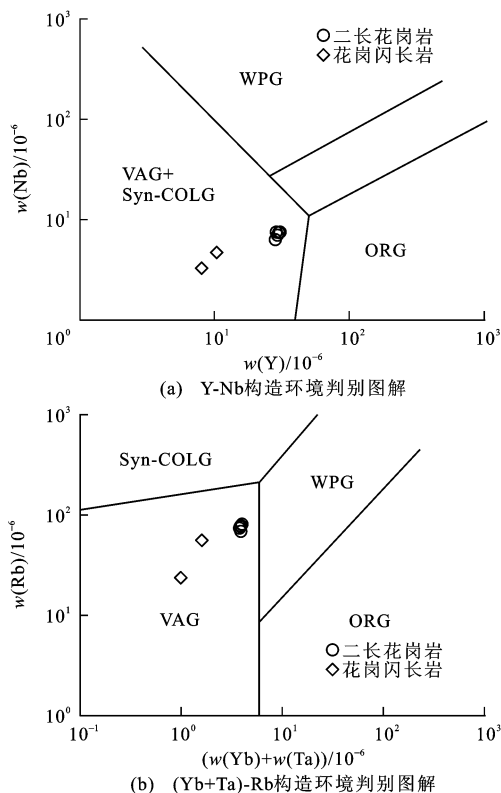
图7 花岗质岩石的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解Fig. 7 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t for the Zircons of Granite Rocks

陆边缘型钙碱性花岗岩的属性相一致^[58-59]。其次,由弱到强的Eu负异常[图6(a)]表明斜长石在源区残留相中停留或在岩浆演化过程中分离结晶;最后,相对高的Yb、Y含量排除了残留相中有石榴子石的可能,表明其起源于低压下地壳年轻物质的部分熔融^[60-61]。上述地球化学特征表明,这些花岗质岩石起源于岛弧型地壳物质的部分熔融。

4.3 地质意义

锦山花岗杂岩体的岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩,属于准铝质—弱过铝质的低钾—中钾钙碱性I型花岗岩(图5)。它们具有较高的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值和 $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$ 值,富集大离子亲石元素(如Rb、Ba、K)和亏损高场强元素(如Nb、Ta、P、Zr、Ti、Hf),表明二叠纪锦山花岗杂岩体形成于活动大陆边缘的构造背景^[62]。同时,Nb、Ta的亏损暗示了岩浆不可能直接由软流圈部分熔融产生,而应该来自地壳或壳幔混染,可能与俯冲作用有关^[63-64]。根据Pearce等的构造环境判别图^[64](图8),所有样品显示了火山弧花岗岩(VAG)的特征,因此,可以认为造成佳木斯地块东部二叠纪花岗岩类的动力和热力来源可能与古大洋板块的俯冲作用有关。

吴福元等研究表明,佳木斯地块东部除了发育有大量与板块俯冲活动有关的钙碱性花岗岩外^[9,30,35,48-49],在其东缘及东南缘的宝清—密山地区发育一套同期具有活动大陆边缘构造属性的钙碱性玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩组合^[33]。另外,兴凯地块二叠纪花岗质岩石(年龄为257~287 Ma)和流纹岩((264±7) Ma)的发现同时反映了兴凯地块亦存在该期岩浆活动^[30,35,50]。这些二叠纪岩石(年龄为254~293 Ma)呈近NNE向带状展布[图1(b)],暗示佳木斯地块东部二叠纪期间处于活动大陆边缘的构造背景,当时应该存在一个自东向



ORG 为大洋脊花岗岩;WPG 为板内花岗岩;VAG 为火山弧花岗岩;Syn-COLG 为同碰撞花岗岩

图8 花岗质岩石的Y-Nb和(Yb+Ta)-Rb构造环境判别图解

Fig. 8 Y-Nb and (Yb+Ta)-Rb Discriminations Diagrams of Tectonic Environment for Granite Rocks

西俯冲的大洋板块^[33]。

上述结果得到了两方面的支持:首先,在佳木斯地块西侧松嫩—张广才岭地块的小兴安岭和张广才岭地区分别发育一套伸展背景下的早二叠世A型花岗岩^[11,65]和双峰式玄武岩—玄武质安山岩—英安岩—流纹岩组合^[66],其形成于佳木斯地块东侧古大洋板块的西向俯冲作用导致该地区产生类似弧后盆地的伸展环境^[66];其次,在佳木斯地块和那丹哈达地体之间存在一套辉石岩—辉长岩—蛇纹岩组成的岩套,以及具有洋脊玄武岩(MORB型)属性的绿片岩相变质岩被发现^[67]。因此,可以认为在佳木斯地块东缘曾发生过一次晚古生代古大洋板块的俯冲增生事件。综上所述,本文认为佳木斯—兴凯地块东部二叠纪期间应处于活动大陆边缘的构造背景,其形成可能与佳木斯地块东侧古大洋板块的西向俯冲作用有关。

5 结 语

(1) 锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果表明,锦山

花岗杂岩体形成于早—中二叠世岩浆(年龄为 260~278 Ma)的多次侵入。结合前人确定的二叠纪岩浆活动的空间分布,判定佳木斯地块存在该期构造-岩浆热事件。

(2) 锦山二叠纪花岗质岩石属于准铝质—弱过铝质的低钾—中钾钙碱性 I 型花岗岩,其原始岩浆起源于中—新元古代增生的下地壳物质的部分熔融。

(3) 佳木斯—兴凯地块东部二叠纪期间应处于活动大陆边缘的构造背景,其形成可能与佳木斯地块东侧古大洋板块的西向俯冲作用有关。

参 考 文 献 :

References :

- [1] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotopic Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23(2): 82-92.
- [2] WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, et al. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 89-113.
- [3] SENGOR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [4] 邵济安, 唐克东, 王成源, 等. 那丹哈达地体的构造特征及演化 [J]. *中国科学: B 辑*, 1991(7): 744-751.
SHAO Ji-an, TANG Ke-dong, WANG Cheng-yuan, et al. The Tectonic Characteristics and Evolution of Nadanhada Terrane [J]. *Science in China: Series B*, 1991(7): 744-751.
- [5] 李双林, 欧阳自远. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(3): 45-54.
LI Shuang-lin, OUYANG Zi-yuan. Tectonic Framework and Evolution of Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt(XMOB) and Its Adjacent Region [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1998, 18(3): 45-54.
- [6] 吴福元, 叶 茂, 张世红. 中国满洲里—绥芬河地学断面域的地球动力学模型 [J]. *地球科学*, 1995, 20(5): 535-539.
WU Fu-yuan, YE Mao, ZHANG Shi-hong. Geodynamic Model of the Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect [J]. *Earth Science*, 1995, 20(5): 535-539.
- [7] WILDE S A, 吴福元, 张兴洲. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义 [J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 35-50.
WILDE S A, WU Fu-yuan, ZHANG Xing-zhou. The Mashan Complex: SHRIMP U-Pb Zircon Evidence for a Late Pan-African Metamorphic Event in NE China and Its Implication for Global Continental Reconstructions [J]. *Geochimica*, 2001, 30(1): 35-50.
- [8] WILDE S A, WU F Y, ZHANG X Z. Late Pan-African Magmatism in Northeastern China: SHRIMP U-Pb Zircon Evidence from Granitoids in the Jiamusi Massif [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/2/3/4): 311-327.
- [9] 吴福元, WILDE S A, 孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 443-452.
WU Fu-yuan, WILDE S A, SUN De-you. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of Gneissic Granites in Jiamusi Massif, Northeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 443-452.
- [10] 吴福元, 孙德有, 林 强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 181-189.
WU Fu-yuan, SUN De-you, LIN Qiang. Petrogenesis of the Phanerozoic Granites and Crustal Growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 181-189.
- [11] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山—贺根山—扎赉特碰撞拼合带东延的关系 [J]. *科学通报*, 2000, 45(20): 2217-2222.
SUN De-you, WU Fu-yuan, LI Hui-min, et al. Emplacement Age of the Post-orogenic A-type Granites in Northwestern Lesser Xing'an Ranges, and Its Relationship to the Eastward Extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaithe Collisional Suture Zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(20): 2217-2222.
- [12] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2004, 34(2): 174-181.
SUN De-you, WU Fu-yuan, ZHANG Yan-bin, et al. The Final Closing Time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji Plate Suture Zone [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(2): 174-181.
- [13] BI J H, GE W C, YANG H, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Early Paleozoic Granitic Magmatism in the Jiamusi Massif, NE China: Geochronological, Geochemical and Hf Isotopic Evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 308-331.

- [14] 葛文春,吴福元,周长勇,等. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. 科学通报,2005,50(12):1239-1247.
GE Wen-chun, WU Fu-yuan, ZHOU Chang-yong, et al. Emplacement Age of the Tahe Granite and Its Constraints on the Tectonic Nature of the Erguna Block in the Northern Part of the Da Xing'an Range [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (12): 1239-1247.
- [15] 葛文春,隋振民,吴福元,等. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报,2007,23(2):423-440.
GE Wen-chun, SUI Zhen-min, WU Fu-yuan, et al. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Characteristics and Their Implications of the Early Paleozoic Granites in the Northwestern Da Hinggan Mts., Northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 423-440.
- [16] JAHN B M, CAPDEVILA R, LIU D Y, et al. Sources of Phanerozoic Granitoids in the Transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd Isotopic Evidence, and Implications for Phanerozoic Crustal Growth[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 629-653.
- [17] 张彦龙,葛文春,高妍,等. 龙镇地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1059-1073.
ZHANG Yan-long, GE Wen-chun, GAO Yan, et al. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of Granites in Longzhen Area and Their Geological Implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1059-1073.
- [18] 张彦龙,葛文春,柳小明,等. 大兴安岭新林镇岩体的同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(2):177-186.
ZHANG Yan-long, GE Wen-chun, LIU Xiao-ming, et al. Isotopic Characteristics and Its Significance of the Xinlin Town Pluton, Great Hinggan Mountains [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(2): 177-186.
- [19] WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, et al. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 89-113.
- [20] 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(1/2): 143-173.
- [21] WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, et al. Highly Fractionated I-type Granites in NE China II: Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic[J]. Lithos, 2003, 67(3/4): 191-204.
- [22] 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): 1-30.
- [23] WILDE S A, DORSETT-BAIN H L, LENNON R G. Geological Setting and Controls on the Development of Graphite, Sillimanite and Phosphate Mineralization Within the Jiamusi Massif: An Exotic Fragment of Gondwanaland Located in Northeastern China? [J]. Gondwana Research, 1999, 2(1): 21-46.
- [24] WILDE S A, WU F Y, ZHAO G C. The Khanka Block, NE China, and Its Significance for the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt and Continental Accretion[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2010, 338: 117-137.
- [25] ZHOU J B, WILDE S A, ZHAO G C, et al. Pan-African Metamorphic and Magmatic Rocks of the Khanka Massif, NE China: Further Evidence Regarding Their Affinity[J]. Geological Magazine, 2010, 147(5): 737-749.
- [26] ZHOU J B, WILDE S A, ZHAO G C, et al. Was the Easternmost Segment of the Central Asian Orogenic Belt Derived from Gondwana or Siberia: An Intriguing Dilemma? [J]. Journal of Geodynamics, 2010, 50(3/4): 300-317.
- [27] 周建波,张兴洲, WILDE S A, 等. 中国东北~500 Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1235-1245.
ZHOU Jian-bo, ZHANG Xing-zhou, WILDE S A, et al. Confirming of the Heilongjiang ~500 Ma Pan-African Khondalite Belt and Its Tectonic Implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1235-1245.
- [28] 任留东,王彦斌,杨崇辉,等. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗质岩浆活动[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2005-2014.
REN Liu-dong, WANG Yan-bin, YANG Chong-hui, et al. Metamorphism, Migmatization and Granites of the Mashan Complex in Heilongjiang Province, Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 2005-2014.
- [29] 任留东,王彦斌,杨崇辉,等. 麻山杂岩的两种变质作用及其与花岗岩的关系[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2855-2865.
REN Liu-dong, WANG Yan-bin, YANG Chong-hui, et al. Two Types of Metamorphism and Their Relationships with Granites in the Mashan Complex[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9): 2855-2865.

- [30] 杨 浩,张彦龙,陈会军,等. 兴凯湖花岗杂岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 2012, 31(4): 621-630.
- YANG Hao, ZHANG Yan-long, CHEN Hui-jun, et al. Zircon U-Pb Ages of Khanka Lake Granitic Complex and Its Geological Implication[J]. Global Geology, 2012, 31(4): 621-630.
- [31] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [32] WILDE S A, ZHANG X Z, WU F Y. Extension of a Newly-identified 500 Ma Metamorphic Terrane in Northeast China: Further U-Pb SHRIMP Dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China [J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 115-130.
- [33] MENG E, XU W L, YANG D B, et al. Permian Volcanisms in Eastern and Southeastern Margins of the Jiamusi Massif, Northeastern China: Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Its Tectonic Implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(8): 1231-1245.
- [34] 邵济安,唐克东. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化[M]. 北京:地震出版社, 1995.
- SHAO Ji-an, TANG Ke-dong. Terranes in Northeast China and Evolution of Northeast Asia Continental Margin[M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [35] YANG H, GE W C, ZHAO G C, et al. Early Permian-Late Triassic Granitic Magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, Eastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt and Its Implications[J]. Gondwana Research, 2014, DOI: 10. 1016/j. gr. 2014. 01. 011.
- [36] WU F Y, YANG J H, LO C H, et al. The Heilongjiang Group: A Jurassic Accretionary Complex in the Jiamusi Massif at the Western Pacific Margin of Northeastern China[J]. Island Arc, 2007, 16(1): 156-172.
- [37] 袁洪林,吴福元,高山,等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- YUAN Hong-lin, WU Fu-yuan, GAO Shan, et al. Determination of U-Pb Age and Rare Earth Element of Zircons of Cenozoic Intrusion in NE China by Laser-ablation Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [38] ANDERSEN T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [39] WU F Y, YANG Y H, XIE L W, et al. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology[J]. Chemical Geology, 2006, 234(1/2): 105-126.
- [40] GOOLAERTS A, MATTIELLI N, JONG J D, et al. Hf and Lu Isotopic Reference Values for the Zircon Standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. Chemical Geology, 2004, 206(1/2): 1-9.
- [41] WOODHEAD J, HERGT J, SHELLEY M, et al. Zircon Hf-isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation[J]. Chemical Geology, 2004, 209(1/2): 121-135.
- [42] BLICHERT-TOFT J, ALBAREDE F. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-crust System[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(1/2): 243-258.
- [43] RUDNICK R L, GAO S, LING W L, et al. Petrology and Geochemistry of Spinel Peridotite Xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton[J]. Lithos, 2004, 77(1/2/3/4): 609-637.
- [44] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [45] 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.
- [46] BOYNTON W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [M] // HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [47] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [48] 黄映聪,任东辉,张兴洲,等. 黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2008, 38(4): 631-638.
- HUANG Ying-cong, REN Dong-hui, ZHANG Xing-zhou, et al. Zircon U-Pb Dating of the Meizuo Granite and Geological Significance in the Huanan Uplift, East Heilongjiang Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(4): 631-638.
- [49] 于介江,侯雪刚,葛文春,等. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 2971-2986.
- YU Jie-jiang, HOU Xue-gang, GE Wen-chun, et al.

- Magma Mixing Genesis of the Early Permian Liulian Pluton at the Northeastern Margin of the Jiamusi Massif in NE China: Evidences from Petrography, Geochronology and Geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 2971-2986.
- [50] MENG E, XU W L, PEI F P, et al. Detrital-zircon Geochronology of Late Paleozoic Sedimentary Rocks in Eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonophysics*, 2010, 485(1/2/3/4): 42-51.
- [51] HAN B F, WANG S G, JAHN B M, et al. Depleted-mantle Source for the Ulungur River A-type Granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr Isotopic Evidence, and Implications for Phanerozoic Crustal Growth[J]. *Chemical Geology*, 1997, 138(3/4): 135-159.
- [52] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and Continental Growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 2000, 91(1/2): 181-193.
- [53] HOFMANN A W. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship Between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3): 297-314.
- [54] RAPP R P, WATSON E B, MILLER C F. Partial Melting of Amphibolite/Eclogite and the Origin of Archean Trondhjemites and Tonalites[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51(1/2/3/4): 1-25.
- [55] SPRINGER W, SECK H A. Partial Fusion of Basic Granulites at 5 to 15 kbar: Implications for the Origin of TTG Magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 127(1/2): 30-45.
- [56] LITVINOVSKY B A, STEELE I M, WICKHAM S M. Silicic Magma Formation in Overthickened Crust: Melting of Charnockite and Leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(5): 717-737.
- [57] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- [58] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. 1984, 25(4): 956-983.
- [59] MCCULLOCH M T, GAMBLE J A. Geochemical and Geodynamical Constraints on Subduction Zone Magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102(3/4): 358-374.
- [60] DOUCE A E P, BEARD J S. Dehydration-melting of Biotite Gneiss and Quartz Amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(3): 707-738.
- [61] SKJERLIE K P, DOUCE A E P. The Fluid-absent Partial Melting of a Zoisite-bearing Quartz Eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: Implications for Melting in Thickened Continental Crust and for Subduction-zone Processes[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(2): 291-314.
- [62] GROVE T L, ELKINS-TANTON L T, PARMAN S W, et al. Fractional Crystallization and Mantle-melting Controls on Calc-alkaline Differentiation Trends[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145(5): 515-533.
- [63] FOLEY S. Petrological Characterization of the Source Components of Potassic Magmas: Geochemical and Experimental Constraints[J]. *Lithos*, 1992, 28(3/4/5/6): 187-204.
- [64] DUNGAN M A, LINDSTROM M M, MCMILLAN N J, et al. Open System Magmatic Evolution of the Taos Plateau Volcanic Field, Northern New Mexico: 1. The Petrology and Geochemistry of the Servilleta Basalt[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B6): 5999-6028.
- [65] 郭奎城, 张文龙, 杨晓平, 等. 黑河市五道沟地区早二叠世 A 型花岗岩成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(4): 1077-1083.
- GUO Kui-cheng, ZHANG Wen-long, YANG Xiao-ping, et al. Origin of Early Permian A-type Granite in the Wudaogou Area, Heihe City[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(4): 1077-1083.
- [66] MENG E, XU W L, PEI F P, et al. Permian Bimodal Volcanism in the Zhangguangcai Range of Eastern Heilongjiang Province, NE China: Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Geochemical Evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(2): 119-132.
- [67] 张魁武, 邵济安, 唐克东, 等. 黑龙江省东部跃进山群中绿片岩的地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 1997, 13(2): 168-172.
- ZHANG Kui-wu, SHAO Ji-an, TANG Ke-dong, et al. The Geochemical Characteristics and the Geological Significance of Green-schists in Yuejinshan Group, East Heilongjiang Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(2): 168-172.