文章编号：1004—5589（2017）01—0041—13

大兴安岭中北段雅尔根楚地区晚古生代花岗岩的成因及其地质意义

任子慧[1]，和钟铧[1]，王清海[2]，周小萌[1]，赵迪[1]，和越[1]，葛文春[1]

1. 吉林大学 地球科学学院，长春 130061；
2. 吉林大学 东北亚国际地学研究与教学中心，长春 130026

摘要：为确定大兴安岭地区晚古生代花岗质岩石的成因及其构造背景，笔者对雅尔根楚地区二长花岗岩样品进行了锆石U-Pb年代学与地球化学测试分析。锆石U-Pb年龄结果显示研究区二长花岗岩形成于晚石炭世（312±2 Ma）。二长花岗岩具有较高的SiO_2（75.16%～75.32%）和全碱（8.45%～8.76%）含量，较低的MgO（0.12%～0.14%）含量，以富集大离子亲石元素（Rb、Ba、Th、U、K）和轻稀土元素，亏损Nb、Ta、Ti及P元素为特征，并且其$\varepsilon_{Hf}(t)$值和Hf二阶段模式年龄变化于+3.5～+9.5和1 103～715 Ma，表明其原始岩浆来源于新生地壳物质的部分熔融。结合年代学、地球化学特征与区域地质调查结果，认为研究区晚石炭世二长花岗岩的形成与古亚洲大洋板块向兴安地块下的俯冲作用有直接联系。

关键词：晚古生代；年代学；地球化学；大兴安岭；俯冲作用

中图分类号：P595；P597；P581　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.01.004

Petrogenesis of Late Paleozoic granites from Yaergenchu area in north-central Great Xing'an Range and its geological implication

REN Zi-hui[1], HE Zhong-hua[1], WANG Qing-hai[2], ZHOU Xiao-meng[1], ZHAO Di[1], HE Yue[1], GE Wen-chun[1]

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China*;
2. *International Center for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China*

Abstract: To determine the petrogenesis and tectonic setting of Late Paleozoic granitoids in Great Xing'an Range, NE China, the authors undertook zircon U-Pb dating and geochemical analysis on samples from monzogranites in Yaergenchu area. Zircon U-Pb age dating indicates that the monzogranites in the studied area were emplaced in the Late Carboniferous (312±2 Ma). The monzogranites contain high SiO_2 (75.16%～75.32%) and Na_2O+K_2O (8.45%～8.76%), but low MgO (0.12%～0.14%). Moreover, the samples are characterized by the enrichment of large ion lithophile elements (e.g., Rb, Ba, Th, U, K) and light rare earth elements, but depletion of Nb, Ta, Ti and P, with $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of +3.5 to +9.5 and Hf two-stage model ages of 1 103～715 Ma, indicating that the parental magma was derived from partial melting of juvenile crustal material. Integrating the geochronological data, geochemical features and regional geological observations, it is suggested that the formation of Late Carboniferous monzogranites in the studied area was related to the subduction of the Paleo-Asian oceanic plate beneath the Xing'an terrane.

收稿日期：2016-07-12；**改回日期**：2016-11-30
基金项目：国家自然科学基金项目（41272076）资助.
通讯作者：和钟铧（1968-），男，教授，从事构造地质学研究. E-mail：hzh@jlu.edu.cn

Key words: Late Paleozoic; geochronology; geochemistry; Great Xing'an Range; subduction

0 引言

近年来，关于大兴安岭地区晚古生代岩浆作用的研究已逐步成为地质学界研究的热点问题，并且针对区内岩浆-构造演化模式的探讨也成为国内外地质学家争论的焦点问题[1-12]。造成争论的主要原因是无法准确限定兴安地块和松嫩地块的碰撞演化历史，即贺根山—嫩江—黑河缝合带的闭合时间。目前，传统观点认为贺根山—嫩江—黑河缝合带在二叠纪之前已经闭合[5-7,10-13]。但是近年来，一些学者通过研究提出了不同的观点：（1）Nozoka and Liu [2]根据贺根山蛇绿岩带中角闪石的 K-Ar 年龄（130 Ma），认为该缝合带于白垩纪闭合；（2）Chen [3]和陈斌等 [14]根据苏尼特左旗碰撞花岗岩（250 ~ 230 Ma）和弧岩浆岩（310 Ma）的形成时代，认为索伦缝合带的最终缝合时间可能是在晚古生代—中生代（310 ~ 230 Ma）；（3）Miao [4]和苗来成等 [15]根据小兴安岭西北部科洛杂岩的变质年龄（216 Ma），认为该缝合带于中生代碰撞拼合；（4）Dong [1]根据大兴安岭北段晚古生代兴安杂岩体的年代学与地球化学研究，认为兴安地块与松嫩地块在早二叠世前并未碰撞拼合。由此可见，关于兴安地块与松嫩地块间碰撞拼合历史的研究还需进一步深入，以便更准确厘定贺根山—嫩江—黑河缝合带的闭合时间。因此，笔者在前人研究基础上，对大兴安岭中北段雅尔根楚地区晚古生代花岗岩进行锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素分析以及地球化学研究，来探讨这些岩石的形成时代、成因以及其形成的地球动力学背景，从而对兴安地块和松嫩地块间的碰撞拼合历史进行限定。

1 地质概况及样品特征

1.1 地质概况

研究区位于内蒙古自治区扎兰屯市雅尔根楚地区，大地构造位置属于中亚造山带东段，位于华北板块和西伯利亚板块之间的兴安地块上（图 1）。该区构造演化复杂，古生代经历了华北板块和西伯利亚板块间复杂的造山作用，表现为不同块体或地块间的碰撞拼合，导致两大板块最终拼合在一起[16-20]，而在中生代以后，该区又经历了古太平洋构造域和蒙古—鄂霍茨克构造域的叠加改造作用[21-27]。

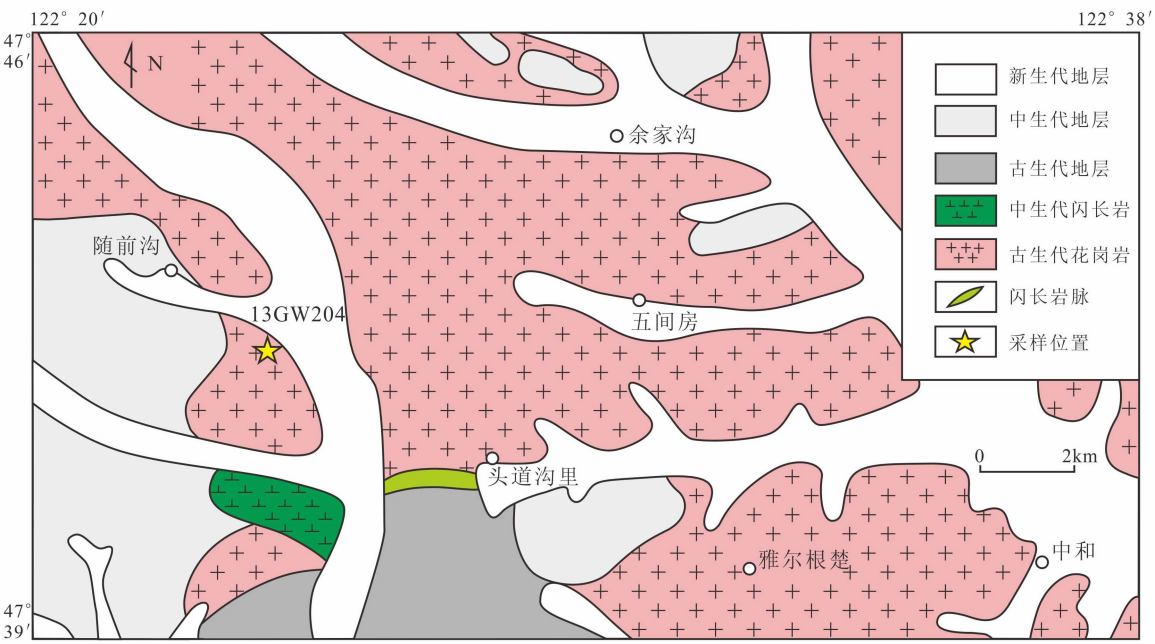


图 1 大兴安岭中部雅尔根楚地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Yaergenchu Region, Great Xing'an Range

兴安地块最古老的岩石曾被认为形成于前寒武纪或前奥陶纪，并与额尔古纳地块的兴华渡口群进行对比。但是，Miao[4] 和苗来成等[15]的研究表明，位于大小兴安岭结合部遭受低级变质作用和强烈变形作用的科洛杂岩主要为花岗质岩石和中酸性火山岩，其原岩的形成时代并非前寒武纪，即兴安地块上的变质岩系是古生代岩石经历变质-变形作用改造的产物。此外，兴安地块广泛分布显生宙花岗质岩石，主要由花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、碱长花岗岩以及碱性花岗岩组成，并有少量闪长岩和辉长岩与其共生[28]。研究区内，古生代和中、新代地层广泛分布，并有古生代和中生代岩体出露。本文以雅尔根楚地区晚古生代花岗岩为研究对象，对大兴安岭地区晚古生代花岗质岩石的成因及其构造背景进行探讨。

1.2　样品特征

研究区内样品岩性为细粒二长花岗岩（13GW204）（图 2），细粒半自形结构，块状构造。主要矿物为碱性长石（35% ±）+ 斜长石（35% ±）+ 石英（25% ±）+ 暗色矿物（5% ±）。碱性长石，主要为微斜长石、条纹长石以及正长石，呈半自形板状-板柱状，粒径约为 0.25 ~ 1.0 mm，发生高岭土化蚀变；斜长石，呈半自形板柱状，粒径约为 0.25 ~ 1.0 mm，最高干涉色为一级灰白，发育聚片双晶，发生绢云母化蚀变；石英，呈他形，粒径约为 0.25 ~ 0.5 mm，表面干净，具有一级黄白最高干涉色；暗色矿物主要为角闪石和黑云母。副矿物主要为锆石、磁铁矿、磷灰石、榍石等矿物。

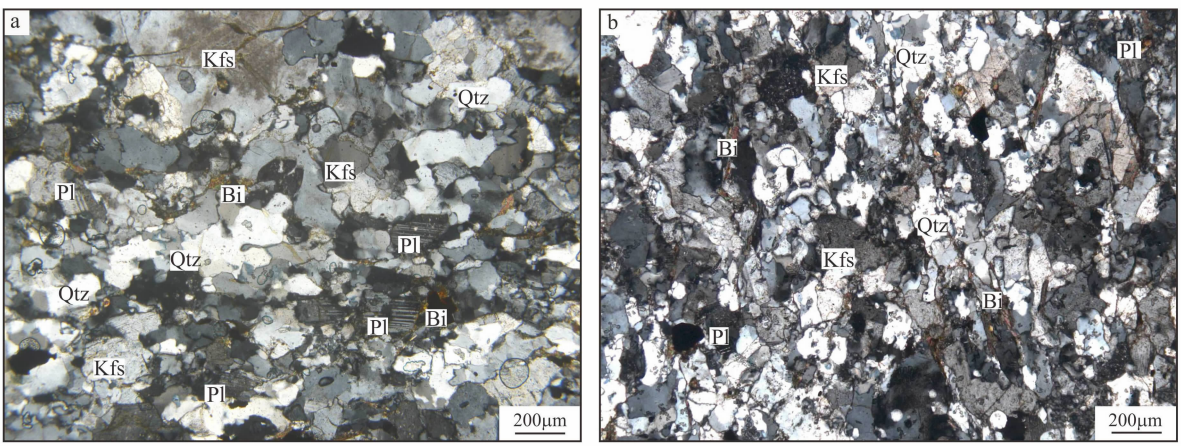


图 2　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩的镜下显微照片

Fig. 2　Microphotograph of Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

2　样品制备及分析方法

本次选用样品的锆石分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。样品靶的制备和透射光、反射光以及阴极发光（CL）照片的采集分别在中国地质大学（北京）科学研究院地质过程与矿产资源国家重点实验室和北京大学物理学院电镜室完成。锆石 U-Pb 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室完成。本次实验使用 Nepture 多接收电感耦合等离子质谱仪（LA-ICP-MS）、Agilent 7500a 型四级杆电感耦合等离子体质谱仪（Q-ICP-MS）和 193 nm 激光取样系统进行锆石 U-Pb 同位素测年分析。实验过程中采用高纯度氦气（He）作为剥蚀物质的载气，激光脉冲频率为 8 Hz，测试点的激光束斑直径为 36 μm，能量密度为 15 J/cm^2。使用哈佛大学国际标准锆石 91500 作为标准，GJ-1 作为未知样品对测试结果进行监控，采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 NIST610 进行仪器最佳化。普通铅校正采用 Anderson[29]的方法，锆石 U-Pb 同位素比值及元素含量采用 Glitter（ver. 4.4，Macquarie University）程序进行处理，年龄计算采用国际标准程序 Isoplot/Ex（3.0）。

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析的基础上，对样品进行了锆石微区 Hf 同位素分析测定。本次锆石微区 Hf 同位素测定实验在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室完成。实验过程中使用 193 nm 激光取样系统与 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪联用进行 Lu-Hf 同位素分析。实验过程中采用高纯度氦气（He）作为剥蚀物质的载气，激光束斑直径为 63 μm，激光脉冲宽度为 15 ns。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 和模式年龄计算中，现今球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 和 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 分别采用 0.033 2、0.282 772 和 0.038 4、0.283 25[30]，二阶段模式年龄采用平均地壳的 f_{cc}（-0.548）[31] 进行计算。

全岩主、微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱（XRF）玻璃熔片法，分析精度和准确度 >5%。微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法（ICP-MS），分析精度和准确度一般 >10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

本文对研究区内 1 件花岗岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析。CL 图像显示样品 13GW204 的锆石呈自形-半自形短柱状-板状，具有结构清晰的振荡生长环带和较高的 Th/U 比值（0.18 ~ 1.21），指示其为典型岩浆成因锆石[32,33]（图 3）。LA-ICP-MS 测试结果如表 1 和图 4 所示。

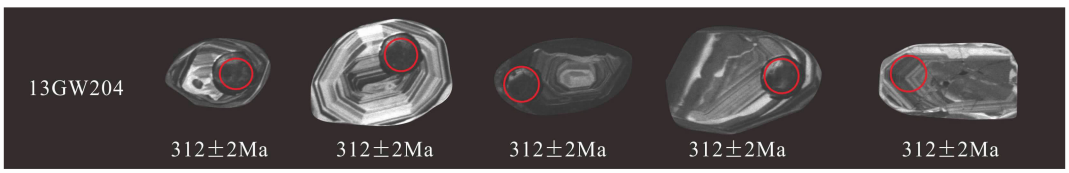


图 3 雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩锆石 CL 图像

Fig. 3 Zircon CL images of Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

表 1 雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

测点号	Th 含量/10⁻⁶	U 含量/10⁻⁶	Th/U	同位素比值 ±1σ						年龄/Ma ±1σ					
				$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
13GW204 01	166	211	0.79	0.053 55	0.002 60	0.368 55	0.016 69	0.049 99	0.001 03	352	65	319	12	314	6
13GW204 02	254	244	1.04	0.052 55	0.002 02	0.359 87	0.012 92	0.049 74	0.000 82	309	52	312	10	313	5
13GW204 03	210	1 343	0.16	0.056 46	0.001 54	0.370 72	0.009 25	0.047 69	0.000 65	471	32	320	7	300	4
13GW204 04	83	85	0.98	0.054 14	0.003 59	0.371 78	0.023 03	0.049 87	0.001 33	377	91	321	17	314	8
13GW204 05	193	370	0.52	0.054 45	0.004 23	0.370 68	0.027 03	0.049 44	0.001 49	390	110	320	20	311	9
13GW204 06	17	237	0.07	0.054 02	0.003 10	0.368 85	0.019 79	0.049 59	0.001 14	372	79	319	15	312	7
13GW204 07	68	188	0.36	0.054 16	0.002 28	0.371 73	0.014 62	0.049 84	0.000 89	378	56	321	11	314	5
13GW204 08	151	341	0.44	0.054 37	0.001 45	0.370 11	0.009 12	0.049 42	0.000 63	386	33	320	7	311	4
13GW204 09	215	292	0.74	0.053 22	0.001 56	0.404 58	0.011 18	0.055 19	0.000 70	338	40	345	8	346	4
13GW204 10	193	219	0.88	0.056 68	0.001 91	0.389 37	0.012 05	0.049 87	0.000 79	479	41	334	9	314	5
13GW204 11	158	193	0.82	0.054 99	0.002 44	0.380 86	0.015 61	0.050 27	0.000 99	412	57	328	11	316	6
13GW204 12	87	123	0.70	0.057 14	0.002 93	0.388 88	0.018 53	0.049 40	0.001 08	497	67	334	14	311	7
13GW204 13	157	222	0.71	0.052 38	0.002 12	0.358 83	0.013 50	0.049 72	0.000 88	302	54	311	10	313	5
13GW204 14	13	427	0.03	0.052 87	0.001 31	0.363 43	0.008 34	0.049 88	0.000 61	323	30	315	6	314	4
13GW204 15	316	240	1.31	0.052 19	0.001 44	0.360 86	0.009 22	0.050 17	0.000 65	294	35	313	7	316	4
13GW204 16	251	266	0.94	0.053 67	0.001 47	0.414 15	0.010 70	0.055 98	0.000 67	357	37	352	8	351	4
13GW204 17	369	1 192	0.31	0.060 14	0.001 02	0.408 15	0.006 20	0.049 23	0.000 50	609	17	348	4	310	3
13GW204 18	102	143	0.71	0.053 49	0.002 39	0.371 55	0.015 46	0.050 38	0.000 96	350	60	321	11	317	6
13GW204 19	59	45	1.31	0.054 29	0.004 15	0.369 66	0.026 58	0.049 39	0.001 44	383	109	319	20	311	9

样品 13GW204（采样位置坐标：47°42′38.9″N，122°24′20.1″E）岩性为二长花岗岩，对其锆石进行了 19 个测点分析。其中测试点 13GW204-09 和 13GW204-16 的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分别为（346 ±4）Ma 和（351 ±4）Ma，可能为捕获的早期岩浆锆石。另外 17 个测试点集中分布在谐和线上，LA-ICPMS 测试结果显示这 17 个测点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 317 ~300 Ma 之间，加权平均年龄为（312 ±2）Ma（n =17，MSWD =0.78）。

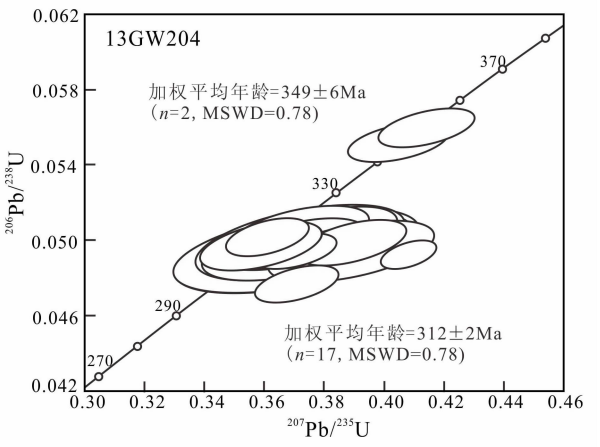


图 4　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩的锆石 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄谐和图

Fig. 4　Zircon U-Pb concordia diagram of Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

3.2　岩石地球化学特征

雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩具有高硅、高碱、高铝、低铁、低镁、低钙的地球化学特征。SiO_2 含量为 75.16% ~ 75.32%，全碱（K_2O + Na_2O）含量为 8.45% ~8.76%，Al_2O_3 含量变化于 13.84% ~ 14.16%，TFe_2O_3 含量为 0.52% ~ 0.76%，MgO 含量为 0.12% ~0.14%，CaO 含量变化于 0.25% ~0.32%（表 2）。所有样品在 TAS 分类图[34]中均落入亚碱性系列花岗岩范围内（图 5a），并且都具有高钾钙碱性系列特征[35]（图 5b）。另外这些样品的铝饱和指数（A/CNK 值）变化于 1.09 ~ 1.17 之间，为过铝质岩石[36]（图 5c）。

雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩样品的稀土元素总量偏低（∑REE 为 57.30×10^{-6} ~ 80.96×10^{-6}）（表 2）。稀土元素球粒陨石标准化模式图[37]显示样品具有整体轻微右倾配分模式（图 6a），$(La/Yb)_N$ = 1.26 ~ 2.42，样品具有中等铕负异常（Eu/Eu^* = 0.60 ~ 0.79）。样品在微量元素原始地幔标准化蛛网图[38]具有相似的分布形式，

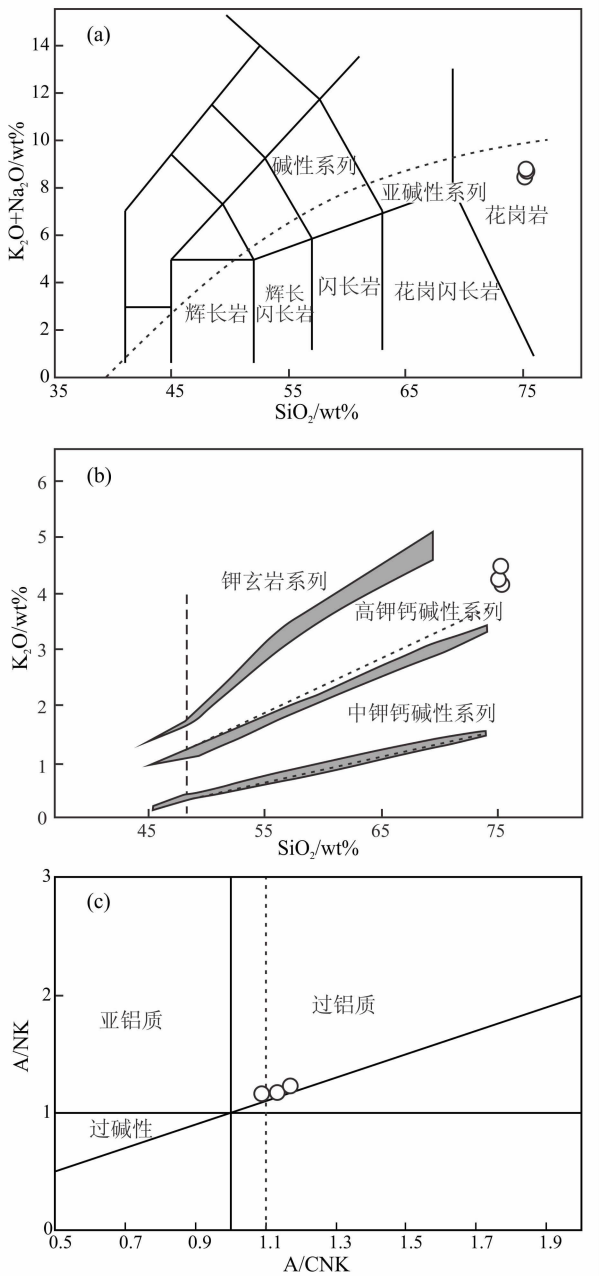


图 5　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩（Na_2O + K_2O）-SiO_2（a）、SiO_2-K_2O（b）和 A/NK-A/CNK（c）图解[34-36]

Fig. 5　Plots of total alkali versus SiO_2（TAS）（a），SiO_2 versus K_2O（b）diagrams and A/NK versus A/CNK（c）for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

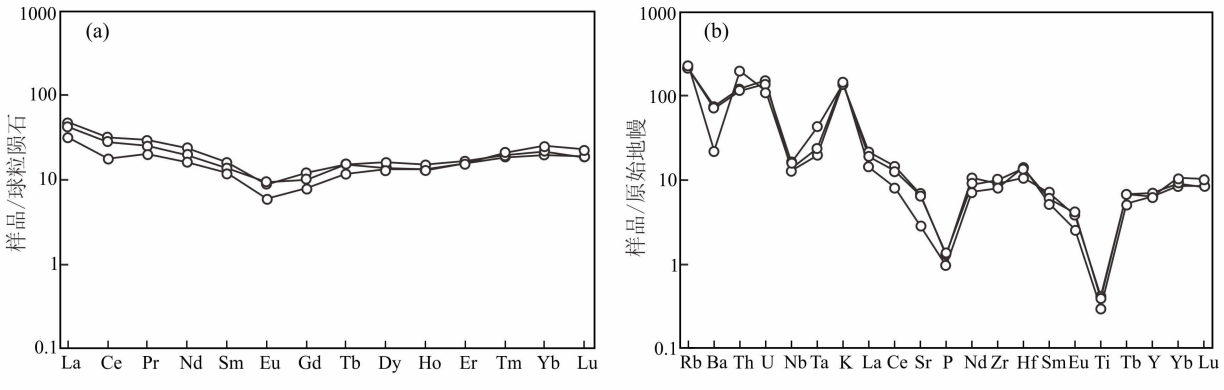


图 6 雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解[37]（a）和微量元素原始地幔标准化蛛网图[38]（b）

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider (b) diagrams for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

表 2 雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩主量元素（w_B/%）和微量元素（w_B/10^{-6}）分析结果

Table 2 Major (w_B/%) and trace element (w_B/10^{-6}) data for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

样品号	13GW204	13GW203	13GW205	样品号	13GW204	13GW203	13GW205
SiO_2	75.16	75.32	75.27	Cs	2.47	2.80	3.29
TiO_2	0.09	0.09	0.07	Ba	526.00	505.00	154.00
Al_2O_3	14.16	14.07	13.84	La	15.00	13.20	9.88
Fe_2O_3	0.64	0.52	0.76	Ce	26.10	22.80	14.50
FeO	0.48	0.15	0.26	Pr	3.63	3.06	2.47
MnO	0.04	0.02	0.10	Nd	14.40	12.00	9.80
MgO	0.12	0.14	0.12	Sm	3.17	2.70	2.34
CaO	0.32	0.25	0.46	Eu	0.65	0.70	0.44
Na_2O	4.22	4.53	4.29	Gd	3.15	2.62	2.06
K_2O	4.23	4.17	4.47	Tb	0.73	0.73	0.57
P_2O_5	0.03	0.03	0.02	Dy	4.46	5.20	4.27
LOI	0.68	0.83	0.59	Ho	0.95	1.08	0.94
Total	99.67	99.97	99.99	Er	3.32	3.47	3.31
A/CNK	1.61	1.57	1.50	Tm	0.60	0.63	0.69
A/NK	1.68	1.62	1.58	Yb	4.18	4.55	5.27
$K_2O + Na_2O$	8.45	8.70	8.76	Lu	0.62	0.61	0.76
V	5.06	5.06	6.10	Hf	3.28	4.30	4.37
Cr	3.89	1.68	1.17	Ta	0.82	1.77	0.98
Co	0.53	0.45	0.23	Pb	34.40	27.30	40.40
Ni	2.09	1.67	1.42	Th	10.40	9.86	17.10
Cu	4.64	2.58	0.86	U	3.20	2.92	2.41
Ga	17.80	18.70	19.80	δEu	1.04	0.88	0.73
Rb	133.00	137.00	147.00	$(La/Yb)_N$	2.42	1.96	1.26
Sr	146.00	138.00	60.90	$(Gd/Lu)_N$	0.63	0.53	0.34
Y	29.00	31.90	28.90	Zr/Hf	31.10	26.28	20.50
Zr	102.00	113.00	89.60	Nb/Ta	11.17	6.61	9.95
Nb	9.16	11.70	9.79	Rb/Sr	0.91	0.99	2.41

富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素，亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素以及 P 元素（图 6b）。

3.3　锆石 Hf 同位素特征

雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩（样品 13GW204）共分析了 19 个锆石分析点。样品 13GW204 的岩浆锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282 687 ~ 0.282 857，ε_{Hf} 为较高的正值（+3.5 ~ +9.5），Hf 二阶段模式年龄（t_{DM2}）为 1 103 ~ 715 Ma。锆石 Lu-Hf 同位素分析测试结果见表 3 和图 7[39]。

4　讨论

4.1　花岗岩的形成时代

大兴安岭地区在古生代经历了复杂的构造演化历史[16,40]，因此探讨晚古生代岩石的形成时代对于研究兴安地块与松嫩地块间的拼贴历史乃至兴蒙造山带的演化都具有重要的研究意义。为此，本文对大兴安岭中北段雅尔根楚地区晚古生代花岗岩进行了锆石 U-Pb 同位素分析，以探讨研究区内晚古

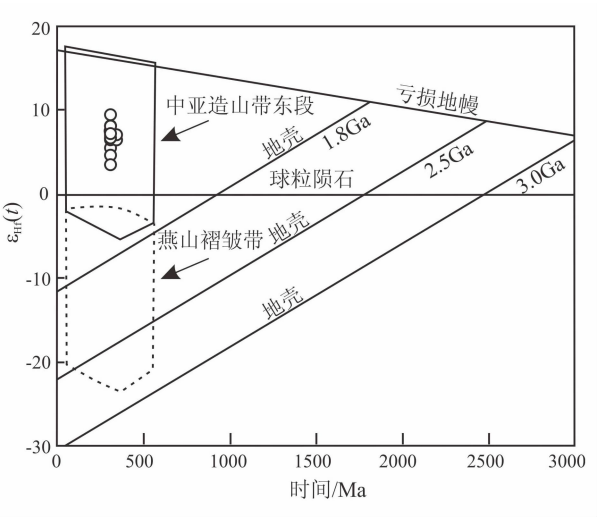


图 7　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ - T 图解[39]

Fig. 7　Plot of $\varepsilon_{Hf}(t)$ versus T for zircons from Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

表 3　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3　Zircon Hf isotopic data for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

样品号	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	2σ	T_{DM1} (Hf)	T_{DM2} (Hf)	$f_{Lu/Hf}$
13GW204 01	312	0.021 052	0.000 839	0.282 795	0.000 024	0.8	7.5	0.8	645	741	-0.97
13GW204 02	312	0.055 211	0.002 182	0.282 747	0.000 030	-0.9	5.5	1.1	738	842	-0.93
13GW204 03	312	0.029 164	0.001 289	0.282 773	0.000 023	0.0	6.6	0.8	684	786	-0.96
13GW204 04	312	0.022 493	0.000 888	0.282 788	0.000 023	0.6	7.2	0.8	656	755	-0.97
13GW204 05	312	0.044 434	0.001 705	0.282 718	0.000 027	-1.9	4.6	0.9	772	891	-0.95
13GW204 06	312	0.020 428	0.000 876	0.282 812	0.000 024	1.4	8.1	0.8	621	711	-0.97
13GW204 07	312	0.033 694	0.001 351	0.282 795	0.000 029	0.8	7.4	1.0	654	748	-0.96
13GW204 08	312	0.024 776	0.000 989	0.282 768	0.000 023	-0.1	6.5	0.8	685	792	-0.97
13GW204 09	349	0.052 788	0.002 067	0.282 751	0.000 031	-0.7	6.5	1.1	731	825	-0.94
13GW204 10	312	0.084 952	0.003 333	0.282 814	0.000 022	1.5	7.7	0.8	662	734	-0.90
13GW204 11	312	0.036 471	0.001 361	0.282 794	0.000 028	0.8	7.4	1.0	656	750	-0.96
13GW204 12	312	0.045 872	0.001 769	0.282 687	0.000 028	-3.0	3.5	1.0	817	948	-0.95
13GW204 13	312	0.062 404	0.002 182	0.282 786	0.000 030	0.5	6.9	1.1	682	772	-0.93
13GW204 14	312	0.050 345	0.001 741	0.282 857	0.000 031	3.0	9.5	1.1	572	639	-0.95
13GW204 15	312	0.026 856	0.001 108	0.282 796	0.000 029	0.8	7.5	1.0	649	743	-0.97
13GW204 16	349	0.028 036	0.001 083	0.282 761	0.000 028	-0.4	7.1	1.0	697	795	-0.97
13GW204 17	312	0.031 912	0.001 234	0.282 812	0.000 029	1.4	8.0	1.0	627	714	-0.96
13GW204 18	312	0.050 504	0.001 926	0.282 776	0.000 028	0.2	6.6	1.0	691	787	-0.94
13GW204 19	312	0.048 673	0.001 886	0.282 793	0.000 027	0.8	7.2	0.9	666	756	-0.94

生代构造岩浆演化。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试，得出研究区内二长花岗岩形成于（312±3）Ma，表明其是晚石炭世岩浆作用的产物。Dong[1]根据大兴安岭北段晚古生代兴安杂岩体的年代学与地球化学研究，报道大兴安岭新沙力岩体、新南沟岩体、小南沟岩体以及二十号岩体分别形成于358 Ma、308 Ma、309～308 Ma 以及 294 Ma，暗示大兴安岭地区晚古生代岩浆作用频繁。结合近年来已发表的高精度年龄数据[8,28,41-45]，推断大兴安岭晚古生代经历了广泛的构造-岩浆作用。而且大兴安岭及其邻区分布有与这些晚古生代侵入岩相对应的同时期火山岩及沉积岩[5,11,12,46-49]，反映大兴安岭晚古生代存在持续的构造-岩浆作用。此外，许文良等[50]报道大兴安岭晚古生代的岩浆作用持续了约140 Ma，进一步证实了笔者对大兴安岭晚古生代构造-岩浆作用的推断。近年来的研究表明大兴安岭及其邻区在晚古生代存在成矿作用[51-53]，说明晚古生代不仅是大兴安岭地区构造-岩浆作用的重要时期，也是其发生规模性成矿作用的时期。

4.2 岩石成因

大兴安岭雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩具有高硅、高碱、高铝、低铁、低镁、和低钙的特点，并且富集轻稀土元素和大离子亲石元素，亏损重稀土元素和高场强元素，具有中等程度的铕负异常（$Eu/Eu^{*}=0.73\sim1.04$），这些地球化学特征均暗示新南沟岩体的形成与下地壳岩石的部分熔融有关[54-59]。此外，新南沟岩体 Nb/Ta 与 Zr/Hf 比值分别介于 6.61～11.17 和 20.50～31.10 之间，与原始地幔的相应值 17.8 和 37[60]相差较大，与地壳的相应值 11.4 和 33[61]较为接近。Rb/Sr 值变化于 0.91～2.41 之间，Ti/Y 值和 Ti/Zr 值分别变化于 13.48～18.39 和 4.35～5.23 之间，均位于壳源岩浆[62,63]，证实大兴安岭雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩是下地壳岩石部分熔融的产物。同时根据锆石 Hf 同位素分析数据（表3）可知，雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩中的锆石具有较高的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值（0.282 687～0.282 857）和正 ε_{Hf} 值（+3.5～+9.5），锆石 t_{DM2} 介于 1 103～715 Ma 之间，反映其源区物质主要是新元古代期间从亏损地幔中新增生的地壳物质。

此外，雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩具有中等程度的铕负异常和 P、Ti 等元素强烈亏损的特征[64]，张旗和李承东[65]的研究表明具有贫 Sr 富 Yb 的花岗岩（Sr 变化于 $40\times10^{-6}\sim400\times10^{-6}$ 之间、$Yb>1.5\times10^{-6}$），源区残留相主要为斜长石和角闪石，雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩具有贫 Sr 富 Yb（分别为 $60.9\times10^{-6}\sim146.0\times10^{-6}$、$4.18\times10^{-6}\sim5.27\times10^{-6}$）的特征，暗示岩浆源区在部分熔融过程中要有斜长石作为残留相，其次为角闪石、磷灰石和钛铁矿。此外，研究区晚石炭世二长花岗岩出现角闪石、黑云母和磁铁矿等特征矿物，并且具有高硅、高碱、高铝、低铁、低镁和低钙的地球化学特征，这些岩石学与地球化学特征与“I”型花岗岩非常相似[66]。但在 A/CNK-A/NK 图解中（图5c），研究区花岗岩样品普遍表现为过铝质特征，这可能与岩浆的分异作用，导致 CaO 含量偏低，从而造成岩石的 A/CNK 比值偏高有关。Bea[67]曾提出岩石的 P_2O_5 含量是比铝饱和指数（A/CNK）更好地判别原始岩浆性质的指标。因此，笔者认为雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩为“I”型花岗岩。

综上认为，大兴安岭雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩为“I”型花岗岩，原始岩浆起源于新元古代期间从亏损地幔中新增生的下地壳物质的部分熔融，源区部分熔融残留物中可能存在斜长石、角闪石、磷灰石和钛铁矿。

4.3 地质意义

晚古生代岩浆岩在大兴安岭地区较为发育，其形成的构造环境与兴安地块和松嫩地块间的碰撞拼合历史相关联，关于这些晚古生代岩浆岩的形成环境一直存在着较大的争议，是形成于俯冲环境？伸展环境？还是其他的构造环境？而造成这种争论的主要原因是由于缺少准确厘定贺根山—嫩江—黑河缝合带的闭合时间。大多数学者认为索伦—嫩江—黑河缝合带在二叠纪之前已经闭合，依据是沿缝合带发育 290～260 Ma 的 A 型花岗岩，但是经研究发现这些 A 型花岗岩可能不是造山后伸展作用的产物，可能与俯冲板片的断离作用有关[8]。Dong[1]的研究显示大兴安岭北段博克图地区存在一套与俯冲作用有关的杂岩（358～294 Ma），暗示着兴安地块与松嫩地块在早二叠世还未碰撞拼合。这一推论得也到了 Miao[4,68]和尚庆华[69]的支持。Miao[4]报道了“新开岭群”构造片岩的原岩年龄（292±6 Ma），其原岩为一套中酸性火成岩，

并且原岩的形成与岛弧建造有关。此外，Miao[68]的研究显示贺根山辉长岩的形成时代为 298 ~ 290 Ma（SHRIMP），尚庆华[69]在内蒙中部二叠纪地层中发现了放射虫化石，这些研究都表明兴安地块与松嫩地块在早二叠世还未碰撞拼合。本文年代学与地球化学数据也为兴安地块与松嫩地块在早二叠世还未碰撞拼合的观点提供支持，研究区二长花岗岩形成于晚石炭世，属于高钾钙碱性系列，富集轻稀土元素和大离子亲石元素，亏损重稀土元素和高场强元素，这些地球化学特征都与活动大陆边缘花岗岩属性相似。在 Pearce[70]的构造环境判别图上，研究区雅尔根楚地区均落在岛弧火山岩区域（图 8）。综上，笔者推断晚石炭世雅尔根楚二长花岗岩形成于活动大陆边缘环境，大兴安岭地区在早石炭世—早二叠世处于持续俯冲环境，即兴安地块与松嫩地块间的古亚洲洋在早二叠世前还未碰撞拼合。

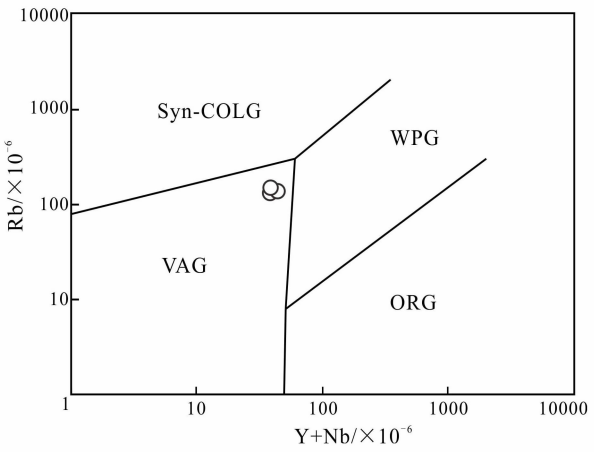


图 8　雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩的构造判别图解[63]

Fig. 8　Tectonic setting discrimination diagram for Late Carboniferous monzogranites in Yaergenchu Region

5　结论

（1）大兴安岭雅尔根楚地区二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为（312 ± 3）Ma，即该地区二长花岗岩形成于晚石炭世。

（2）大兴安岭雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩为“I”型花岗岩，其原始岩浆起源于新元古代增生的下地壳物质的部分熔融。

（3）大兴安岭雅尔根楚地区晚石炭世二长花岗岩形成于活动大陆边缘环境。

致谢：感谢中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室杨进辉研究员以及实验室工作人员在锆石 U-Pb-Hf 同位素分析测试中给予的帮助和支持；感谢核工业北京地质研究院分析测试中心实验室工作人员在主、微量元素测试中给予的帮助与支持。

参考文献：

[1] Dong Y, Ge W C, Yang H, et al. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopes of Jurassic intermediate-acidic intrusions in the Xing'an Block, northeastern China: petrogenesis and implications for subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 118: 11-31.

[2] Nozaka T, Liu Y. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implication for the tectonic evolution of northern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 202 (1): 89-104.

[3] Chen B, Jahn B M, 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.

[4] Miao L C, Fan W M, Zhang F Q, et al. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing - Kele complex in the northwestern Lesser Xing' an Range, and its geological implications [J]. Chinese Science Bullettin, 2004, 49 (2): 201-209.

[5] Li Y, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs [J]. Lithos, 2014, 205: 394-410.

[6] Hong D W, Chang W J, Huang H Z, et al. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1994, 10 (3/4): 169-176.

[7] 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，2000，20：2217-2222.
SUN De-you, WU Fu-yuan, LI Hui-min, et al. Emplace-

ment age of the post-orogenic A-type granites in Northwestern Lesser Xing'an Range, and its relationship to the eastward extension of Suolunshan – Hegenshan – Zhalaite collisional suture zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 20: 2217-2222.

[8] 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.

[9] 周长勇, 吴福元, 葛文春, 等. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (3): 763-775.
ZHOU Chang-yong, WU Fu-yuan, GE Wen-chun, et al. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe, northern Da Hinggan Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1): 763-775.

[10] 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, 4: 384-389.
SHI Guang-hai, MIAO Lai-cheng, ZHANG Fu-qin, et al. The age and its district tectonic implications on the Xilinhot A-type granites, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 4: 384-389.

[11] 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 等. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩: 年代学及地球化学证据 [J]. 岩石学报, 2010a, 26 (11): 3245-3258.
ZHAO Zhi, CHI Xiao-guo, LIU Jian-feng, et al. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: chronological and geochemical evidence [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010a, 26 (11): 3245-3258.

[12] 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-MS U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2010b, 26 (8): 2452-2464.
ZHAO Zhi, CHI Xiao-guo, PAN Shi-yu, 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, 2010b, 26 (8): 2452-2464.

[13] 崔芳华, 郑常青, 徐学纯, 等. 大兴安岭全胜林场地区晚石炭世岩浆活动研究: 对兴安地块与松嫩地块拼合时间的限定 [J]. 地质学报, 2013, 87 (9): 1247-1263.
CUI Fang-hua, ZHENG Chang-qing, XU Xue-chun, et al. Late Carboniferous magmatic activities in the Quanshenglinchang Area, Great Xing'an Range: constrains on the timing of amalgamation between Xing'an and Songnen massifs [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (9): 1247-1263.

[14] 陈斌, 赵国春, Wilde S. 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]. 地质评论, 2001, 47 (4): 361-367.
CHEN Bin, ZHAO Guo-chun, Wilde S. Subduction and collision related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implications [J]. Geological Review, 2001, 47 (4): 361-367.

[15] 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等. 小兴安岭西北部新开岭—科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义 [J]. 科学通报, 2003, 48 (22): 2315-2323.
MIAO Lai-cheng, FAN Wei-ming, ZHANG Fu-qin, et al. SHRIMP zircon geochronology and its implications on the Xingkai – Keluo complex, Northwestern of Lesser Xing'an Range [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (22): 2315-2323.

[16] Sengör 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.

[17] Robinson P T, Zhou M F, Hu X F, et al. Geochemical constraints on the origin of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17 (4): 423-442.

[18] 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用 [J]. 岩石学报, 2001, 17 (1): 161-168.
GUO Feng, FAN Wei-ming, WANG Yue-jun, et al. Petrogenesis of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Southern Da Hinggan Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (1): 161-168.

[19] 吴华英, 张连昌, 周新华, 等. 大兴安岭中段晚中生代安山岩年代学和地球化学特征及成因分析 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (6): 1339-1352.
WU Hua-ying, ZHANG Lian-chang, ZHOU Xin-hua, et al. Geochronology and geochemical characteristics of the Late Mesozoic andesites in the central Da-Hinggan Mountains, and its genesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (6): 1339-1352.

[20] 张吉衡. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究: 博士学位论文 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
ZHANG Ji-heng. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range,

Northeastern China: doctor's degree thesis [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.

[21] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China [J]. Gondwana Research, 2016, 31: 218-240.

[22] 徐公愉. 大兴安岭的大陆火山岩及其矿化作用 [J]. 中国区域地质, 1983, 5: 39-50.
XU Gong-yu. Continental volcanic rocks in the Greater Khingan mountains and their mineralization [J]. Regional Geology of China, 1983, 5: 39-50.

[23] 赵国龙, 杨桂林, 王忠, 等. 大兴安岭中南部中生代火山岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-252.
ZHAO Guo-long, YANG Gui-lin, WANG Zhong, et al. Mesozoic volcanic rocks in middle-south Da-Hinggan Mountains [M]. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1989: 1-252.

[24] Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China [J]. Lithos, 2008, 102 (1): 138-157.

[25] Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: implications for subduction-induced delamination [J]. Chemical Geology, 2010, 276 (3): 144-165.

[26] 田德欣, 王清海, 葛文春, 等. 内蒙古阿尔山绿水碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义 [J]. 世界地质, 2013, 32 (4): 681-693.
TIAN De-xin, WANG Qing-hai, GE Wen-chun, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of Lüshui alkali feldspar granites in Arshan, Inner Mongolia and their tectonic implications [J]. Global Geology, 2013, 32 (4): 681-693.

[27] 王雄, 陈跃军, 李勇, 等. 大兴安岭中北段塔尔气地区早白垩世白音高老组火山岩地球化学特征及意义 [J]. 世界地质, 2015, 34 (1): 25-33.
WANG Xiong, CHEN Yue-jun, LI Yong, et al. Geochemical characteristics and geological implication of volcanic rocks in Early Cretaceous Baiyingaolao Formation from Taerqi area, middle-north part of Da Hinggan mountains [J]. Global Geology, 2015, 34 (1): 25-33.

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

[29] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.

[30] Blichert T 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): 243-258.

[31] Veevers J J, Saeed A, Belousova E A, et al. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton [J]. Earth-Science Reviews, 2005, 68 (3/4): 245-279.

[32] Koschek G. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon [J]. Journal of Microscopy, 1993, 171 (3): 223-232.

[33] Belousova E A, Griffin W L, O'eilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143 (5): 602-622.

[34] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.

[35] 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: 63-81.

[36] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of American Bulletin, 1989, 101: 635-643.

[37] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C] //Henderson P. Rare Earth Elements Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.

[38] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42 (1): 313-345.

[39] Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constrains on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246 (3/4): 336-352.

[40] Sengör A M C, Natal'in B A. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust [J]. An-

nual Review of Earth and Planetary Sciences, 1996, 24 (1): 263-337.

[41] 佘宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (2): 571-594.
SHE Hong-quan, LI Jin-wen, XIANG An-ping, et al. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 571-594.

[42] 隋振民, 葛文春, 徐学纯, 等. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2009, 25 (10): 2679-2686.
SUI Zhen-min, GE Wen-chun, XU Xue-chun, et al. Characteristics and geological implications of the Late Paleozoic post-orogenic Shierzhan granite in the Great Xing'an Range [J]. Acta Petrological Sinica, 2009, 25 (10): 2679-2686.

[43] 张健, 陈井胜, 李洎洋, 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, 30 (4): 521-531.
ZHANG Jian, CHEN Jing-sheng, LI Bo-yang, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Late Paleozoic granites in Taerqi area, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2011, 30 (4): 521-531.

[44] 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.

[45] 周长勇, 吴福元, 葛文春, 等. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (1): 763-775.
ZHOU Chang-yong, WU Fu-yuan, GE Wen-chun, et al. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe, northern Da Hinggan Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1): 763-775.

[46] 杨现力. 扎兰屯浅变质岩系地质特征及碎屑锆石年代学研究: 硕士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
YANG Xian-li. Geological characteristics and study of detrital ziron geochronology of epimetamorphic rock series in Zhalantun area: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[47] 曾维顺, 周建波, 张兴洲, 等. 内蒙古科右前旗大石寨组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其形成背景 [J]. 地质通报, 2011, 30 (2/3): 270-277.
ZENG Wei-shun, ZHOU Jian-bo, ZHANG Xing-zhou, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the volcanic rocks from the Dashizhai Formationin Keyouqianqi, Inner Mongolia, China and its tectonic setting [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (2/3): 270-277

[48] 张健. 内蒙古东部大石寨组火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究: 硕士毕业论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
ZHANG Jian. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Dashizhai Fomation in eastern Inner Mongolia: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[49] 赵芝, 迟效国, 赵秀羽, 等. 大兴安岭北部红水泉组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42 (1): 126-135.
ZHAO Zhi, CHI Xiao-guo, ZHAO Xiu-yu, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircon from the Hongshui-quan Formation in the Northern Da Hinggan area and its tectonic significance [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42 (1): 126-135.

[50] 许文良, 孙德有, 尹秀英. 大兴安岭海西期造山带的演化: 来自花岗质岩石的证据 [J]. 长春科技大学学报, 1999, 29 (4): 319-323.
XU Wen-liang, SUN De-you, YIN Xiu-ying. Evolution of hercynian orogenic belt in Daxing'anling Mt: evidence from granitic rocks [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29 (4): 319-323.

[51] 范羽, 周涛发, 张达玉, 等. 中国钼矿床的时空分布及成矿背景分析 [J]. 地质学报, 2014, 88 (4): 784-804.
FAN Yu, ZHOU Tao-fa, ZHANG Da-yu, et al. Spatial and temporal distribution and metallogenic background of the Chinese Molybdenum Deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (4): 784-804.

[52] Perello J, Cox D, Garamjav D, et al. Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket [J]. Economic Geology, 2001, 96 (6): 1407-1428.

[53] 王守光, 黄占起, 苏新旭, 等. 一条值得重视的跨国

境成矿带：南戈壁—东乌旗铜多金属成矿带［J］. 地学前缘，2004，11（1）：249-255.
WANG Shou-guang，HUANG Zhan-qi，SU Xin-xu，et al. A notable metallogenic belt striding across the border between China and Mongolia：south gobi-dongwuqi copper-polymetallic metallogenic belt［J］. Earth Science Frontiers，2004，11（1）：249-255.

［54］ 张旗，王焰，潘国强，等. 花岗岩源岩问题：关于花岗岩研究的思考之四［J］. 岩石学报，2008，24（6）：1193-1204.
ZHANG Qi，WANG Yan，PAN Guo-qiang，et al. Sources of granites：some crucial questions on granite study（4）［J］. Acta Petrologica Sinica，2008，24（6）：1193-1204.

［55］ Tay S R，McLennan S M. The continental crust：its composition and evolution［M］. Oxford：Blackwell Scientific Publication，1985：132.

［56］ 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.

［57］ 吴福元，李献华，杨进辉，等. 花岗岩成因研究的若干问题［J］. 岩石学报，2007，23（6）：1217-1238.
WU Fu-yuan，LI Xian-hua，YANG Jin-hui，et al. Discussions on the petrogensis of granites［J］. Acta Petrologica Sinica，2007，23（6）：1217-1238.

［58］ Chappell B W，White A J R. Two contrasting granite types［J］. Pacific Geology，1974，8：173-174.

［59］ Roberts M P，Clemens J D. Origin of high-potassium，talc-alkaline，I-type granitoids［J］. Geology，1993，21（9）：825-828.

［60］ McDonough W F，Sun S S. The composition of the Earth［J］. Chemical Geology，1995，120（3/4）：223-253.

［61］ Taylor S R，McLennan S M. The continental crust：its composition and evolution［M］. Oxford：Oxford Press，1985：632-633.

［62］ Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins［C］// in：Hawkesworth C J，Norry M J（Eds.），Continental Basalts and Mantle Xenoliths，Nantwich. 1983：230-249.

［63］ Tischendorf G，Paelchen W. On the classification of granitoids［J］. Zeitschrift Fuer Geologische Wissenschaften，1985，13（5）：615-627.

［64］ Lightfoot P C，Hawkesworth C J，Sethna S F. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap：Sr，Nd and Pb isotope and trace element evidence［J］. Contributions to Mineralogy and Petrology，1987，95（1）：44-54.

［65］ 张旗，李承东. 花岗岩的地球动力学意义［M］. 北京：海洋出版社，2012：157-158.
ZHANG Qi，LI Cheng-dong. Granites：implications for continental geodynamics［M］. Beijing：Ocean Press，2012：157-158.

［66］ Chappell B W，White A J R. I-and S-type granites in the Lachlan fold belt［J］. Transactions of the Royal Society of Edinburgh：Earth Sciences，1992，83（1/2）：1-26.

［67］ Bea F，Fershtater G，Corretgé L G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminium［J］. Lithos，1992，29（1/2）：43-56.

［68］ Miao L C，Fan W M，Liu D Y，et al. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex：implications for latest age tectonic evolution of the Inner Mongolia–Daxinganling orogenic belt［J］. Asian Earth Science，2008，32（5/6）：348-370.

［69］ 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）：2613-2619.
SHANG Qing-hua. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol（Inner Mongolia）and their geological significance to the Northern China Orogen［J］. Chinese Science Bulletin，2004，49（24）：2613-2619.

［70］ Pearce J A，Harris N B W，Tindle A G，et al. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks［J］. Journal of Petrology，1984，25（4）：956-983.