

兴蒙造山带东段大陆弧后 A 型花岗岩特征与成因

张 磊¹ 吕新彪^{1,2} 刘 阁¹ 陈 俊¹ 陈 超¹ 高 奇¹ 刘 洪¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:兴蒙造山带贺根山—黑河一线产出有大量晚古生代 A 型花岗岩, 其成因及形成环境一直存在争议。贺根山—黑河 A 型花岗岩带形成于晚石炭世—二叠纪(325~260Ma), 二叠纪进入岩浆作用高峰期。该花岗岩带主要表现为准铝质—弱过铝质(A/CNK=0.89~1.13)高钾钙碱性系列; 高度富集 LREE, Eu 负异常明显; 微量元素表现为富集 Th、Pb 和 La 元素, 亏损 Ba、Sr、Ce、P 和 Ti 元素。研究表明晚石炭世—二叠纪古亚洲洋正处于向西伯利亚板块俯冲阶段, 贺根山—黑河 A 型花岗岩带应该形成于该俯冲带的弧后伸展环境。俯冲导致的软流圈上涌形成弧后的伸展环境, 同时为大规模高温岩浆形成提供了热源, 以及部分物源, 这种壳—幔混合岩浆在深部结晶分异后沿弧后伸展断裂体系快速侵位是该花岗岩带形成的原因。

关键词:兴蒙造山带; A 型花岗岩; 岩石地球化学; 大陆弧后伸展

中图分类号: P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)03-0869-16

A 型花岗岩最初定义为碱性(alkaline)、贫水(anhydrous)以及形成于非造山(annrogenic)环境^[1]。Eby^[2]和洪大卫等^[3]随后提出将 A 型花岗岩进一步细分为 A1 型和 A2 型两个亚类, A1 型以似长石正长岩为主, 其形成于陆内裂谷、地幔热柱有关; A2 型以碱长花岗岩和铝质 A 型花岗岩为主, 主要产出于大陆边缘伸展或陆内剪切相关的伸展环境。对于 A2 型花岗岩, Eby 选择的样品代表经历过陆—陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳物质部分熔融的产物, 而且认为仅凭微量元素不能排除岩浆来自下地幔的可能^[2], 由此把 A2 型花岗岩划定为仅形成于造山后则偏离了原文意思^[4]。进一步的研究也表明, A 型花岗岩可以形成于从陆内到大陆边缘的各种动力学背景^[5]。与传统的 A 型花岗岩形成于板内或

造山后环境的认识相比, 中国东南沿海地区 A 型花岗岩^[6]、扬子板块西缘石棉县 A 型花岗岩^[8]以及土耳其东北部 Pontides 地区 A 型花岗岩^[9]都被认为形成于活动大陆边缘弧后伸展环境, 与俯冲洋壳有关。

中国北疆从西部准噶尔经内蒙古一直到东北地区存在一条近东西走向的巨大 A 型花岗岩带^[3], 贺根山—嫩江—黑河一线 A 型花岗岩即属于该 A 型花岗岩带的东段部分。20 世纪 80 年代就有学者研究认为该花岗岩带东段部分形成于晚石炭世至晚二叠世, 且东段花岗岩形成时间晚于西段部分, 而该 A 型花岗岩既不是非造山花岗岩, 也不是裂谷型花岗岩, 而是与碰撞作用有关的花岗岩^[10]。由于该花岗岩带沿西伯利亚板块与华北板块的缝合带产出, 此后学者

收稿日期: 2012-07-05; 改回日期: 2012-09-24

基金项目: 内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔族自治旗拉抛等八幅 1:5 万区域矿产地质调查项目(NMKD2010-3)资助。

作者简介: 张磊, 男, 1986 年生, 硕士生, 矿产普查与勘探专业; E-mail: js-zhanglei@163.com。

通讯作者: 吕新彪, 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探研究; E-mail: luxb@cug.edu.cn。

的研究多集中于该 A 型花岗岩的成岩年代 (290~260 Ma)^[11-14]、花岗岩类型(A2 型)^[11-15]、花岗岩岩浆成因(下地壳部分熔融^[12];壳-幔混合^[17];壳源物质为主,有地幔物质的加入^[16];年轻地壳为主^[17])、形成构造环境(俯冲碰撞^[10]、造山后^[11-16]、后碰撞俯冲板片拆沉^[17])等方面。正是大部分学者判定其属于造山后环境的 A2 型花岗岩,由此推断西伯利亚板块与华北板块拼合于该花岗岩带(290~260 Ma)形成之前^[10-13],但也有部分认为其形成与俯冲板片的拆沉有关^[14,17]。然而,花岗岩的地球化学成分与构造背景并不是直接相关,构造背景可能只制约了 A 型花岗岩岩浆的某些方面,判别其形成的构造环境应该综合多方面的地质特征^[18]。本文通过研究嫩江县北部拉抛花岗岩,并结合前人对该花岗岩带东段贺根山—黑河部分的研究成果认为,贺根山—黑河 A2 型花岗岩带形成于活动大陆边缘弧后伸展环境,这对进一步认识 A2 型花岗岩的产出构造环境及古亚洲洋的演化有重要意义。

1 区域地质背景

大兴安岭及其邻区属于兴蒙造山带^[19]的东段,该地区晚古生代至早中生代主要受古亚洲洋构造域

控制,中生代进入古太平洋构造域演化阶段^[20]。区域上由北向南可以划分为:额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块和佳木斯地块四大构造单元。额尔古纳地块与兴安地块 490 Ma 之前拼合于塔源—喜桂图一线^[21];兴安地块与松嫩地块拼合于贺根山—嫩江—黑河一线,其拼合性质与时间争议较大;松嫩地块与佳木斯地块侏罗纪拼合于伊通—佳木斯一线^[22](图 1)。本文研究的区域即位于兴安地块与松嫩地块的拼合带上,所研究岩体被嫩江—白城断裂切割。

研究区及其周围发现有大量晚古生代花岗岩,总体呈北东向展布,其围岩大致可分为古生代和中生代两套地层,古生代地层主要为上石炭统—下二叠统宝力高庙组(C₂-P_{1bl})流纹岩、安山岩等,为一套陆相火山岩;中生代地层主要为下白垩统光华组(K_{1gn})中基性火山岩与古近纪—新近纪孙吴组(E₃-N_{2s})沉积砂岩^①。嫩江至黑河一带发育了大面积二叠纪(290~260 Ma)碱长—正长花岗岩^[13],本文研究的拉抛岩体及其向东北部延伸部分在岩性、侵位地层等方面与前者非常相似,故被前人划为同期 A 型花岗岩。上述嫩江—黑河一线花岗岩,以及包括向西延伸至贺根山、二连浩特一带均属于中国北疆巨型 A 型花岗岩带的东段部分。

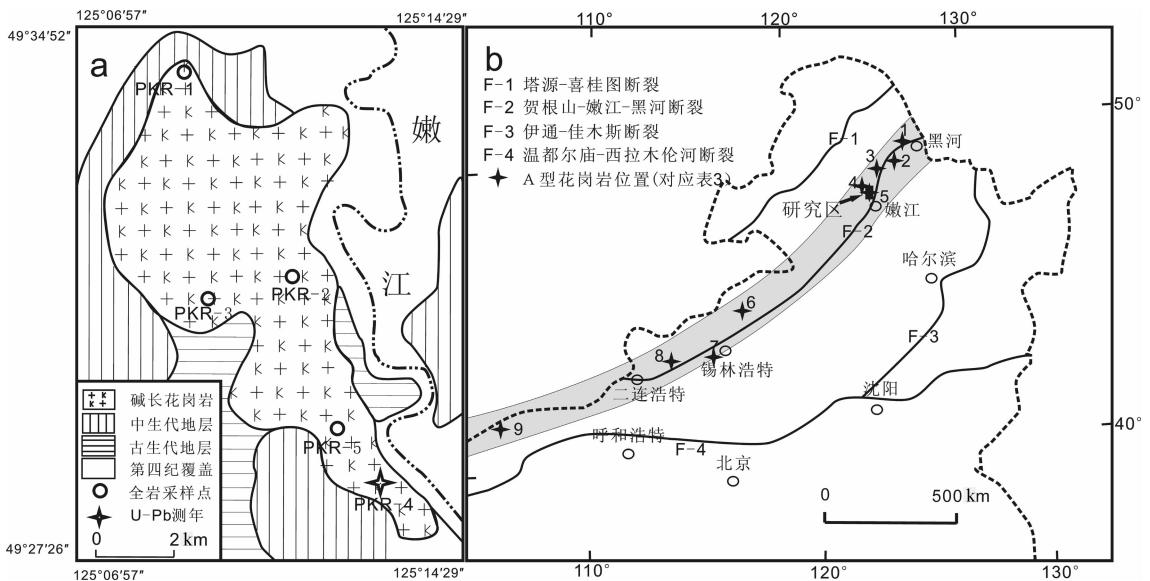


图 1 拉抛岩体地质简图(a)与兴蒙造山带 A 型花岗岩分布图(b)

Fig.1 Simplified geological map of Lapao granite (a) and distribution of A-type granites in the Xingmeng orogenic belt (b)

① 黑龙江地质矿产局. 中华人民共和国 1:200000 区域地质调查报告霍龙门幅(M-51-X XIV),1977.

2 样品及其岩相学特征

研究区位于嫩江县以北约 30 km,属于内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔汗自治旗红彦镇拉抛林场范围内(图 1)。拉抛岩体面积约 45 km²,本次共采 5 个样品进行化学分析,其中 1 个同时进行年代学分析,样品均匀分布整个岩体(图 1-a)。

拉抛岩体主要为碱长花岗岩,岩体中有少量闪长玢岩脉。碱长花岗岩多为灰白色、肉红色,中粗粒结构,块状构造,南部岩体边缘发现有中细粒文象结构。其中碱性长石主要为条纹长石(55%~65%),粒度 2~10 mm,半自形-自形粒状、块状及条带状,偶见卡氏双晶,条纹呈网脉状、密集枝状;石英为他形-半自形粒状,部分以细粒脉状产于条纹长石与斜长石接触边界,波状消光,含量 20%~30%;斜长石多为半自形板状,部分边缘被钾长石交代,见聚片双晶,轻度绢云母化,含量 5%~10%;黑云母呈褐色-褐黄色,鳞片状,产于长石、石英之间,含量 0~5%,粒度 0.5~1mm。副矿物有锆石、磷灰石及不透明矿物等。

3 分析方法

3.1 锆石测年分析

锆石按常规重力和磁选方法分选,由河北省区域地质矿产调查研究所完成。分选后的锆石在双目镜下主要挑选完整、透明度高、无裂隙、长宽比 1.5~3、体型较大且具有代表性的锆石,将其整齐的置于环氧树脂中,磨至大部分锆石一半处截面。制靶后先进行反射光、透射光显微照相,选择其中无裂隙、无包裹体的锆石再进行阴极发光(CL)显微照相。阴极发光显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)JEOL-JXA-8100 电子探针上完成。

锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)仪器分析完成。具体分析为 MicroLas 公司的 Geolas2005 准分子激光剥蚀系统和美国 Agilent 公司的 Agilent7700 型 ICP-MS 仪器。剥蚀过程以 He 气为载气,束斑直径 32 μm,激光脉冲为 6 Hz,能量为 50 mJ,以国际标准锆石 91500 作为外标标样,元素含量用 NIST610 为外标,²⁹Si 为内标元素。样品每隔 5 个点做两个点

标准锆石 91500 测定,以降低每次测定条件之间的偏差。实验原始数据采用 ICPMSDataCal 软件进行处理^[23],U-Pb 年龄谐和图和年龄加权平均值计算采用 Isoplot 3.0 完成^[24]。详细操作流程及数据处理方法见文献[23]。

3.2 主量、微量元素分析

岩石样品送至澳实分析检测集团-澳实矿物实验室(广州)测试分析,主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用荧光光谱仪(XRF)测试分析,检出 14 种氧化物。微量元素由美国 Varian 生产的 ICP735-ES 仪器分析,分析方法为岩石样品四酸消解后利用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)测定多元素含量,共检出 33 种元素。稀土元素分析为碱熔法,即将岩石样品加入到 LiBO₂ 熔剂中,混合均匀,在 1000°C 以上的熔炉中熔化,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测 31 种元素,检测仪器为美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan 9000。

4 锆石 U-Pb 测年结果

拉抛碱长花岗岩测年样品(PKR-4)采样点位于 49°28'34.676"N, 125°13'6.771"E(图 1-a)。锆石双目镜下透明度较高,总体呈淡黄色、淡褐色,晶型为四方柱与四方双锥,宽度 40~100 μm,长度 50~200 μm,振荡环带明显,相对宽缓的生长环带表明锆石结晶温度较高。根据锆石的组成特征将其分为两类;A 类为从核部至边缘发育有一致的振荡环带,表明其为同期成因的岩浆锆石,其年龄数据即可代表花岗岩的结晶年龄;B 类为核部具有继承锆石的捕虏核,核部继承锆石无明显环带,边部发生磨圆或溶蚀,已不具有原锆石的晶形,其年龄代表捕获或继承锆石的年龄。

样品共设计测点 20 个,实际测定 18 个,其中 A 类岩浆锆石 15 个,B 类继承锆石 3 个。A 类锆石的 Th/U 值介于 0.25~1.18,仅两个值小于 0.4,结合其较高的 ΣREE 含量,平均 4550×10⁻⁶,显示其属于岩浆成因^[25]。15 个 A 类岩浆锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于(314±4)Ma~(333±4)Ma,其中 11 个测点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在(320±4)Ma~(327±4)Ma,15 个谐和图上成其附近,其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(325±3)Ma(MSWD=2,n=15)(图 3),代表了碱长花岗岩的结晶年龄。B 类继承锆石的 Th/U 值为 0.35~0.65,总体略低于 A 类锆石,ΣREE 平均含量为 3385×10⁻⁶,



图2 拉抛碱长花岗岩锆石 CL 图像

Fig.2 CL images of zircon from Lapao alkaline granite

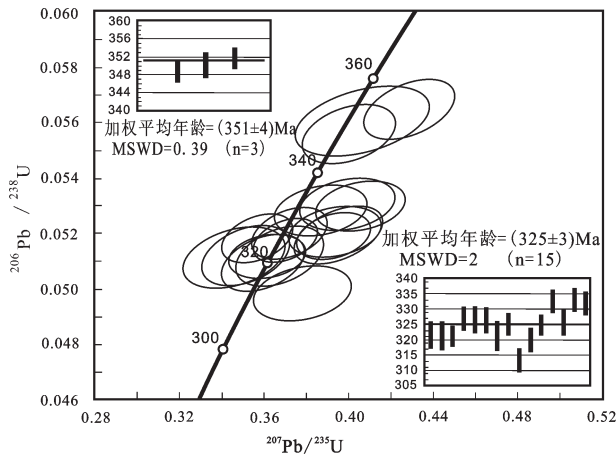


图3 拉抛碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 U-Pb concordia diagram of zircon from Lapao alkaline granite

低于 A 类锆石。3 个 B 类岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(348\pm 4)\text{Ma}$ ~ $(354\pm 4)\text{Ma}$, 且均在谐和曲线上及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(351\pm 4)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.39$)。宝力高庙组中酸性火山岩为拉抛碱长花岗岩的主要围岩之一, 该火山岩的成岩年龄为 $(353\pm 2)\text{Ma}$ ~ $(352\pm 3)\text{Ma}$ ^[20], 与本文继承锆石的年龄在误差范围内一致, 推测本地区深部可能存在与宝力高庙组火山岩同期的侵入岩, 更深部的高温岩浆上

侵重熔了前期岩基, 并捕获了其中的锆石。

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素特征

拉抛碱长花岗岩 SiO_2 含量为 71.99%~78.75%, 平均 76.12%; Al_2O_3 含量为 11.85%~14.32%, 平均 12.75%; MgO 含量为 0.1%~0.54%, 平均 0.20%; CaO 含量 0.01%~0.88%, 平均 0.31%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量 8.11%~8.66%, 平均 8.33%; K_2O 含量略高于 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.03~1.25, 平均 1.16, 显示该花岗岩体相对富钾。里特曼指数 (σ) 为 1.84~2.32, 均小于 3.3, 为钙碱性岩石, 铝饱和指数 (ASI) A/CNK 为 1.02~1.12, 在 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图中显示为过铝质特点。

经统计, 贺根山—嫩江—黑河一线晚石炭世至二叠纪花岗岩(表 3) SiO_2 含量为 73.62%~79.71%, 平均 76.34%; Al_2O_3 平均含量为 12.4%, MgO 平均含量为 0.15%, CaO 为 0.37%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 8.26%; 里特曼指数 (σ) 介于 1.27~3.06, 为钙碱性; 铝饱和指数 (ASI) A/CNK 为 0.89~1.13。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图(图 4-a) 中集中于高钾钙碱性系列区域内, 仅呼伦陶勒盖-2 一个样品落于钙碱性系列范围。在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图(图 4-b) 中, 绝大部分样品表现为弱过铝质, 部分为准铝质, 表明该系列花岗岩介于准铝质-

表 1 拉抛碱长花岗岩锆石 U-Pb 测年数据
Table 1 U-Pb isotopic data of zircon from Lapao alkaline granite

含量/ 10^{-6}			同位素比值 ($\pm 1\sigma$)			年龄 Ma $\pm 1\sigma$		
U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
2127	1107	304	0.0527 \pm 0.0023	0.374 \pm 0.016	0.0512 \pm 0.0007	316 \pm 100	322 \pm 12	322 \pm 4
1219	534	161	0.0495 \pm 0.0027	0.349 \pm 0.018	0.0511 \pm 0.0007	169 \pm 131	304 \pm 14	322 \pm 5
2480	1456	397	0.0517 \pm 0.0019	0.367 \pm 0.014	0.0511 \pm 0.0005	272 \pm 83	317 \pm 10	321 \pm 3
2162	870	301	0.0561 \pm 0.0023	0.403 \pm 0.016	0.0520 \pm 0.0006	457 \pm 89	344 \pm 12	327 \pm 4
2530	1106	367	0.0567 \pm 0.0022	0.404 \pm 0.016	0.0520 \pm 0.0007	480 \pm 87	345 \pm 11	327 \pm 4
2577	1507	440	0.0529 \pm 0.0019	0.379 \pm 0.014	0.0520 \pm 0.0007	324 \pm 112	326 \pm 10	327 \pm 4
1411	833	239	0.0510 \pm 0.0024	0.356 \pm 0.016	0.0511 \pm 0.0008	243 \pm 111	309 \pm 12	321 \pm 5
3489	4141	1024	0.0506 \pm 0.0017	0.362 \pm 0.013	0.0518 \pm 0.0006	220 \pm 78	314 \pm 10	325 \pm 3
3713	1733	559	0.0556 \pm 0.0025	0.385 \pm 0.018	0.0499 \pm 0.0006	435 \pm 100	331 \pm 13	314 \pm 4
2794	1336	414	0.0517 \pm 0.0019	0.363 \pm 0.014	0.0509 \pm 0.0006	333 \pm 82	315 \pm 10	320 \pm 4
4802	1205	467	0.0526 \pm 0.0015	0.377 \pm 0.011	0.0517 \pm 0.0005	322 \pm 60	325 \pm 8	325 \pm 3
1983	960	308	0.0536 \pm 0.0022	0.411 \pm 0.016	0.0555 \pm 0.0007	354 \pm 91	350 \pm 12	348 \pm 4
2757	957	330	0.0568 \pm 0.0021	0.418 \pm 0.015	0.0529 \pm 0.0006	483 \pm 83	354 \pm 11	333 \pm 4
1212	786	236	0.0546 \pm 0.0032	0.418 \pm 0.024	0.0560 \pm 0.0008	394 \pm 133	355 \pm 17	351 \pm 5
3396	2649	660	0.0558 \pm 0.0019	0.402 \pm 0.014	0.0518 \pm 0.0006	456 \pm 78	343 \pm 10	326 \pm 4
1924	1076	314	0.0557 \pm 0.0024	0.409 \pm 0.017	0.0530 \pm 0.0006	439 \pm 96	348 \pm 12	333 \pm 4
2752	975	363	0.0569 \pm 0.0021	0.443 \pm 0.016	0.0564 \pm 0.0007	487 \pm 51	373 \pm 11	354 \pm 4
2874	988	340	0.0541 \pm 0.0022	0.397 \pm 0.016	0.0529 \pm 0.0006	376 \pm 91	339 \pm 11	332 \pm 4

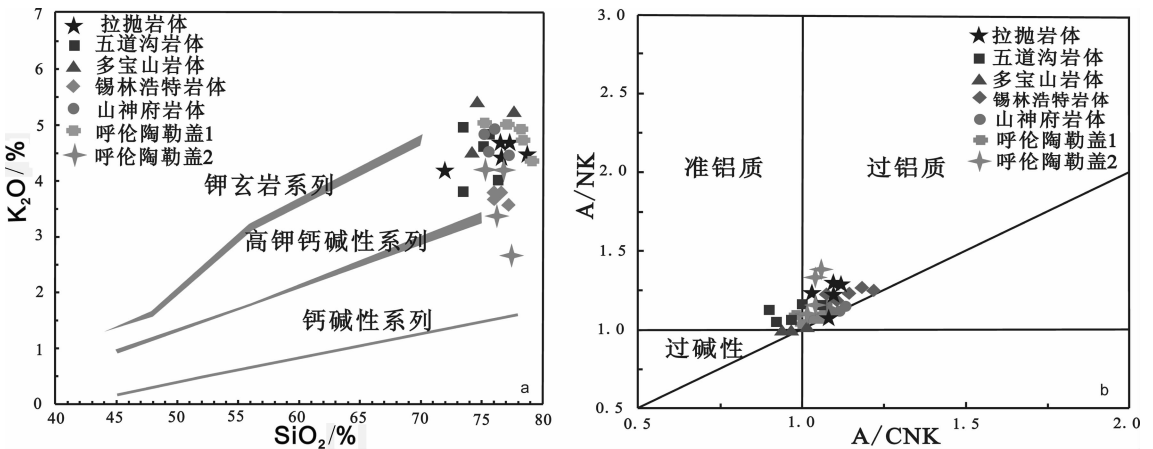


图 4 贺根山-黑河 A 型花岗岩 A/NK-A/CNK、K₂O-SiO₂ 图解

Fig.4 A/NK versus A/CNK and K₂O versus SiO₂ plots for A-type granites from Hegenshan-Heihe belt

弱过铝质之间。对比拉抛岩体、黑河五道沟等 5 处岩体可以发现，贺根山—黑河一线晚石炭世至二叠纪花岗岩主量元素具有高度的一致性，均表现为高硅、高碱、低钙镁，属于准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列，且在 ANCK 与 SiO₂-K₂O 图中，所有样品表现

为集中分布，因此，拉抛碱长花岗岩与该花岗岩带具有相似的主量元素特征。

5.2 稀土元素特征

前人研究认为该地区 A 型花岗岩带形成于二叠纪 (290~260 Ma)^[11,13]。为了进行对比，本文将该地

表 2 拉抛碱长花岗岩主量元素(%)、稀土元素和微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 2 Geochemical analyses of Lapao alkaline granite (major elements: %; rare earth elements and trace elements: 10^{-6})

样品号	PKR-1	PKR-2	PKR-3	PKR-4	PKR-5	样品号	PKR-1	PKR-2	PKR-3	PKR-4	PKR-5
SiO ₂	76.73	76.58	78.75	76.57	71.99	Dy	10.1	9.42	13.95	3.98	3.24
Al ₂ O ₃	12.43	12.2	11.85	12.96	14.32	Ho	2.15	1.9	2.52	0.77	0.66
Fe ₂ O ₃	0.95	1.6	0.51	1	1.98	Cs	1.87	1.31	1.62	2.72	1.42
CaO	0.14	0.21	0.01	0.32	0.88	Ga	23.2	22.7	22.7	14.4	14.9
MgO	0.11	0.11	0.1	0.12	0.54	La	43.80	53.70	108.00	24.70	32.80
Na ₂ O	3.74	4.02	3.65	3.85	4.04	Ce	94.90	111.00	230.00	52.70	70.50
K ₂ O	4.67	4.64	4.46	4.4	4.16	Pr	11.50	14.35	31.80	6.47	7.29
TiO ₂	0.13	0.12	0.14	0.05	0.32	Nd	40.30	51.50	116.50	21.60	24.90
MnO	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	Sm	9.22	11.00	26.50	4.74	4.48
P ₂ O ₅	0.011	0.011	0.01	0.02	0.08	Eu	0.12	0.12	0.24	0.32	0.76
LOI	0.71	0.41	0.44	0.49	0.93	Gd	8.40	9.29	19.30	3.73	3.27
Total	99.6	99.9	99.87	99.82	99.38	Tb	1.48	1.44	2.56	0.60	0.50
Rb	169	151	144.5	160.5	113	Dy	10.10	9.42	13.95	3.98	3.24
Ba	30	40	40	210	890	Ho	2.15	1.90	2.52	0.77	0.66
Th	19.5	16.5	21.7	15.2	18.55	Er	6.52	5.49	6.93	2.32	1.91
U	4.85	3.48	5.2	3.48	7.26	Tm	1.05	0.86	1.07	0.37	0.32
Ta	2.1	2.3	2.5	1.6	1.2	Yb	7.21	6.07	7.51	2.66	2.27
Nb	34.4	25.5	28	12.7	10.4	Lu	1.06	0.91	1.05	0.37	0.32
Pb	12	20	12	25	21	Y	63.00	54.40	67.40	24.30	19.80
Sr	9.4	9.2	6.5	23.3	279	LREE	199.84	241.67	513.04	110.53	140.73
Zr	409	443	471	391	234	HREE	37.97	35.38	54.89	14.80	12.49
Hf	10.9	10.6	13.4	3.5	5.5	LREE/HREE	5.26	6.83	9.35	7.47	11.27
Sm	9.22	11	26.5	4.74	4.48	La _N /Yb _N	4.36	6.35	10.32	6.66	10.36
Ti	600	700	600	300	1700	δ Eu	0.04	0.04	0.03	0.22	0.58

区 A 型花岗岩以 290 Ma 为界, 划分为石炭纪与二叠纪两类分别进行阐述。

石炭纪花岗岩 \sum REE 平均为 198.01×10^{-6} , LREE/HREE 平均为 9.50, (La/Yb)_N 平均为 9.20; 二叠纪花岗岩 \sum REE 平均为 256.12×10^{-6} , LREE/HREE 平均为 5.09, (La/Yb)_N 平均为 4.50, 二者均表现为一定程度的轻重稀土分异, 而石炭纪花岗岩分异程度则更高, 且其稀土总含量偏低。石炭纪花岗岩 (La/Sm)_N 平均为 4.10, (Gd/Yb)_N 平均为 1.37; 二叠纪花岗岩 (La/Sm)_N 平均为 2.92, (Gd/Yb)_N 平均为 1.09, (La/Sm)_N 大于 1, 可见其轻稀土均为中等程度分异, (Gd/Lu)_N 则均接近于 1, 重稀土为低程度分异。从稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 5)中

可见, 石炭纪花岗岩和二叠纪花岗岩有明显的铕负异常, 前者 δ Eu 平均为 0.35, 后者平均为 0.17, 说明二者岩浆源区经历了斜长石的结晶分异作用, 而晚期二叠纪花岗岩结晶分异作用更为强烈。石炭纪花岗岩与二叠纪花岗岩尽管在 \sum REE 含量、轻重稀土分异程度、及 δ Eu 等指标上存在细微差异, 但二者总体呈现为强烈铕亏损, 左陡右缓的略右倾“V”型, 为典型 A 型花岗岩的稀土分配模式^[29]。

5.3 微量元素特征

石炭纪花岗岩与二叠纪花岗岩具有一致的微量元素特征, 都相对富集 Th、Pb、La 等元素, Ba、Ce、Sr、P 和 Ti 等元素则明显亏损, 总体表现为略右倾形式。Sr 在斜长石、磷灰石中分配系数最大, Ba 在黑

表 3 贺根山—嫩江—黑河一线 A 型花岗岩特征
Table 3 Geochemical characteristics of A-type granites in Hegenshan–Nenjiang–Heihe belt

图 1-B 编号	岩体名称	岩性	年龄/Ma	SiO ₂ /%	A/CNK	δ Eu	数据来源
1	黑河五道沟	碱长花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :274~292	76.12	0.89~1.04	0.09~0.21	[12]
	大黑山岩体	碱性花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :292±4	74~76			
2	小山屯岩体	黑云母碱长花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :285±2	74~76			[13]
	固固河	中粗粒碱长花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :264±5	74~76			
	松木山	碱长花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :260±3	74~76			
3	多宝山岩体	碱长-正长花岗岩	U-Pb (SHRIMP) :309±3	74.94	0.98~1.45	0.16~0.53	[27]
4	山神府岩体	二长花岗岩	U-Pb (LA-ICPMS) :291±3	76.48	1.08~1.11	0.03~0.56	[28]
5	拉抛岩体	碱长花岗岩	U-Pb (LA-ICPMS) :325±4	76.34	1.02~1.12	0.09~0.28	本文
6	京格斯台岩体	碱性花岗岩	U-Pb (ID-TIMS) :284.8±1.1	74~78			[15]
7	锡林浩特岩体	晶洞花岗岩	U-Pb (SHRIMP) :276±2	75.57	1.10~1.17	0.23~0.28	[14]
	白音乌拉	中细粒花岗岩	Rb-Sr (全岩等时线) :286±3	72~80			
	祖横的楞	中粗粒花岗岩	Rb-Sr (全岩等时线) :284±2	72~80			
	祖横的楞	细粒斑状花岗岩	Rb-Sr (全岩等时线) :276±5	72~80			[11]
	扎那乌拉	中粒花岗岩	Rb-Sr (全岩等时线) :277±3	72~80			
8	呼伦陶勒盖-1	中细粒花岗岩	U-Pb (SHRIMP) :277.1±2.1	78.16	1.01~1.06	0.13~0.20	[16]
	呼伦陶勒盖-2	斑状花岗岩	U-Pb (SHRIMP) :313.3±4.5	76.38	1.02~1.05	0.42~0.78	

云母、钾长石中分配系数最大^[30],因此推测,Sr、Ba的显著亏损与源区斜长石、磷灰石和黑云母大量分离结晶有关;Ti则主要向角闪石、黑云母中富集^[30],Ti的亏损则与角闪石、黑云母的分离结晶作用有关;P的强烈亏损,则与富P矿物磷灰石、榍石的分离结晶有关,而A型花岗岩明显的P负异常和低P₂O₅含量是区别于S型花岗岩的标志^[31]。李昌年^[32]认为

大陆弧背景下的造山型花岗岩具有Sr、P、Ti等元素的亏损,成熟的弧环境花岗岩不显示Nb亏损,该地区石炭纪和二叠纪花岗岩均与其具有一致的特点,因此,该地区A型花岗岩应为成熟大陆弧环境下的产物。

Eby^[28]将A型花岗岩分为与洋岛玄武岩(OIB)类似具有很低Y/Nb,Yb/Ta比值的A1型,与类似于岛

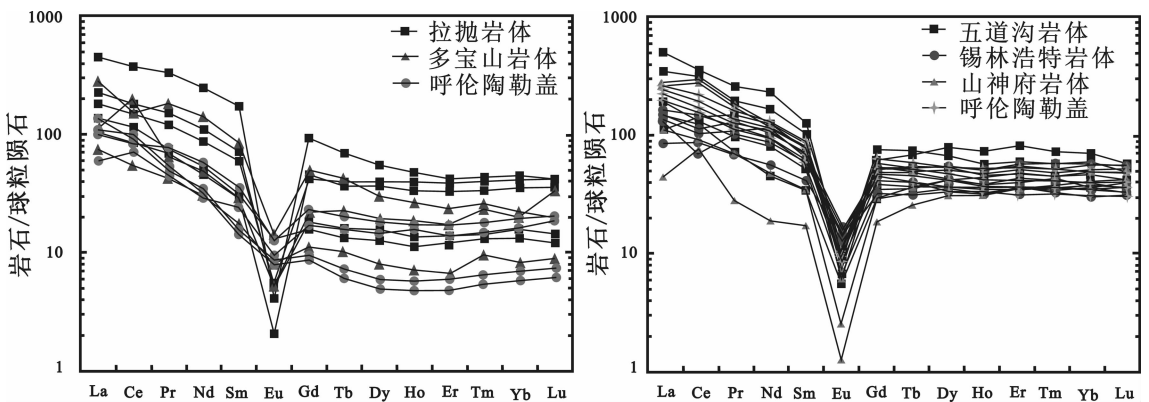


图 5 贺根山—黑河 A 型花岗岩稀土元素分配曲线^[32]

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns for A-type granites from Hegenshan–Heihe belt^[32]

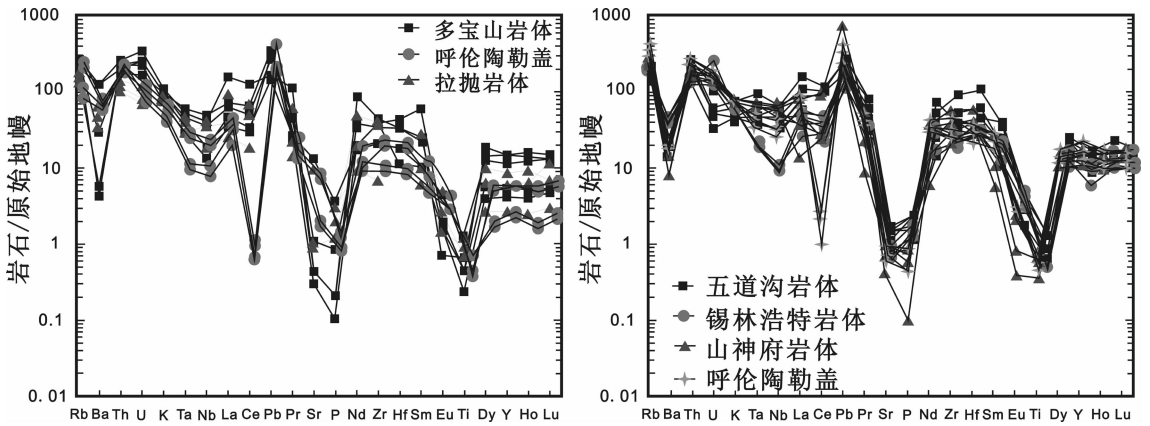


图 6 贺根山—黑河 A 型花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图^[33]

Fig.6 Primitive-mantle (PM) normalized spidergrams for A-type granites from Hegenshan-Heihe belt^[33]

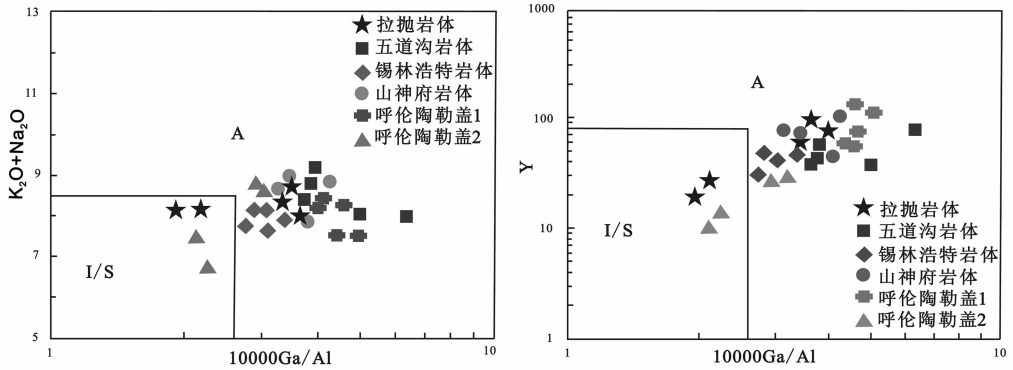


图 7 花岗岩 10000Ga/Al-Y 与 10000Ga/Al-(K₂O+Na₂O)类型判别图^[36]

Fig.7 Y and K₂O+Na₂O versus 10000Ga/Al discrimination diagrams of granites^[36]

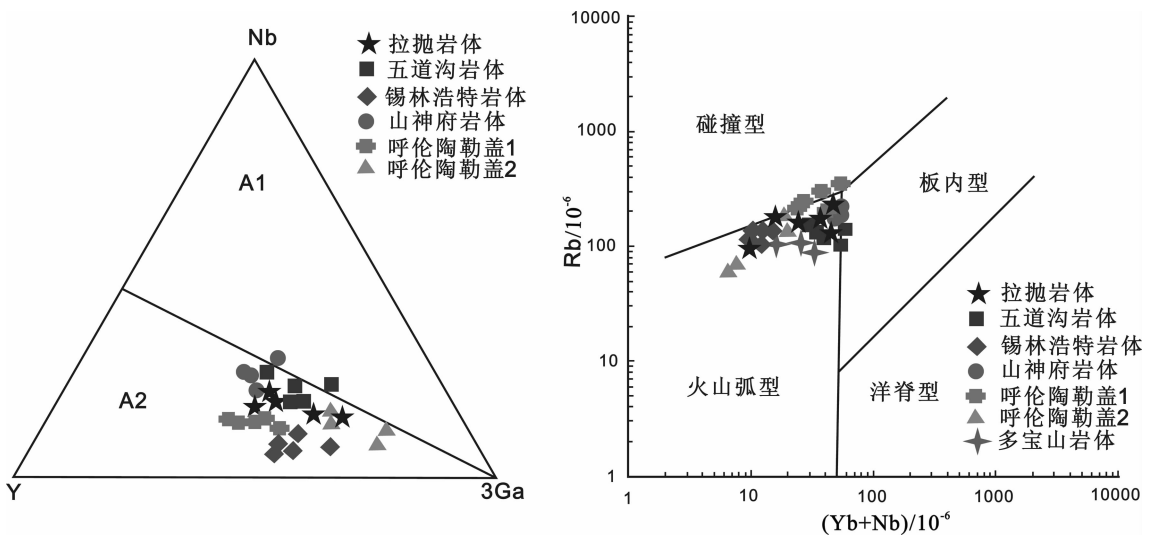


图 8 A 型花岗岩 Nb-Y-3Ga 三角图^[2]与 (Yb+Nb)-Rb 构造环境判别图^[37]

Fig.8 A-type granite Nb-Y-3Ga triangular plot (after Eby, 1992) and (Yb+Nb)-Rb discrimination diagrams of tectonic setting^[37]

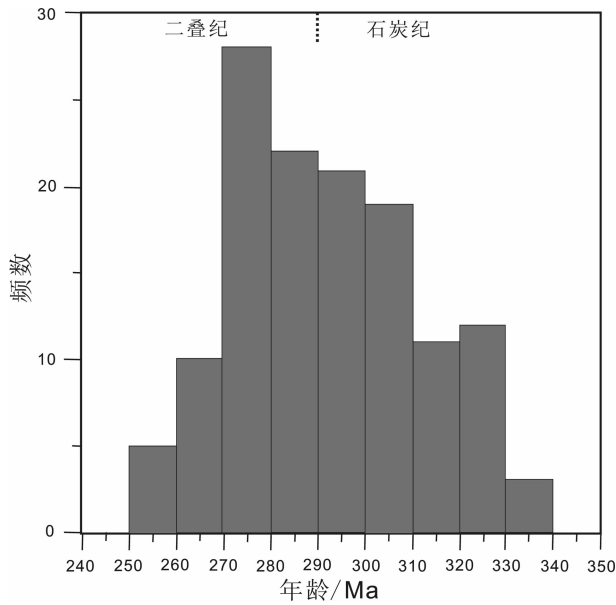


图 9 贺根山—黑河 A 型花岗岩年龄统计直方图
(数据来源于文献[11, 13-17, 27])

Fig.9 Age histogram of A-type granites in
Hegenshan-Heihe belt

弧玄武岩(IAB)具有高 Y/Nb , Yb/Ta 比值的 A2 型。石炭纪与二叠纪花岗岩的 Y/Nb 分别为 1.73 和 3.13, Yb/Ta 为 2.38 和 4.29, 都明显 >1 , 显示为岛弧玄武岩亲缘性, 其岩浆来源为壳-幔混合源。在微量元素蛛网图中 Nb 处于相对的低谷 $Nb_N=10\sim70$, 也表明该系列 A 型花岗岩受到了陆壳组分的混染^[34,35]。球粒陨石与原始地幔的 Nb/Ta 值约为 17.5, 后太古宙大陆地壳 Nb/Ta 平均约为 11。石炭纪花岗岩 Nb/Ta 值平均为 13.19, 二叠纪花岗岩平均为 13.38, 二者非常接近, 且与刘昌实等^[34]划分的碱性花岗岩(AAG 型) 13.36 相似, 表明石炭纪花岗岩与二叠纪花岗岩具有相同或相似的岩浆来源, 均指示为受陆壳组分混染的壳-幔混合型岩浆。

6 讨论

6.1 贺根山—黑河 A 型花岗岩带形成时间

贺根山—黑河一线 A 型花岗岩为中国北疆整个 A 型花岗岩带的东段部分已经得到了大家的认可^[10,15]。然而, 前人的研究多集中于该 A 型花岗岩带的某个岩体, 或某一段区域岩体, 明显尚不足推断整个花岗岩带的形成机制及构造环境。此前普遍认为贺根山—黑河 A 型花岗岩带为二叠纪 (290~260

Ma) 形成^[11, 13, 17]。但是本文拉抛碱长花岗岩年代学研究表明, 贺根山—黑河 A 型花岗岩带成岩作用最少应向前推至晚石炭世 (325Ma), 且多宝山地区的多宝山岩体年龄为 (309±3)Ma, 呼伦陶勒盖地区则测出了 (313±4)Ma 的 A 型花岗岩, 这表明晚石炭世 A 型花岗岩并非单独存在。此外, 山神府岩体与呼伦陶勒盖-1 岩体的成岩年龄介于 260~290 Ma, 其地球化学特征与此前认识的 A 型花岗岩高度一致 (图 5), 因此山神府岩体与呼伦陶勒盖-1 岩体应划入前人^[11, 13, 17]提出的二叠纪 A 型花岗岩范畴, 而本文分析的拉抛岩体与山神府岩体 (距离 <10 km), 呼伦陶勒盖-1 岩体与呼伦陶勒盖-2 岩体 (距离 <20 km), 两者空间上表现为共生关系; 时间上, 晚石炭世 A 型花岗岩与二叠纪 A 型花岗岩表现为连续产出, 二者之间无时间间隔 (图 9); 地球化学特征上, 晚石炭世与二叠纪花岗岩主、微量元素特征高度一致, 且在构造环境判别图、岩石成因判别图中呈现集中分布。因此, 贺根山—黑河一带 A 型花岗岩并非为此前认识的仅存在二叠纪, 而是从晚石炭世即已开始该期岩浆活动, 且从花岗岩的分布特点来看, 石炭纪晚期花岗岩通常呈单体产出且数量少, 二叠纪则表现为广泛分布, 由此可以推断, 该期岩浆活动开始于晚石炭世, 二叠纪进入活动高峰期。

6.2 华北板块与西伯利亚板块碰撞拼合的时间与位置

华北板块与西伯利亚板块之间存在两条蛇绿岩带, 贺根山—嫩江—黑河蛇绿岩带与西拉木伦河—长春—延吉蛇绿岩带, 两条蛇绿岩带的形成时间也不一致^[38]。因此, 针对华北板块与西伯利亚板块拼合的位置一种观点认为发生在南部的西拉木伦河—长春—延吉一线, 时间为晚二叠世至早三叠世^[17,39-43]; 另一种观点认为两大板块拼合于索伦—贺根山—黑河一线^[44,45]。对于华北板块与西伯利亚板块发生碰撞拼合的时间, 本文在详细总结前人资料的基础上认为应该为晚二叠世—早三叠世, 理由如下:

(1) 温都尔庙—西拉木伦河蛇绿岩带中, 温都尔庙奥陶纪蛇绿岩 (U-Pb 年龄 467~429 Ma^[46], 蛇绿岩上硅质岩发现有奥陶纪微生物化石^[47]) 常被误认为是洋壳闭合的产物。但该地区蛇绿岩上部覆盖有后期大洋半深海硅泥质沉积岩和凝灰岩层^[48], 且其铅同位素表明其来源于陆壳岩石, 可能形成于陆壳最初的裂解时期^[46], 刘敦一等^[49]测得温都尔庙蛇绿岩

中石英闪长岩年龄为 $(476\pm 18)\text{Ma}$,认为该年龄是温都尔庙古洋壳开始俯冲的时期。西拉木伦河蛇绿岩带的柯单山蛇绿岩片中堆晶辉长岩的锆石年龄为 $276\text{ Ma}^{[50]}$,这与处于同一位置的双井下场乡蛇绿岩中发现中二叠世放射虫相对应。由此可见,温都尔庙—西拉木伦河蛇绿岩带可能是多期、多成因蛇绿岩的叠合,而中晚二叠世蛇绿岩结合其中古生物的鉴定确定为古亚洲洋最终闭合的年代才更为合理。

(2)华北板块与西伯利亚板块早二叠世古纬度之差为 $32\sim 28^\circ$,现今纬度差为 22° ,可见两大板块从早二叠世至今纬度差减小了 $10\sim 6^\circ$,相当于二者之间距离缩短了 $1100\sim 700\text{ km}^{[51]}$ 。大洋消失后的陆壳继续俯冲,及在此作用下的陆壳压缩抬升造山作用也可以造成板块间距离缩短,但是华北板块与西伯利亚板块之间表现为“软碰撞”、“弱造山”的特点^[52],从而排除陆壳强烈碰撞俯冲消减的可能。因此,华北板块与西伯利亚板块之间二叠纪仍有俯冲洋壳存在。任收麦和黄宝春^[53]研究古地磁也发现石炭纪至晚二叠世,西伯利亚板块基本保持稳定,而华北板块则明显向北漂移,由此可见,石炭纪至二叠纪古亚洲洋主要向北俯冲,西伯利亚板块南缘属于活动大陆边缘环境。

(3)王玉净和樊志勇^[54]在西拉木伦河北部双井下场乡杏树洼蛇绿岩带硅质岩中发现中二叠世牙形类 *Mesogondolella* sp., 这类远洋型放射虫可以证明该蛇绿岩为洋壳的残留,且形成时间应该与放射虫的年代一致,为中二叠世。此外,在贺根山以南地区的灰岩块体中发现的珊瑚、腕足类、苔藓虫等典型造礁生物分子及锡林浩特南部的哲斯组粉砂岩中发现的菊石 *Daubichites* sp. 均被鉴定为二叠纪茅口亚世,且该类放射虫所处的沉积盆地深度至少大于 $300\sim 500\text{ m}^{[40]}$,因此,贺根山与锡林浩特南部二叠纪应该处于深水沉积环境。

(4)温都尔庙—西拉木伦河一线以北地区发现了大量中晚石炭世至晚二叠世岛弧环境 I 型花岗岩;苏尼特左旗 $(490\pm 8)\text{Ma}$ 与 $(309\pm 8)\text{Ma}$ 弧岩浆岩^[54,55];与古亚洲洋俯冲有关的古塔尔气 $(335\pm 5)\text{Ma}$ 、 $(320\pm 1)\text{Ma}$ 及 $(313\pm 3)\text{Ma}$ 3 个 I 型花岗岩^[56];维拉斯托花岗岩 $(323\pm 5\text{Ma})$ 、 $(308\pm 8\text{Ma})$ 和 $(298\pm 3\text{Ma})$ 均显示火山弧花岗岩的特征^[57];固阳地区 $(281.9\pm 3.1\text{Ma})$ 埃达克质花岗岩同样表现为典型岛弧型花岗岩的特征^[58],上述岛弧型花岗岩集中于中石炭世至早二叠

世,且均显示出俯冲大洋板片释放的流体交代地幔楔成因的特征。晚石炭世至早二叠世强烈的岛弧岩浆作用形成了广泛的岛弧型花岗岩,该类型花岗岩主要产出在温都尔庙—西拉木伦河一线以北地区,表明该地区应该为岛弧或活动大陆边缘环境,强烈的岛弧岩浆活动同时也暗示大洋板块俯冲活动在该时期达到高潮。

多方面的证据表明,古亚洲洋从早古生代就开始向北俯冲(是否存在向南俯冲尚有待进一步研究),俯冲期间局部弧—陆碰撞形成了多期蛇绿岩带,晚石炭世—二叠纪大洋板片进入了碰撞前的主俯冲阶段,该期间华北板块明显向北漂移,同时快速俯冲导致了西伯利亚板块南缘大面积岛弧型花岗岩的产出,晚二叠世至三叠纪,两大板块碰撞拼合于温都尔庙—西拉木伦河—延吉一线,伴随着三叠纪沿拼合带发育的大量同碰撞壳源花岗岩^[59]。

6.3 区域 A 型花岗岩带产出构造环境

A 型花岗岩的初始定义就限定其形成于非造山构造环境^[1],Eby^[2]和洪大卫等^[3]随后都提出了进一步将 A 型花岗岩分为形成于陆内裂谷 A1 型和形成于造山后伸展环境的 A2 型,Bonin^[5]更是提出了 A 型花岗岩可以形成于从陆内到大陆边缘的各种动力学背景。因此,我们认为 Eby 最初限定 A 型花岗岩形成于非造山环境,这里的“非造山”是指一种相对于造山挤压应力作用的拉伸或伸展应力环境,而并非指某种特定的构造环境,伸展环境才是控制 A 型花岗岩形成的关键因素。活动大陆边缘弧后伸展作为板块体制中重要、且广泛存在的构造环境同样有 A 型花岗岩的产出,胡受奚等^[60]针对东南沿海 A 型花岗岩研究首先提出这一认识。随后,这一观点也得到了更多研究和事实的证明。

华南地区晚中生代 A 型花岗岩可划分为两期,第一期 A 型花岗岩形成于陆内陆—陆剪切造山导致的拉张环境,第二期花岗岩则形成于板块俯冲导致的弧后伸展环境^[7]。对于中国东南部中生代构造背景多数学者认为属于安第斯型活动大陆边缘,岩浆活动与古太平洋俯冲有关^[61,62]。胡建等^[6]对比研究东南沿海与南岭内陆 A 型花岗岩发现,南岭内陆 A 型花岗岩主要受板内裂谷环境控制,东南沿海 A 型花岗岩则形成于古太平洋俯冲有关的弧后伸展引张环境。与中国东南沿海 A 型花岗岩类似,土耳其东北部东 Pontides 地区 A 型花岗岩形成于晚白垩世到

早新世南特提斯洋俯冲下的弧后伸展环境^[9],扬子地块西缘康定地区 A 型花岗岩形成于新元古代大洋俯冲下的活动大陆边缘^[8]。此外,Zhao^[8]和 Karli^[9]均认为俯冲板片俯冲角度由缓变陡,即提供了 A 型花岗岩产出的弧后伸展构造,又造成软流圈地幔物质上涌,为下地壳熔融提供了条件。

贺根山—嫩江—黑河一线 A 型花岗岩在古亚洲洋缝合带以北,距离缝合带一定距离的区域上成带状沿缝合带分布。通过对该花岗岩带的研究认为,该花岗岩带形成至少应该从晚石炭世(325 Ma)开始,比此前的认识向前推了 35~40 Ma,而该 A 型花岗岩带在晚石炭世至二叠纪(325~260 Ma)应该处于伸展的陆壳环境。上文结合古生物、古地磁等多方面证据证实古亚洲洋在二叠纪仍处于向北俯冲阶段,其俯冲位置在该 A 型花岗岩带南部的温都尔庙—西拉木伦河一线。因此,温都尔庙—西拉木伦河以北在晚石炭世到二叠纪应该属于活动大陆边缘环境,贺根山—黑河一线则为大陆弧后环境,江小燕等^[9]对林西、索伦及好仁地区二叠纪林西组和哲斯组砂岩物源区分析均是活动大陆边缘大陆岛弧,此观点也得到了其他学者认可^[64-65]。由此可见,贺根山—黑河 A 型花岗岩带出于活动大陆边缘的弧后伸展环境,这些碱性花岗岩的形成可能与安第斯型活动陆弧下部俯冲洋壳有关^[66],Wu 等^[17]进一步认为其岩浆形成可能是俯冲板块断离导致的软流圈上涌熔融下地壳。因此,贺根山—嫩江—黑河一线 A 型花岗岩、华南沿海 A 型花岗岩、土耳其东 Pontides 地区 A 型花岗岩及康定地区 A 型花岗岩均形成于活动大陆边缘弧后伸展环境。

6.4 活动陆弧 A 型花岗岩成因

A 型花岗岩岩石成因虽然存在较多的争议^[17, 67],但其成岩需要的低压、相对贫水和高温等条件则被广泛的认可。贺根山—黑河一线 A 型花岗岩都具有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$,嫩江—黑河花岗岩带 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 2.0~5.3^[17],苏尼特左旗花岗岩带 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 3~5.4^[11],这种广泛的正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩与南北美洲西海岸晚中生代—古近—新近纪花岗岩类似,美国西部与秘鲁安第斯山花岗岩详细研究发现,从太平洋沿岸向内陆 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 由正变负,这主要是由于太平洋板块俯冲导致地幔来源岩浆注入到大陆边缘,而内陆没有地幔岩浆的注入,而且这种加入的岩浆主要是年轻的地幔物质^[7]。对内蒙古不同时代、不同类型花岗岩类 Sm-Nd 同位素研究也表明,相对于其他时代花岗

岩类物质来源以壳源增生物质重熔为主,晚古生代明显存在有幔源物质的加入^[68]。结合贺根山—黑河一线 A 型花岗岩微量元素特征,该花岗岩带岩浆应该来源于地幔岩浆在侵位过程中壳—幔相互作用^[69]。

A 型花岗岩相对于 I 型和 S 型具有更高的成岩温度,通过锆石饱和温度计得出的结晶温度一般达到 800°C 以上^[39],而岩石学实验表明其形成温度可能超过 900°C^[70]。锆石饱和温度计算法是利用岩浆早期结晶温度近似代表岩浆的形成温度,这是当前获得岩浆初始温度的主要方法之一,其计算公式转引自文献^[71]:

$$T_{\text{Zr}} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000 / Z_{\text{r, melt}})]$$

式中: T 为绝对温度; M 为全岩的 $(\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Al} \times \text{Si})$ 摩尔数(计算中,令 $\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Na} + \text{K} + \text{P} = 1$ (摩尔分数)); $Z_{\text{r, melt}}$ 为熔体中 Zr 的含量。

在实测的 5 件全岩样品中,利用锆石饱和温度计算法得出岩浆形成温度介于 840~916°C,平均为 879°C,这与前人认识及实验室结论一致,表明该地区 A 型花岗岩形成于高温环境,而形成这种高温,且具有巨大规模(如贺根山—黑河甚至整个中国北疆 A 型花岗岩带)的岩浆,地幔岩浆上侵或软流圈上涌才是可能的形式^[17]。

此外,贺根山—黑河和中国东南沿海 A 型花岗岩普遍发育晶洞构造,说明其快速侵位的特点,而且这种 A 型花岗岩明显成带状产于区域性断裂附近(贺根山—黑河花岗岩分布于贺根山—嫩江—黑河断裂,中国东南沿海花岗岩分布于长乐—南澳断裂),都说明该类型花岗岩产于伸展构造环境。对于活动大陆边缘体制,大洋板片以高角度快速俯冲时诱发地幔物质对流上涌在到达岩石圈底部向两侧分流,这种分流张力即是弧后陆壳伸展的动力来源^[72]。活动大陆边缘在这种张力下形成了弧后伸展环境,而伸展环境下形成的区域性断裂则为岩浆快速上侵提供了通道。

7 结论

(1) 拉抛碱长花岗岩侵位结晶年龄为 (325 ± 3) Ma, 即晚石炭世,属于弱过铝质高钾钙碱性系列 A2 型花岗岩。

(2) 结合年代学、地球化学及时空分布特征,拉抛碱长花岗岩、黑河五道沟等贺根山—黑河一线岩体应为同期、同成因 A 型花岗岩,且该花岗岩带的成岩时期应向前推至晚石炭世。

(3)古亚洲洋在晚石炭世至二叠纪快速向西伯利亚板块下俯冲,形成了华北板块南缘活动大陆边缘环境,贺根山—黑河一线应属于弧后伸展环境。

(4)贺根山—黑河 A 型花岗岩带与中国东南沿海 A 型花岗岩带、土耳其北部的 Pirnalli A 型花岗岩、及扬子板块西缘新元古代 A 型花岗岩类似,均产出活动大陆边缘的弧后伸展环境。活动大陆边缘弧后伸展应该为另一种重要的 A 型花岗岩产出构造环境。

(5)大洋板片的高角度俯冲或俯冲板块的断裂引发的软流圈上涌为下地壳岩石高温熔融提供了热源,壳—幔相互作用形成的混合岩浆沿弧后区域性断裂快速上侵形成了活动陆弧后的 A 型花岗岩带。

参考文献 (References):

- [1] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geol. Soc. Am. Prog. Abstr. ,1979(11):468.
- [2] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids. Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology. 1992, 20(7):641.
- [3] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(4):418-426.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, et al. Tectonic environment classification of alkali-granite and its discrimination criteria [J]. Science in China (Series B), 1995, 25 (4):418-426(in Chinese with English abstract).
- [4] 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3):278-285.
Li Xiaowei, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, et al. A discussion on how to discriminate A-type granite [J]. Geological bulletin of China, 2010, 29(2/3):278-285(in Chinese with English abstract).
- [5] Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007, 97(1-2):1-29.
- [6] 胡建, 邱检生, 王德滋, 等. 中国东南沿海与南岭内陆 A 型花岗岩的对比及其构造意义[J]. 高校地质学报. 2005, 11(3):404-414.
Hu Jian, Qiu Jiansheng, Wang Dezi, et al. Comparative investigations of A-type granites in the coastal and the Nanling inland areas of SE China, and their tectonic significances [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11 (3):404-414(in Chinese with English abstract).
- [7] 邱检生, 王德滋, 赵广涛. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2):13-21.
Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Zhao Guangtao. The tectonic constraint on the late Mesozoic A-type granitoids in eastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 1995, 1 (2):13-21(in Chinese with English abstract).
- [8] Zhao X, Zhou M, Li J, et al. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1-2):1-15.
- [9] Karsli O, Caran, Dokuz A, et al. A-type granitoids from the Eastern Pontides, NE Turkey: Records for generation of hybrid A-type rocks in a subduction-related environment [J]. Tectonophysics, 2012, 530 - 531:208-224.
- [10] 洪大卫, 王式洸, 黄怀曾. 中国北疆及其邻区晚古生代—三叠纪碱性花岗岩带及其动力学意义初探 [C]// 李之彤主编. 中国北方花岗岩及其成矿作用论文集. 北京:地质出版社, 1991:40-48.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Huang Huizeng. Preliminary study of the late Paleozoic-Triassic alkaline granite belt in northern territory of China and adjacent areas and its geodynamic significance [C]//LI Zhitong. Contributions on granitoids and their Minerogenesis in Northern China. Beijing: Geological Publishing House, 1991:40-48.
- [11] 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994, 68(3):219-230.
Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, et al. Permian alkaline granites in center Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. Acta Geological sinica, 1994, 68 (3):219-230(in Chinese with English abstract).
- [12] 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 Kuicheng, Zhang Wenglong, Yang Xiaoping, 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(in Chinese with English abstract).
- [13] 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 Deyou, Wu Fuyuan, Li Huimin, 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-Zhalaitectonic collisional suture zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (5):427-432.
- [14] 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. 科学通报, 2004, 49(4):384-389.
Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, et al. The age and its district tectonic implications on the Xilinhaote A-type granites, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (4) :384-389(in Chinese).
- [15] 张玉清, 许立权, 康小龙, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义[J]. 中国地质, 2009, 36(5):988-995.
Zhang Yuqing, Xu Liquan, Kang Xiaolong, et al. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujingqin Banner, Inner Mongolia, and its significance [J]. Geology in China, 2009, 36(5): 988-995(in Chinese with English abstract).
- [16] 韩宝福, 张臣, 赵磊, 等. 内蒙古西部呼伦陶勒盖地区花岗岩类的初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6):741-749.

- Han Baofu, Zhang Cheng, Zhao Lei, et al. A preliminary study of granitoids in western Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29 (6):741-749 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wu F, Sun D, Li H, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1/2):143-173.
- [18] 孙金凤, 杨进辉. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2009, 34(1):137-147.
Sun Jinfeng, Yang Jinghui. Early cretaceous A-type granites in the eastern north China block with relation to destruction of the craton [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009,34(1):137-147(in Chinese with English abstract).
- [19] 洪大卫, 王式, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(2):441-456.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Genesis of positive $\epsilon\text{Nd}(t)$ granitoids in the Da Xinggan Mts-Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (2):441-456(in Chinese with English abstract).
- [20] 隋振民. 大兴安岭东北部花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及地壳演化(博士学位论文)[D]. 长春:吉林大学, 2007.
Sui Zhenmin, Zircon U-Pb Age, Petrogenesis and Crustal Evolution of the Granites in Northeastern Part of the Great Xing'an Range (PhD thesis)[D]. Changchun:Jinlin University, 2007(in Chinese with English abstract).
- [21] 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 Fuyuan, Zhou Changyong, 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 Hingge Range [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12):1239-1247(in Chinese).
- [22] 李锦轶, 牛宝贵, 宋彪, 等. 长白山北段地壳的形成与演化 [M]. 北京:地质出版社, 1999:1-136.
Li Jingyi, Niu Baogui, Song Biao, et al. Crustal Formation and Evolution of Northern Changbai Mountains, Northeast China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1999:1-136(in Chinese with English abstract).
- [23] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen:U-Pb Dating, Hf Isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths D-4440-2011 [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2):537-571.
- [24] Ludwig K R. ISOPLOT 3.0:A geochronological toolkit for Microsoft excel [J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4. 2003.
- [25] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(16):1589-1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15):1555-1569(in Chinese with English abstract).
- [26] 赵芝, 迟效国, 潘世语, 等. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学及其地质意义 [J]. *岩石学报*. 2010, 26(8):2452-2464.
Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Pan Shiyu, et al. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern lesser Xing'an Range [J]. *Acta Petrologica sinica*, 2010, 26(8):2452-2464(in Chinese with English abstract).
- [27] 曲晖, 李成禄, 赵忠海, 等. 大兴安岭东北部多宝山区花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征 [J]. *中国地质*, 2011, 38 (2):292-300.
Qu Hui, Li Chenglu, Zhao Zhonghai, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of granites in Guobaoshan area, Northeast Great Xing'an Range [J]. *Geology in China*, 2011, 38 (2):292-300(in Chinese with English abstract).
- [28] 陈俊, 吕新彪, 姚书振, 等. 内蒙古红彦镇地区早二叠世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报(待刊)*.
Chen Jun, Lv Xinbiao, Yao Shuzhen, et al. Early Permian zircon U-Pb ages of A-type granite in the Hongyan area [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*(in Press).
- [29] Eby G N. Chemical Subdivision of the A-type granitoids - petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*. 1992, 20 (7):641-644.
- [30] 干国樑. 矿物-熔体间元素分配系数资料及主要变化规律 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1993, 12(2):144-181.
Gan Guoliang. Mineral-melt element partition coefficients: data and major variation regularities [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 1993,12(2):144-181(in Chinese with English abstract).
- [31] 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3):465-480.
Jia Xiaohui, Wang Qiang, Tang Gongjian. A-type granites: research progress and implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(3):465-480(in Chinese with English abstract).
- [32] 李昌年. 火成岩微量元素地球化学 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992:1-195.
Li Changnian, Petrology of Trace Element of Igneous [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1992:1-195.
- [33] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C] //Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins: Special Publication*, Geological Society of London, 1989, 313-345.
- [34] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类、判别标志和成因 [J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4):573-591.
Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, et al. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9 (4):573-591(in Chinese with English abstract).
- [35] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2000,

- 165(3/4):197-213.
- [36] Whalen J B, Currie K L, Chappell B A. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, (95):407-419.
- [37] Pearce J A, Harris N B Y, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984(25):956-983.
- [38] Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118(1/2): 169-190.
- [39] 王玉净, 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义[J]. *古生物学报*, 1997, 36(1):60-71. Wang Yujing, Fan Zhiyong. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on northern side of Xar Moron river, Nei Monggol and its geological significance[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1997, 36(1):60-71(in Chinese with English abstract).
- [40] 尚庆华. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(24):2574-2579. Shng Qinghua. Discovery of the Permian radiolarians from middle and eastern Inner Mongolia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (24):2574-2579 (in Chinese with English abstract)
- [41] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*. 2009, 39 (4):584-605. Li Jingyi, Zhang Jing, Yang Tiannan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the north Asian orogenic region and its adjacent areas [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2009, 39 (4):584-605 (in Chinese with English abstract).
- [42] 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. *地球学报*. 2010, 31(3):395-412. Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, et al. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2010, 31 (3):395-412 (in Chinese with English abstract).
- [43] 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 Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, et al. The final closing time of the west Lamulun River Changchun-Yanji plate suture zone—Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2004, 34(2): 174-181(in Chinese with English abstract).
- [44] 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 Jian, Tang Kedong, Wang Chengyuan, et al. The tectonic characteristics and evolution of Nadanhada terrane [J]. *Science in China(B)*, 1991, (7):744-751(in Chinese with English abstract).
- [45] 徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(3):227-232. Xu Bei, Chen Bing. Structure and evolution of Paleo-Mesozoic orogenic zone in the north of Inner Mogolia between north China plate and Sibena plate[J]. *Science in China(Series D)*, 1997, 27(30): 227-232(in Chinese with English abstract).
- [46] 唐克东, 张允平. 内蒙缝合带的构造演化[C]//肖序常, 汤耀庆主编. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化. 北京:北京科技大学出版社, 1991:30-54. Tang Kedong, Zhang Yunping. Tectonic evolution of Inner Morgolian suture zone[C]//Xiao Xuchang, Tang Yaoqing. Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasutuge. Beijing:Beijing Scientific and Technical Publishing House, 1991:30-54.
- [47] 何国琦, 邵济安. 内蒙古东南部(昭盟)西拉木伦河一带早古生代蛇绿岩建造的确证及其大地构造意义 [J]. *中国北方板块构造文集*, 1983, 1:243-250.
- [48] 唐克东. 中朝陆台北侧褶皱带构造发展的几个问题 [J]. *现代地质*, 1989, 3(2):195-204. Tang Kedong. On tectonic development of the fold belts in the north margin of Sino-korean platform [J]. *Geoscience*, 1989, 3(2): 195-204(in Chinese with English abstract).
- [49] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消滅的证据 [J]. *地质学报*, 2003, (3):317-327. Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, et al. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: evidence for the early Paleozoic subduction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, (3):317-327 (in Chinese with English abstract).
- [50] 叶翎松, 廖群安, 葛梦春. 内蒙古锡林浩特、林西地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及构造意义 [J]. *地质科技情报*. 2011, 30(3): 57-64. Ye Xusong, Liao Qunan, Ge Mengchun. Petrogenesis and tectonic significance of Triassic peraluminous granitoids in Xilinhaote and Linxi area, Inner Mongolia [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30 (3):57-64 (in Chinese with English abstract).
- [51] 唐克东等. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律 [M]. 北京:北京大学出版社, 1992:305. Tang Kedong, et al. Tectonic Evolution and Minerogenetic Regularities of the Fold Belt along the Northern Margins of Sino-Korean Plate [M]. Beijing:Peking University Press, 1992:305 (in Chinese with English abstract).
- [52] 邵济安, 唐克东. 蛇绿岩与古蒙古洋的演化[Z]. 北京, 1996:117-120. Shao Ji'an, Tang Kedong. Some characteristics of ophiolites and ancient ocean evolution in paleosia oceanic area [Z]. Beijing, 1996: 117-120(in Chinese with English abstract).
- [53] 任收麦, 黄宝春. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动

- 学特征初探[J]. 地球物理学进展. 2002, 17(1):113-120.
- Ren Shoumai, Huang Baochun. Preliminary study on post-late paleozoic kinematics of the main blocks of the Paleo-Asian ocean [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1):113-120(in Chinese with English abstract).
- [54] Chen B, Jahn B, Wilde S, et al. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications [J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2):157-182.
- [55] 陈斌, 赵国春, Simon WILDE. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义 [J]. 地质论评, 2001, 47(4):361-367. Chen Bing, Zhao Guochun, Simon WILDE. Subduction - and collision -related granitoids from southern Sonizuoqi, Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implications [J]. Geological Review, 2001, 47(4):361-367(in Chinese with English abstract).
- [56] 张健, 陈井胜, 李泊洋, 等. 内蒙古塔尔气地区晚古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征 [J]. 世界地质, 2011, (4): 521-531. Zhang Jian, Chen Jingsheng, Li Boyang, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of late Paleozoic granites in Taerqi area, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2011, (4):521-531(in Chinese with English abstract).
- [57] 王瑾. 内蒙古维拉斯托铜多金属矿床矿区花岗岩类年代学与地球化学[D](硕士学位论文). 中国地质大学(北京), 2009. Wang Jing. Chronology and Geochemistry of Granitoid for the Weilasituo Copper Polymetal Deposit in Inner Mongolia (Master thesis) [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2009 (in Chinese with English abstract).
- [58] 曾俊杰, 郑有业, 齐建宏, 等. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008 (6):755-763. Zeng Junjie, Zhen Youye, Qi Jianhong, et al. Foundation and geological significance of adakitic granite at Guyang of Inner Mongolia [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2008, (6):755-763(in Chinese with English abstract).
- [59] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3):565-582. Li Jingyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjingzi middle trassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. Acta Petrological Sinica, 2007, 23(3):565-582(in Chinese with English abstract).
- [60] 胡受奚, 顾连兴, 严正富, 等. 不同类型花岗岩与板块构造的关系及其形成和分布规律 [J]. 中国北方花岗岩与成矿作用论文集. 北京:地质出版社, 1991:33-39.
- [61] Guo L, Shi Y, Ma R. The geotectonic framework and crustal evolution of south China [J]. Scientific Papers for International Exchange (I)—Structural Geology and. Beijing: Geological Publishing House, 1980:109-116 (in Chinese with English abstract).
- [62] 任纪舜, 陈廷恩, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京:科学出版社, 1990:1-217. Ren Jisun, Chen Tinyu, Niu Baogui, et al. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas [J]. Beijing: Science Press, 1990:1-217 (in Chinese with English abstract).
- [63] 江小燕, 刘永江, 周冰, 等. 大兴安岭南段兴-蒙草原区二叠纪砂岩物源分析 [J]. 地质通报, 2011, 30(7):1085-1098. Jiang Xiaoyan, Liu Yongjiang, Zhou Bing, et al. A provenance analysis of Permian sandstones in southern Da Hingan Mountains - Inner Mongolia steppe zone [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(7):1085-1098(in Chinese with English abstract).
- [64] 章永梅, 张华锋, 周志广, 等. 内蒙古四子王旗大庙花岗岩体的成因与构造意义 [J]. 矿物岩石, 2008, 28(2):28-38. Zhang Yongmei, Zhang Huafeng, Zhou Zhiguang, et al. Genetic and tectonic significance of the Damiao granodiorite, Saiwangqi, Inner Mongolia [J]. Mineral Petrol., 2008, 28(2):28-38(in Chinese with English abstract).
- [65] 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨 [J]. 岩石学报, 2002, 18(2):212-222. Lv Zhiceng, Duan Guozheng, Hao Libuo, et al. The petrological and geochemical characteristics and petrogenesis significance of spilite from lower Permian Dashizai Group in the middle section of Da Hingan Mountains [J]. Acta Petrological Sinica, 2002, 18(2):212-222(in Chinese with English abstract).
- [66] 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 等. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩:地壳生长的时代和方式 [J]. 岩石学报, 2007, 23(2):441-460. Liu Wei, Pan Xiaofei, Xie Liewen, et al. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hingan Mts: when and how continental grew? [J]. Acta Petrological Sinica, 2007, 23(2):441-460(in Chinese with English abstract).
- [67] Creaser R A, Price R C, Woimald R J. A-type granites revisited: assessment of a residual-resource model [J]. Geology, 1991(19): 163-166.
- [68] 李大鹏, 陈岳龙, 王忠, 等. 内蒙古不同时代花岗岩类 Nd、Pb 同位素特征及其地质意义 [J]. 现代地质, 2010, 24(5):821-831. Li Dapeng, Chen Yuelong, Wang Zhong, et al. Nd-Pb isotopic composition characteristics and geological significances of granitoids with different ages in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2010, 24(5): 821-831(in Chinese with English abstract).
- [69] Harris G M, Beardow A P. Destruction of Sodom and Gomorrah: A geotechnical perspective [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1995, 28(4):349.
- [70] Patino Dounce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-Pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. Geology, 1997, 25(8):743-746.
- [71] 隋振民, 陈跃军. 大兴安岭东部花岗岩类锆石饱和温度及其地质意义 [J]. 世界地质, 2011, 30(2):162-172.

Sui Zhenmin, Chen Yuejun. Zircon saturation temperatures of granites in eastern Great Xing'an Range, and its geological significance[J]. *Global Geology*, 2011, 30(2):162-172(in Chinese with English abstract).

[72] 何建坤, 刘福田. 俯冲板片形貌特征和活动大陆边缘演化体制

的关系[J]. *地球物理学进展*, 1998, 13(2):16-26.

He Jiankun, Liu Futian. Relationship between the morphology of subducted slabs and the tectonic evolution in the active continental margins[J]. *Progress in Geophysics*, 1998, 13(2):16-26(in Chinese with English abstract).

Characteristics and genesis of continental back-arc A-type granites in the eastern segment of the Inner Mongolia-Da Hinggan Mountains orogenic belt

ZHANG Lei¹, Lv Xin-biao^{1,2}, LIU Ge¹, CHEN Jun¹,
CHEN Chao¹, GAO Qi¹, LIU Hong¹

(1. Faculty of Resource Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Late Paleozoic A-type granites are widely distributed in Hegenshan-Heihe segment of the Inner Mongolia-Da Hinggan Mountains orogenic belt. Their tectonic environments and petrogenesis remain controversial. A-type granites in Hegenshan Heihe segment were emplaced in Late carboniferous-Permian period (325~260Ma), and the magmatic activities entered into the peak period in Permian. The A-type granite belt is metaluminous or slightly peraluminous ($A/CNK=0.89\sim 1.13$) and belongs to the high-K, calc-alkaline series. On the chondrite-normalized REE diagram, all plutons are enriched in LREE, but show significant negative Eu anomalies. Their primitive-mantle normalized spidergrams display negative Ba, Sr, Ce, P, Ti and positive Th, Pb, La anomalies. Researches show that the ancient Asian oceanic plate still subducted into the Siberia plate between Late carboniferous and Permian, so the subduction-related back-arc extensional environment is thought to have been responsible for the formation of Hegenshan-Heihe A-type granites. The continental back-arc extension was probably related to the subduction slab rollback or the break-off induced upwelling of hot asthenospheric mantle. This process provided the thermal flux for melting the overlying lower crust at a high temperature, and also resulted in the mixing of the crust and the mantle-derived magmas. The mixed magma emplacement along the continental back-arc extension fault system after fractional crystallization in the depth was responsible for the formation of the Hegenshan-Heihe A-type granites belt.

Key words: Inner Mongolia-Da Hinggan Mountains orogenic belt; A-type granite; geochemical characteristics; continental back-arc extension

About the first author: ZHANG Lei, male, born in 1986, master candidate, majors in mineral survey and exploration; E-mail: js-zhanglei@163.com.

About the corresponding author: LV Xin-biao, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates; engages in the study of mineral deposits, mineral survey and exploration; E-mail: luxb@cug.edu.cn.