

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2020.05.20

大兴安岭大洋山钼矿成矿岩体地球化学、 锆石 U-Pb 年龄及构造背景

杨元江¹, 李成禄¹, 邓昌州², 李文龙¹, 张立¹,
赵忠海³, 赵寒冬¹

(1. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081;
3. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 大洋山斑岩型钼矿位于大兴安岭东北部呼中区, 钼矿体主要产于石英二长斑岩体和上盘围岩中, 产状受石英二长斑岩体控制。通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得石英二长斑岩年龄为(119.83 ± 0.87) Ma, 可代表成矿年龄。岩石地球化学数据显示岩体偏铝、贫钛、富钾, 具钾玄岩特征, 为造山带岩石, 岩浆熔体未与地幔相互作用; 相对富集大离子亲石元素 Rb 和 K, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 和 HREE, 亲地幔元素亏损、轻稀土富集以及 Eu 中等亏损等特征显示岩浆源自陆壳。结合区域地质资料认为大洋山斑岩型钼矿形成于早白垩世晚期, 成矿物质来源为地壳的重熔, 与蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲闭合相关, 成矿环境为伸展构造背景。

关键词: 钼矿; 早白垩世; 地壳重熔; 大洋山; 大兴安岭; 蒙古-鄂霍茨克洋

中图分类号: P618.65; P588.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2020)05-1092-11

Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Tectonic Setting of the Granitoid Related with the Dayangshan Molybdenum Deposit, Daxinganling

YANG Yuanjiang¹, LI Chenglu¹, DENG Changzhou², LI Wenlong¹, ZHANG Li¹,
ZHAO Zhonghai³, ZHAO Handong¹

(1. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin, Heilongjiang 150036, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China;

3. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The Dayangshan molybdenum deposit is a newly discovered small deposit in the Huzhong area, northeast of Daxinganling. The ore is mainly hosted by the quartz-monzonite porphyry and hanging wall rock, and its occurrence is controlled by the quartz-monzonite porphyry. U-Pb dating of the quartz-monzonite porphyry using LA-ICP-MS yielded an age of (119.83 ± 0.87) Ma, indicating that the mineralization in the Dayangshan molybdenum deposit occurred in the Early Cretaceous. The geochemical data of the quartz-monzonite porphyry show that the rock is relatively enriched in Al ($Al_2O_3 = 15.04\% - 15.31\%$)

收稿日期: 2020-03-23; 改回日期: 2020-07-19; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 黑龙江省国土资源公益项目(GY-2018003); 黑龙江省地质矿产局科研项目(黑地矿科研2019-1); 辽宁省自然科学基金项目(2020-BS-258)。

作者简介: 杨元江, 男, 高级工程师, 1982年出生, 地质学专业, 主要从事地质矿产勘查工作。Email: geolj@qq.com。

通信作者: 赵忠海, 男, 副教授, 1984年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事区域地质调查及矿床学研究工作。Email: zhaozhonghai@lntu.edu.cn。

引用格式: 杨元江, 李成禄, 邓昌州, 等. 大兴安岭大洋山钼矿成矿岩体地球化学、锆石 U-Pb 年龄及构造背景 [J]. 现代地质, 2020, 34(5): 1092-1102.

YANG Yuanjiang, LI Chenglu, DENG Changzhou, et al. Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Tectonic Setting of the Granitoid Related with the Dayangshan Molybdenum Deposit, Daxinganling [J]. Geoscience, 2020, 34(5): 1092-1102.

and K($K_2O/Na_2O = 1.15 - 1.21$) and depleted in Ti($TiO_2 = 0.36\% - 0.39\%$) . These characteristics show that the quartz-monzonite porphyry is a potassic basaltic rock , which is normally formed in orogenic belt settings , and magmatic melts which produce these rocks do not interact with mantle. In addition , the rock is relatively enriched in LILEs (e. g. , Rb and K) , and depleted in HFSEs(e. g. , Nb , Ta , P , Ti and HREE) , depleted in mantlephilic elements , enriched in LREE ((La/Sm) $_N = 4.62 - 4.64$) , and with medium Eu value ($\delta Eu = 0.46 - 0.48$) , suggesting that it was crystallized from a magma originated from continental crust. Based on the regional geological data , we argue that the source of ore-forming material was derived from the remelted crust related to the subduction and closure of the Mongolia-Okhotsk Ocean , and the mineralization occurred in the extensional tectonic setting. The study supplemented the data of regional metallogenic regularity and provided basis for regional metallogenic prediction.

Key words: molybdenum deposit; Early Cretaceous; remelting of the crust; Dayangshan; Daxinganling; Mongolia-Okhotsk Ocean

0 引言

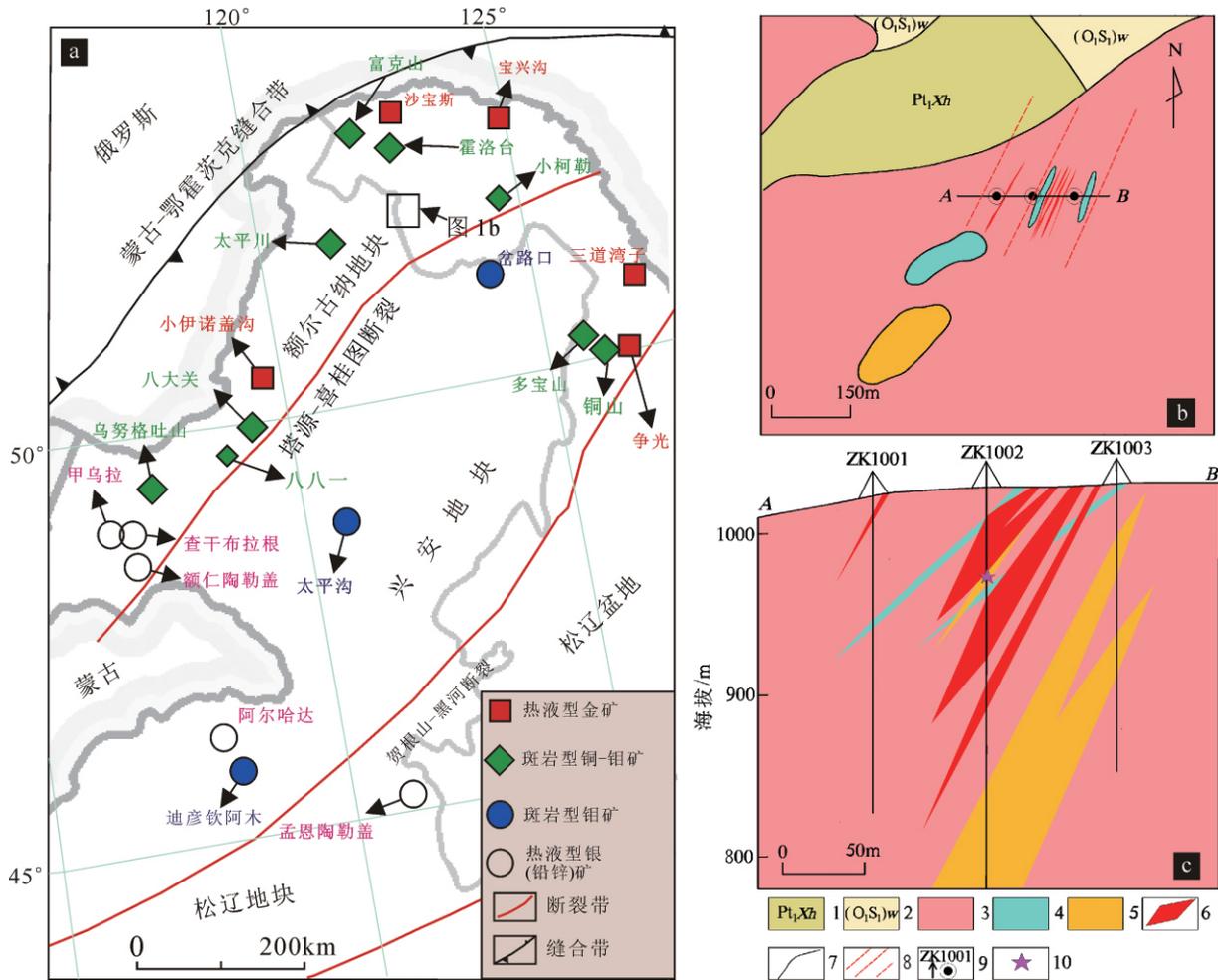
钼矿在我国属于优势矿种,人均占有量大于世界平均水平^[1]。中国东北额尔古纳地块位于兴安钼成矿带,探明钼资源量仅次于东秦岭钼矿带^[2-4]。大洋山钼矿地处额尔古纳地块东北段,是近年来开展中国地质调查局矿产远景调查评价项目时发现的一处小型钼矿床。矿区未开展有关成矿地质体的形成时代和岩石地球化学等方面的测试分析及研究工作,对成矿时代、成矿物质来源、构造背景等方面的认识不明确。本次研究通过开展与成矿有关地质体的岩石地球化学分析及锆石 U-Pb 同位素年龄测定,为解决大洋山钼矿的成矿时代、岩石成因、成矿构造背景等问题提供依据。

1 地质背景

额尔古纳地块位于中亚造山带东段,其北西边界是蒙古-鄂霍茨克缝合带^[5-8],南东边界是塔源-喜桂图断裂。构成额尔古纳地块基底的地层是古元古代的新华渡口岩群(Pt_1Xh),主要为二云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩等。古生代期间额尔古纳地块是西伯利亚板块和华北板块之间的古亚洲洋内的微陆块,地层主要为早奥陶世一早志留世倭勒根岩群((O_1S_1) w),岩群从下至上包括吉祥沟组((O_1S_1) j) 和大网子组((O_1S_1) d)。吉祥沟组主要岩性是一套海相变质地层,大网子组主要岩性为一套陆相火山沉积变质岩,反映研究区古生代经历了由海相向陆相沉积演化的地质过程,其间主要形成稀有稀土矿。随着古亚洲洋板

块俯冲消减,散布其中的微陆块包括额尔古纳地块和岛弧等拼贴、碰撞造山,伴随强烈的岩浆活动^[9-11]。额尔古纳地块在经历了古生代期间古亚洲洋的闭合之后^[12-13],中生代先后受到了蒙古-鄂霍茨克构造体系与太平洋构造体系的叠加影响^[14-18],成矿与蒙古-鄂霍茨克造山带的演化有密切的成因联系^[19-21],其间主要形成斑岩型钼、铜矿和热液型金、银(铅锌)矿,发现的内生金属矿床主要有乌努格吐、八大关、八八一及太平川等斑岩钼(铜)矿^[22-24],还有甲乌拉、查干不拉根、额仁陶勒盖等热液型银(铅锌)矿;另外还有小伊诺盖沟、沙宝斯、宝兴沟等热液型金矿床。近年来又陆续发现了小柯勒、富克山、霍洛台等斑岩型钼矿床^[25](图 1a)。

呼中地区位于额尔古纳地块东北段,向北距蒙古-鄂霍茨克缝合带 100~200 km,向东距太平洋东部俯冲带逾 1 000 km。自元古宙以来经历了漫长的沉积盖层发育和多期次构造岩浆活动,尤其燕山期构造岩浆活动更为频繁、强烈,对成矿起了重要作用。在多种有利的成矿条件下,形成了较丰富的斑岩型和热液型矿床。研究区出露的地层主要有古元古代兴华渡口岩群和早奥陶世一早志留世倭勒根岩群,分布于北部。侵入岩主要为早侏罗世二长花岗岩大面积分布,闪长玢岩、石英二长斑岩以岩株、岩枝状分布(图 1b)。石英二长斑岩是钻孔内发现的最大脉岩,目前控制厚度超过 100 m,侧伏方向与矿体一致,在 ZK1002 钻孔的石英二长斑岩中出现了区内最高的钼含量值 0.237%,矿体常与钾化和强硅化相伴生,蚀变组合和石英二长斑岩体可作为区内寻找钼矿的标



1. 新华渡口岩群; 2. 倭勒根岩群; 3. 早侏罗世二长花岗岩; 4. 闪长玢岩; 5. 石英二长斑岩; 6. 钼矿体; 7. 地质界线; 8. 糜棱岩带; 9. 钻孔; 10. U-Pb 年龄取样位置。

图1 大兴安岭北段主要金属矿床分布图(底图据文献 [25] 修改)和矿区地质图及 A-B 勘探线剖面图

Fig. 1 Distribution map of main metal deposits in the north of Daxinganling(modified after reference [25]), geological map of the mining area and exploration line profile from A to B

志。利用矿体蚀变特征与区域斑岩型钼矿床成矿地质特征的对比,认为大洋山钼矿的成矿类型为斑岩型,成矿地质体为石英二长斑岩。

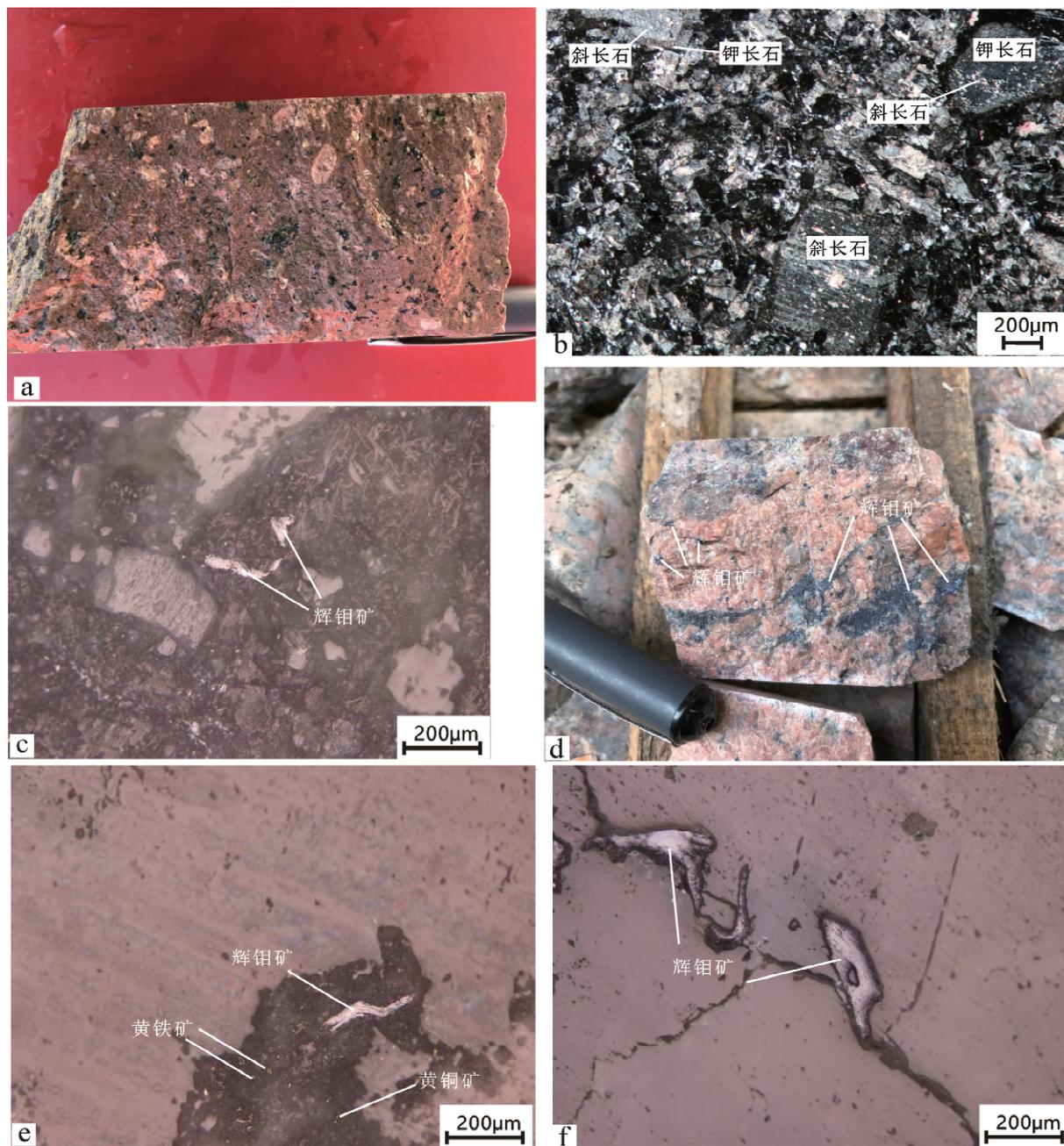
2 矿体及矿石特征

矿体在地表主要分布于糜棱岩化二长花岗岩中,钼矿体呈脉状、似层状近平行排列,脉体宽 1.0~4.0 m,走向 NNE。钼矿体由 ZK1002 钻孔和地表槽探工程一同控制(图 1c),主要产于石英二长斑岩体(图 2a-c)和上盘围岩中,产状受石英二长斑岩体控制,倾向东,倾角 45°~55°,最大厚度 38.0 m,矿体伴生强烈钾化和硅化(图 2d)。石英二长斑岩标本可见黑云母,未见白云母。镜下见磁铁矿和黑云母等富铁矿物,黑云母被绿泥石交代,含量 3%~5%。矿石矿物由辉钼矿组成,

主要有浸染状(图 2a)、星点状(图 2c,图 2e)和脉状(图 2f),镜下呈现灰白色,片状、板状,大小 0.08~0.23 mm,星散状分布。脉石矿物除透明矿物外,还包括黄铁矿、黄铜矿(图 2e)、磁铁矿等。

3 样品选取和分析

本次研究在 ZK1002 和 ZK1003 钻孔岩心中选取了 1 件锆石测年样品和 4 件全岩岩石化学分析样品。岩石化学分析选取新鲜的石英二长斑岩岩心,质量大于 2 kg,先破碎成 5~10 mm 的颗粒,再选取 50 g 样品用振动式碎样机碎至 200 目,用作化学成分分析测试,样品测试由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素分析采用波长色散 X 射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II),测试过程



a. 石英二长斑岩; b. 石英二长斑岩镜下照片; c. 石英二长斑岩中的辉钼矿; d. 钾化、硅化、糜棱岩化二长花岗岩中浸染状分布的辉钼矿; e. 硅质脉中的辉钼矿、黄铜矿等; f. 沿裂隙分布的辉钼矿。

图2 岩矿石标本及矿物镜下图像

Fig. 2 Rock & ore specimen and mineral photomicrographs

参照《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T 14506.28—2010)。全岩稀土微量元素测试利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,测试流程参考《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T14506.30—2010)。

在 ZK1002 钻孔的含矿石英二长斑岩中选取了 U-Pb 年龄测试样品,样品采集于新鲜的岩心,质量约 5 kg,在河北区域地质调查所实验室完成

锆石的挑选。流程为先做常规粉碎、磁选和重选,然后在双目镜下挑选晶形完好的锆石颗粒。锆石测试样品的制靶和 U-Pb 同位素分析由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。采用的主检设备为安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900),相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLasPro HD)。激光能量 80 mJ,频率 5 Hz,激光束斑直径 32 μm ^[26]。微量元素校正标准样品为 NIST 610,

同位素比值校正标准样品为 91500, 同位素比值监控标准样品为 GJ-1。以上样品均为国际标准物质, 推荐值引自 GeoRem。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

石英二长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试数据见表 1。由阴极发光图像显示(图 3), 锆石多

为自形, 粒径 90~200 μm , 呈现震荡环带, 大部分核部色调稍暗, 幔部明亮, 显示岩浆锆石的特征。锆石中 U/Th 比值为 0.86~2.04, 进一步表明锆石为岩浆成因。测定的谐和年龄变化范围为 $(116.4 \pm 1.2) \sim (125.0 \pm 2.0) \text{ Ma}$ (图 4(a)), 加权平均年龄为 $(119.83 \pm 0.87) \text{ Ma}$ ($n=33$, MSWD=2.2, 95% 置信度)(图 4(b)), 该年龄代表了石英二长斑岩的结晶年龄。

表 1 石英二长斑岩锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 Analysis of zircon U-Pb from quartz-monzonite porphyry

测点	Pb*/Th/ 10 ⁻⁶	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	²³⁸ U/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	1 σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄/Ma	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 比值	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 比值	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 比值	1 σ
1	2.99	77.5	137	1.805 8	117.31	7.4	119.78	2.3	124.44	4.2	0.049 3	0.004 0	0.122 5	0.008 2	0.018 8	0.000 4
2	11.21	371.5	467	1.292 4	124.18	4.9	124.94	1.4	120.49	2.8	0.048 7	0.002 1	0.130 1	0.005 5	0.019 6	0.000 2
3	3.30	79.0	152	1.946 4	122.08	8.0	121.10	2.0	118.61	4.6	0.049 7	0.003 7	0.127 8	0.008 8	0.019 0	0.000 3
5	10.15	439.2	395	0.911 8	125.6 6	5.8	122.89	1.3	121.03	2.7	0.049 7	0.002 4	0.131 7	0.006 5	0.019 2	0.000 2
6	5.57	192.2	233	1.246 6	126.35	5.9	123.46	1.8	122.08	3.2	0.050 0	0.002 6	0.132 5	0.006 6	0.019 3	0.000 3
7	9.77	369.0	398	1.149 6	118.99	5.2	122.36	1.6	127.02	3.3	0.047 5	0.002 4	0.124 3	0.005 8	0.019 2	0.000 2
10	3.73	105.4	162	1.557 9	125.10	6.3	120.27	1.9	122.44	4.7	0.050 0	0.002 8	0.131 1	0.007 0	0.018 8	0.000 3
11	3.62	95.0	155	1.660 8	127.19	7.0	125.00	2.0	121.74	5.5	0.050 9	0.003 8	0.133 4	0.007 9	0.019 6	0.000 3
12	3.67	139.6	149	1.070 2	117.69	6.7	120.33	2.0	118.80	3.9	0.049 0	0.003 7	0.122 9	0.007 4	0.018 8	0.000 3
13	9.59	376.3	392	1.052 4	116.75	5.5	118.31	1.2	120.20	2.8	0.048 1	0.002 5	0.121 8	0.006 1	0.018 5	0.000 2
14	7.92	359.7	310	0.857 2	125.60	5.3	118.64	1.4	116.33	2.3	0.051 8	0.002 5	0.131 7	0.005 9	0.018 6	0.000 2
15	6.24	218.9	268	1.221 3	119.73	6.1	115.96	1.5	118.50	3.1	0.051 1	0.003 1	0.125 2	0.006 8	0.018 2	0.000 2
16	6.74	164.7	304	1.828 1	125.59	6.1	119.51	1.5	118.90	3.7	0.051 0	0.002 8	0.131 7	0.006 8	0.018 7	0.000 2
18	5.22	147.6	234	1.606 8	113.86	7.2	117.37	1.8	128.46	4.9	0.048 0	0.003 6	0.118 7	0.007 9	0.018 4	0.000 3
19	37.5 1	409.4 1	592	1.215 9	114.41	3.5	116.42	1.2	120.79	2.5	0.047 0	0.001 5	0.119 3	0.003 9	0.018 2	0.000 2
21	2.82	79.7	123	1.554 2	121.36	7.7	121.71	2.1	118.63	5.0	0.050 2	0.004 1	0.127 0	0.008 6	0.019 1	0.000 3
22	3.00	73.0	140	1.942 5	115.78	7.8	117.24	1.9	117.01	4.4	0.047 6	0.003 7	0.120 8	0.008 6	0.018 4	0.000 3
23	5.50	170.5	230	1.379 6	124.50	6.0	121.17	1.6	130.68	3.6	0.050 1	0.002 8	0.130 4	0.006 7	0.019 0	0.000 2
24	3.18	73.1	147	2.040 3	121.25	7.2	118.48	2.0	122.04	4.9	0.050 7	0.003 6	0.126 8	0.007 9	0.018 5	0.000 3
25	7.85	232.9	354	1.538 0	116.29	5.1	117.30	1.5	113.81	2.9	0.048 5	0.002 4	0.121 3	0.005 7	0.018 4	0.000 2
26	8.48	342.2	347	1.057 5	117.71	5.7	118.96	1.4	118.81	3.0	0.048 6	0.002 7	0.122 9	0.006 3	0.018 6	0.000 2
27	4.99	158.1	218	1.402 3	115.85	6.3	117.93	1.7	120.78	3.2	0.047 7	0.002 9	0.120 9	0.007 0	0.018 5	0.000 3
28	3.96	111.5	171	1.548 4	124.25	7.5	122.15	1.8	124.61	4.2	0.049 2	0.003 3	0.130 2	0.008 3	0.019 1	0.000 3
29	6.62	207.3	282	1.450 0	122.12	6.1	124.43	1.9	128.11	4.2	0.049 2	0.002 9	0.127 8	0.006 8	0.019 5	0.000 3
30	4.53	158.1	188	1.238 3	121.10	6.9	120.34	1.9	124.47	3.6	0.048 8	0.003 1	0.126 7	0.007 7	0.018 8	0.000 3
31	5.03	133.3	226	1.752 6	120.90	6.5	119.25	1.7	116.38	3.3	0.049 2	0.002 9	0.126 4	0.007 3	0.018 7	0.000 3
32	3.55	124.7	153	1.246 0	121.21	6.3	117.63	1.8	108.19	3.6	0.050 2	0.003 1	0.126 8	0.007 0	0.018 4	0.000 3
33	4.85	202.2	196	0.999 2	121.26	6.3	118.99	1.9	117.88	3.2	0.049 7	0.002 9	0.126 8	0.007 0	0.018 6	0.000 3
34	2.78	66.4	128	1.951 1	118.50	8.6	117.34	2.0	117.66	4.7	0.050 0	0.004 3	0.123 8	0.009 5	0.018 4	0.000 3
35	5.09	179.9	217	1.228 1	117.32	7.3	120.00	2.1	116.64	4.0	0.047 6	0.003 3	0.122 5	0.008 1	0.018 8	0.000 3
37	4.53	133.9	199	1.505 3	121.16	6.6	120.59	1.6	112.72	3.5	0.049 7	0.003 2	0.126 7	0.007 4	0.018 9	0.000 3
38	6.01	249.4	246	1.013 2	129.38	6.2	119.07	1.6	114.40	2.9	0.053 1	0.002 9	0.135 9	0.007 0	0.018 6	0.000 2
39	3.90	131.1	166	1.345 1	120.70	6.2	120.65	1.8	117.22	4.1	0.049 0	0.003 0	0.126 2	0.006 8	0.018 9	0.000 3

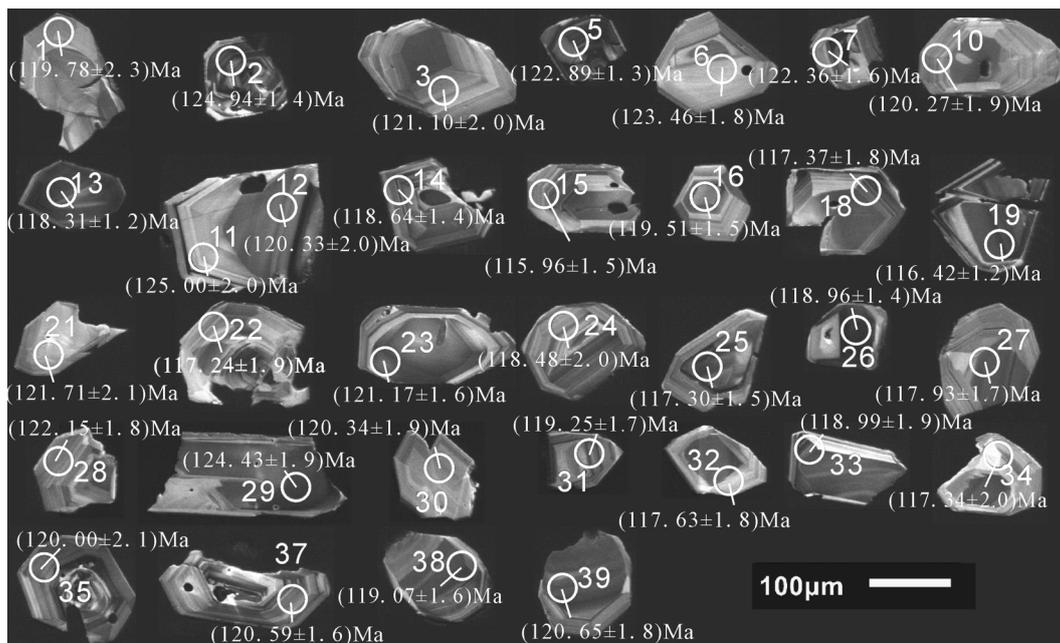


图 3 石英二长斑岩中锆石阴极发光照片和年龄

Fig. 3 CL images and ages of zircons from quartz-monzonite porphyry

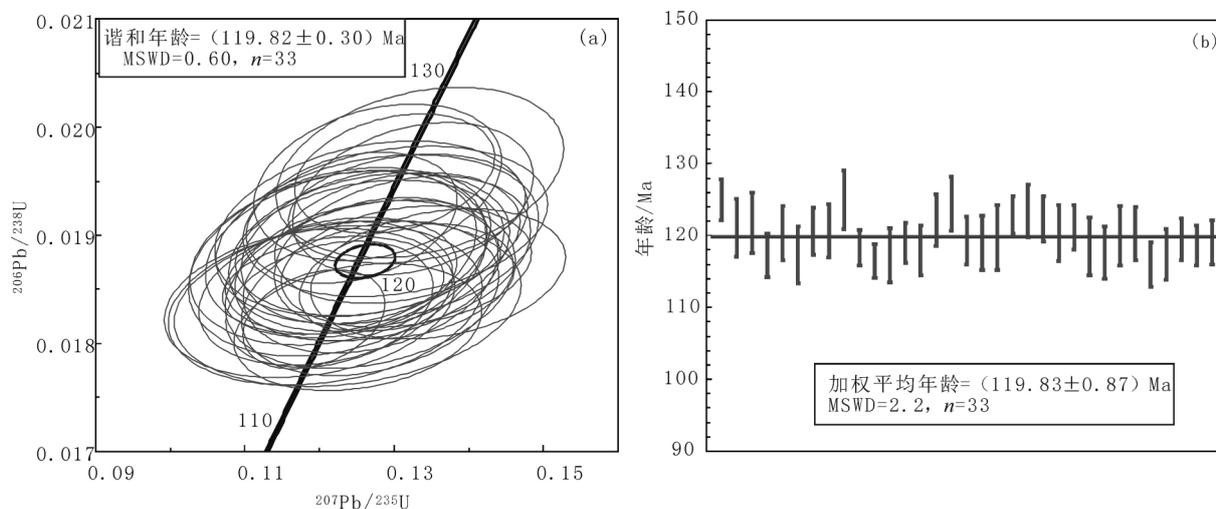


图 4 石英二长斑岩中锆石 U - Pb 谐和图 (a) 和加权平均年龄分布图 (b)

Fig. 4 U - Pb concordant diagram (a) and weighted average age distribution diagram (b) of zircons from quartz-monzonite porphyry

4.2 主量元素地球化学特征

石英二长斑岩的主量元素分析结果见表 2, 在 TAS 图解 (图 5 (a)) 中, 样品投点落入石英二长岩区域, 与显微镜下观察鉴定样品为石英二长斑岩的结果相符。岩石高硅 ($\text{SiO}_2 = 67.97\% \sim 68.62\%$), 偏铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.04\% \sim 15.31\%$), 偏碱 ($\text{ALK} = 9.92\% \sim 10.31\%$, 平均值为 10.08%), 富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.15 \sim 1.21$), 贫钙 ($\text{CaO} = 1.15\% \sim 1.44\%$), 贫镁 ($\text{MgO} = 0.56\% \sim 0.57\%$), 贫钛 ($\text{TiO}_2 = 0.36\% \sim 0.39\%$), 表明岩浆熔体未与地

幔相互作用^[27]。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 5 (b)) 中, 样品投点全部落入钾玄岩系列区域, 钾玄岩系列为造山带特有的富钾系列, 而富钾质也被认为是造山晚期阶段岩浆岩的特征。石英二长斑岩的 $A/\text{CNK} = 0.94 \sim 0.97$, $A/\text{NK} = 1.107 \sim 1.132$, 在 $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ 图 (图 6) 中, 样品投点全部落入准铝质区。

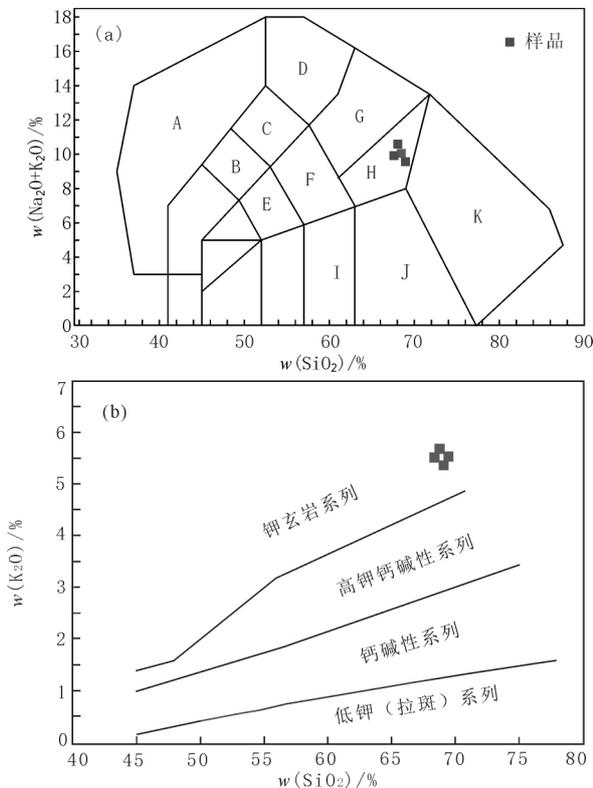
4.3 微量和稀土元素地球化学特征

从石英二长斑岩的原始地幔标准化蛛网图 (图 7 (a)) 可以看出, 样品相对富集大离子亲石元素

表2 石英二长斑岩主量元素($w_B/\%$)与微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果及特征参数

Table 2 Major element (%) and trace element(10^{-6}) compositions and characteristic parameters of quartz-monzonite porphyry

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和	A/CNK	A/NK
ZK1003-4	68.19	0.37	15.31	2.64	1.08	0.07	0.56	1.15	4.75	5.56	0.10	1.14	99.84	0.961	1.107
ZK1003-5	67.97	0.36	15.17	2.68	1.10	0.07	0.56	1.30	4.53	5.50	0.10	1.48	99.72	0.962	1.132
ZK1002-6	68.32	0.39	15.21	2.72	1.08	0.08	0.57	1.44	4.65	5.41	0.11	1.28	100.18	0.943	1.126
ZK1002-7	68.62	0.37	15.04	2.70	1.10	0.07	0.57	1.17	4.61	5.31	0.10	1.35	99.91	0.973	1.128
样号	Cs	Rb	Sr	Ba	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	V	Cr	Co	Ni	Li
ZK1003-4	2.32	189	273	590	18.8	16.9	1.29	368	9.58	23.3	18.5	0.79	2.50	0.68	26.9
ZK1003-5	2.79	193	243	559	18.2	16.2	1.23	359	9.19	22.2	18.7	1.11	2.54	0.83	25.1
ZK1002-6	2.45	178	259	548	18.1	16.5	1.26	355	9.21	22.6	17.3	0.78	2.46	0.71	21.3
ZK1002-7	2.71	178	220	533	17.6	16.0	1.29	349	9.09	23.0	17.6	0.76	2.56	0.66	21.7
样号	Sc	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
ZK1003-4	3.87	5.19	44.5	86.5	9.66	33.4	6.03	0.88	4.83	0.70	4.27	0.83	2.63	0.39	2.70
ZK1003-5	4.36	5.27	41.2	80.8	8.91	31.0	5.61	0.77	4.35	0.65	4.03	0.80	2.46	0.39	2.58
ZK1002-6	3.82	5.40	42.3	84.2	9.49	33.3	5.76	0.84	4.72	0.70	4.12	0.83	2.49	0.39	2.73
ZK1002-7	4.16	5.25	41.9	84.5	9.32	32.4	5.71	0.81	4.58	0.69	3.91	0.80	2.48	0.40	2.80
样号	Lu	Y	ΣREE	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	Nb/Ta	Nd/Th	Ti/Y	Ti/Zr	Mg [#]				
ZK1003-4	0.42	25.9	197.74	0.483	11.11	4.64	13.10	1.43	85.64	6.03	0.27				
ZK1003-5	0.41	25.0	183.96	0.460	10.77	4.62	13.17	1.40	86.33	6.01	0.27				
ZK1002-6	0.39	25.0	192.26	0.479	10.45	4.62	13.10	1.47	93.52	6.59	0.27				
ZK1002-7	0.43	24.9	190.73	0.469	10.09	4.62	12.40	1.41	89.08	6.36	0.27				



A. 似长石深成岩; B. 似长石二长闪长岩; C. 似长石二长正长岩; D. 似长石正长岩; E. 二长闪长岩; F. 二长岩; G. 正长岩; H. 石英二长岩; I. 闪长岩; J. 花岗闪长岩; K. 花岗岩。
图5 石英二长斑岩的 TAS 图解 (a) (底图据文献 [28]) 和 SiO₂ - K₂O 图解 (b) (底图据文献 [29])

Fig. 5 TAS diagram (a) (modified after reference [28]) and SiO₂ - K₂O diagram (b) (modified after reference [29]) of quartz-monzonite porphyry

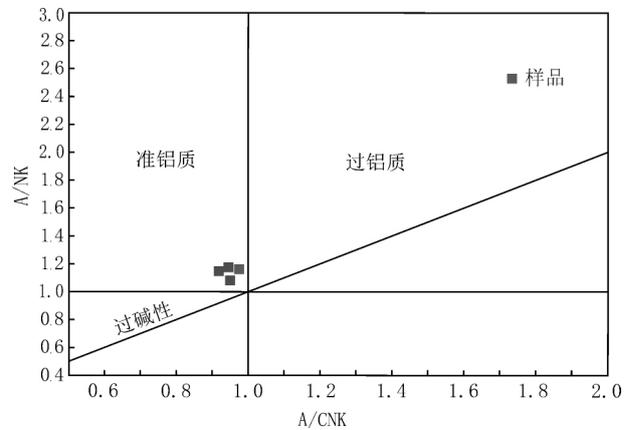


图6 石英二长斑岩 A/CNK - A/NK 图解(底图据文献 [30])
Fig. 6 A/CNK-A/NK diagram of quartz-monzonite porphyry (modified after reference [30])

Rb、K, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti、HREE。Rb/Sr = 0.69 ~ 0.81, 平均 0.75, 符合壳源岩浆值 (Rb/Sr > 0.5)。微量元素 Nb、Ta 的亏损和 Th 的相对富集, 也揭示了形成岩体的岩浆可能为壳源^[31]。

石英二长斑岩的稀土元素总量 Σ REE = 183.96 × 10⁻⁶ ~ 197.74 × 10⁻⁶, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 7(b)) 显示样品富集轻稀土元素(LREE), 曲线呈右倾特征, 重稀土元素(HREE) 曲线较平缓。轻稀土元素分馏程度高于重稀土元素, 整体呈 V 字形配分的特征。(La/Yb)_N = 10.09 ~ 11.11, 显示明显的轻稀土富集特征。

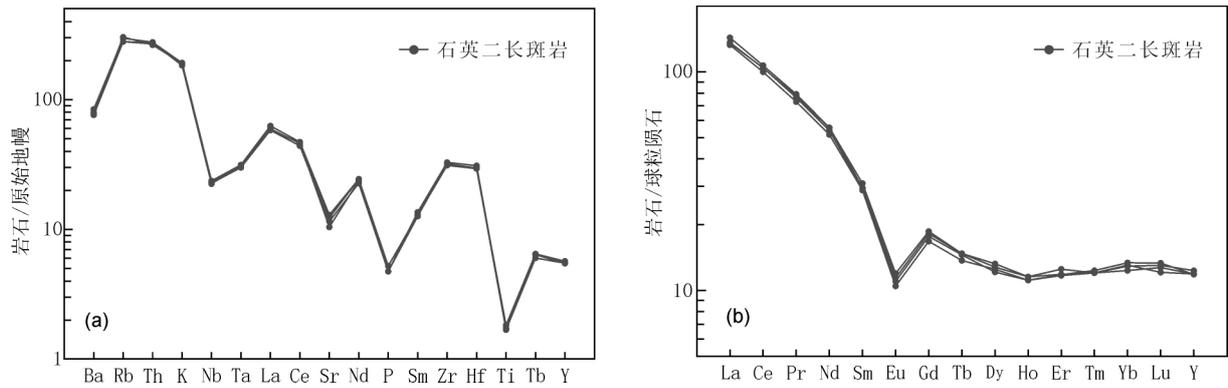


图7 石英二长斑岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分曲线(b)(标准化值均引自文献[32])

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) of quartz-monzonite porphyry (normalized values after reference [32])

Eu 中等亏损 ($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.48$), 显示壳型特征, 表明花岗岩浆在向上运移和侵位的过程中, 岩浆中的斜长石因分离结晶而离开岩浆, 导致了斜长石带出而显示 Eu 亏损。 ($\text{La}/\text{Sm})_N = 4.62 \sim 4.64$; $\text{Nb}/\text{Ta} = 12.40 \sim 13.17$, 平均值 12.94; $\text{Th}/\text{U} = 4.19 \sim 4.49$, 平均值 4.32; $\text{Nd}/\text{Th} = 1.40 \sim 1.47$, 平均值为 1.43; $\text{Ti}/\text{Y} = 84.64 \sim 93.52$, 平均值为 88.64; $\text{Ti}/\text{Zr} = 6.01 \sim 6.59$, 平均值 6.25。

5 讨论

5.1 成矿时代

世界范围内中生代和新生代的钼矿床约占钼矿探明储量的 90%, 本次研究与成矿有关的石英二长斑岩体锆石 U-Pb 加权平均年龄值为 $(119.83 \pm 0.87) \text{ Ma}$ ($n = 33$, $\text{MSWD} = 2.2$, 95% 置信度), 代表了钼矿的成矿年龄。陈衍景等认为中国东北地区中生代钼成矿集中在 250 ~ 210 Ma、190 ~ 160 Ma、150 ~ 110 Ma 3 个高峰期^[4], 江思宏等认为与蒙古-鄂霍茨克洋构造体系有关的斑岩型钼矿床形成时间在 240 ~ 110 Ma^[33]。邻区目前发现的斑岩型钼矿如小柯勒河、富克山、霍洛台钼矿等成矿时代集中在 149 ~ 144 Ma^[25], 与研究区成矿时代相差较大, 所以本次研究区成矿时代的确定, 显示在大兴安岭东北部早白垩世晚期也是一个重要的钼矿成矿期。

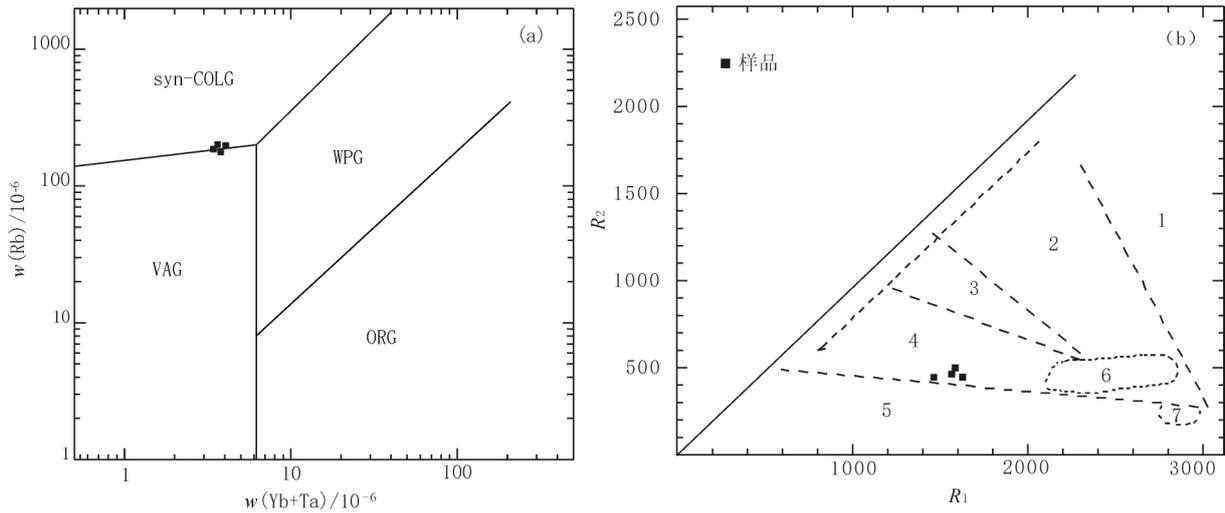
5.2 岩石成因

岩石 MgO 含量约为 0.56%, $\text{Mg}^\#$ 值约为 0.27, 表现壳源的特征; 高 Si, 低 Fe、Cr、V、Co、Ni 也表现为壳源的特征。微量元素 Nb、Ta 亏损和 Th 的相对富集, 揭示了形成岩体的岩浆很可能是壳源的^[28, 34]。Eu 中等亏损, 表明斜长石分离结

晶, P、Ti 亏损, 表明磷灰石、榍石分离结晶。 ($\text{La}/\text{Sm})_N$ 平均值为 4.63, 显示轻稀土分馏程度高, 明显富集轻稀土, $\text{Nb}/\text{Ta} = 12.4 \sim 13.17$, 平均值为 12.94, 与地壳的 Nb/Ta 比值最接近; 重稀土元素配分曲线平坦, 表明源区可能没有代表高压的石榴石矿物, 指示部分熔融发生在较浅的部位; $\text{Th}/\text{U} = 4.19 \sim 4.49$, 平均值 4.32, 接近地壳的比值; $\text{Nd}/\text{Th} = 1.40 \sim 1.47$, 平均为 1.43, 其值接近壳源岩石的比值(约 3.0), 而明显有别于幔源岩石比值(> 15); $\text{Ti}/\text{Y} = 84.64 \sim 93.52$, 平均值 88.64, 接近陆壳岩石值(< 200); $\text{Ti}/\text{Zr} = 6.01 \sim 6.59$, 平均 6.25, 符合陆壳岩石值(< 30)^[35]。以上数据均指示了成矿岩体的壳源特征, 而非幔源岩浆分异的产物^[36]。

5.3 成矿地质背景

中国钼矿床的成矿期主要为燕山期, 其次有喜山期、印支期和海西期。钼矿主要成因类型有斑岩型、矽卡岩型、与花岗岩有关的热液脉型、与碳酸岩有关的热液脉型、砂岩型、黑色页岩型钼镍矿、海相火山岩型^[37-39]。白凤军和肖荣阁等新发现了钾长石石英脉型钼矿^[40]。世界上钼矿的产出环境主要为与大洋板片俯冲有关的岛弧陆缘弧环境、碰撞造山环境、板(陆)内造山环境^[41-43]。黄凡等认为中国钼矿床分布受深大断裂控制明显, 主要产于板内构造活动带, 与中酸性浅成-超浅成岩浆岩关系密切^[37]。大兴安岭东北部钼矿床主要是中生代斑岩型钼(铜)矿, 与成矿有关地质体主要为花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英斑岩等中酸性浅成侵入体^[21, 44-46]。陈衍景等认为中国东北地区钼矿床主要形成于增生造山和大陆碰撞造山(含后碰撞)两种构造背景, 独立的钼



VAG. 火山弧花岗岩; syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; 1. 地幔分离花岗岩; 2. 板块碰撞前花岗岩; 3. 板块碰撞后隆起期花岗岩; 4. 造山晚期花岗岩; 5. 非造山区 A 型花岗岩; 6. 同碰撞(S 型)花岗岩; 7. 造山期后 A 型花岗岩。

图 8 石英二长斑岩 ($Yb + Ta$) - Rb 图解 (a) (底图据参考文献 [47]) 和 $R_1 - R_2$ 图解 (b) (底图据参考文献 [48])

Fig. 8 ($Yb + Ta$) - Rb diagram (a) (modified after reference [47]) and $R_1 - R_2$ discrimination diagram (b) of quartz-monzonite porphyry (modified after reference [48])

矿床始现于三叠纪, 只形成于大陆碰撞造山体制, 且多与燕山期中酸性斑岩体关系密切, 成矿岩体多为高硅富钾钙碱性花岗岩^[4]。中国东北斑岩型矿床形成的背景多与大洋板块俯冲机制下的岩浆体系有关, 主成矿元素与构造背景关联密切^[49-50]。孙海瑞等认为, 东北地区晚侏罗世一早白垩世钼矿主要受北方的蒙古-鄂霍茨克洋构造域制约^[51]。唐杰、柳长峰等认为大兴安岭地区白垩纪岩浆事件与太平洋板块俯冲及之后的弧后伸展背景相关^[52-54]。另外也有人认为该地区中生代岩浆与成矿作用受蒙古-鄂霍茨克洋的闭合俯冲和太平洋板块俯冲作用的联合控制^[55], 总而言之, 目前该地区早白垩世斑岩型钼矿成矿构造背景存在争论。

研究区与太平洋板块中生代俯冲带的距离远超岩浆弧所到达的范围^[44], 说明该区早白垩世花岗岩的形成与太平洋板块的俯冲并无关系, 将成矿与北部蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲及造山等构造活动相关联更为合理。蒙古-鄂霍茨克洋东部俯冲以及闭合在不晚于晚侏罗世完成^[56-58], 徐立明等在大洋山钼矿邻区塔河南部发现的时代为 (123.4 ± 0.9) Ma 的中粒闪长岩被证明是与蒙古-鄂霍茨克洋闭合的后碰撞环境有关^[59]。本次研究所采取的石英二长斑岩样品在 ($Yb + Ta$) - Rb 图解 (图 8(a)) 中, 投点落入同碰撞花岗岩和火山弧花岗岩附近, 可理解为岩石形成于碰撞的后期一

伸展阶段, 在 $R_1 - R_2$ 图解 (图 8(b)) 中样品落在造山晚期花岗岩范围内, 指示石英二长斑岩形成于造山晚期。综合以上研究认为, 大洋山钼矿形成于早白垩世晚期, 与蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲闭合相关, 成矿环境为伸展构造背景。

6 结论

大洋山钼矿成矿岩体石英二长斑岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (119.83 ± 0.87) Ma, 据此推测大洋山钼矿成矿时代为早白垩世晚期, 认为大兴安岭东北部地区存在早白垩世斑岩型钼矿成矿事件; 成矿岩体地球化学分析显示其具有钾玄岩的特征, 成矿物质来源为地壳的重熔; 结合区域地质矿产资料认为矿床形成的构造背景为蒙古-鄂霍茨克洋向南俯冲闭合后的伸展环境。

致谢: 黑龙江省自然资源调查院刘莉莉高级工程师在岩石显微镜下鉴定工作中给予了指导, 中国地质科学院吴胜华博士在论文撰写中提出了宝贵意见, 编辑部老师和匿名审稿专家给论文提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 肖荣阁, 刘敬党, 费红彩, 等. 岩石矿床地球化学 [M]. 北京: 地震出版社, 2008: 1-330.
- [2] 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.
- [3] 孙景贵, 张勇, 邢树文, 等. 兴安造山带东缘内生钼矿床的

- 成因类型、成矿年代及成矿动力学背景 [J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1317-1332.
- [4] 陈衍景, 张成, 李诺, 等. 中国东北钼矿床地质 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1223-1268.
- [5] ZORIN Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(1): 33-56.
- [6] DONSKAYA T V, WINDLEY B F, MAZUKABZOV A M, et al. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia [J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165(1): 405-421.
- [7] NATAL' IN B. History and modes of Mesozoic accretion in Southeastern Russia [J]. *Island Arc*, 1993, 2(1): 15-34.
- [8] NATAL' IN B A, AMATO J M, TORO J, et al. Paleozoic rocks of northern Chukotka Peninsula, Russian Far East: Implications for the tectonics of the Arctic region [J]. *Tectonics*, 1999, 18(6): 977-1003.
- [9] 杨元江, 庄倩, 邓昌州, 等. 黑龙江省呼中-塔河地区地球化学特征及找矿成果 [J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 86-91.
- [10] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2695-2726.
- [11] XIAO W J, WINDLEY B F, HAO J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22: 1069-1090.
- [12] 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.
- [13] XU W L, PEI F P, WANG F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167-193.
- [14] 葛文春, 李献华, 林强, 等. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义 [J]. 地质科学, 2001, 36(2): 176-183.
- [15] 孟恩, 许文良, 杨德彬, 等. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1209-1226.
- [16] YU J J, WANG F, XU W L, et al. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhanguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry [J]. *Lithos*, 2012, 142/143: 256-266.
- [17] 李研, 王建, 孙德有, 等. 内蒙古海拉尔北部八大关地区花岗岩的成岩时代、地球化学特征与成因 [J]. 现代地质, 2017, 31(2): 234-245.
- [18] 徐美君, 许文良, 王枫, 等. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 354-368.
- [19] 马玉波, 邢树文, 肖克炎, 等. 大兴安岭 Cu-Mo-Ag 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析 [J]. 地质学报, 2016, 90(7): 1316-1333.
- [20] 武广, 王国瑞, 刘军, 等. 大兴安岭北部主要金属矿床成矿系列和区域矿床成矿谱系 [J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1127-1150.
- [21] 李研, 王建, 韩志滨, 等. 大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩锆石 U-Pb 定年与岩石成因 [J]. 中国地质, 2017, 44(2): 346-357.
- [22] 韩丽, 李广慧. 内蒙额尔古纳成矿带中生代火山岩浆活动与金属成矿的关系 [J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(1): 3-5.
- [23] 康永建, 王亚君, 黄光杰, 等. 内蒙古八大关斑岩型铜钼矿床成岩成矿年代学研究 [J]. 矿床地质, 2014, 33(4): 795-806.
- [24] 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 额尔古纳地块太平川巨斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 114-122.
- [25] 邓昌州. 大兴安岭北部中生代斑岩铜矿: 成岩与成矿 [D]. 长春: 吉林大学, 2019: 1-120.
- [26] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [27] 张永明, 裴先治, 李佐臣, 等. 青海南山地区加里东期强过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质通报, 2019, 38(5): 742-756.
- [28] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [29] 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.
- [30] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题 [J]. 矿床地质, 2018, 37(4): 671-711.
- [34] 杨帆, 肖荣阁, 李娜, 等. 内蒙古宝音图钼矿床花岗岩稀土元素地球化学特征及花岗岩成因 [J]. 现代地质, 2013, 27(4): 831-840.
- [35] WEDEPOHL K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [36] 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志, 等. 东天山印支早期尾亚石英正长岩: 成岩作用及成岩意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(5):

- 1135 - 1149.
- [37] 黄凡,王登红,王成辉,等. 中国钼矿资源特征及其成矿规律概要 [J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2296 - 2314.
- [38] 黄凡,陈毓川,王登红,等. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨 [J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1111 - 1134.
- [39] 肖荣阁,白凤军,原振雷,等. 东秦岭钼、金多金属矿区域成矿系统与成矿预测 [J]. 现代地质, 2010, 24(1): 1 - 10.
- [40] 白凤军,肖荣阁,刘国营. 河南嵩县钾长石石英脉型钼矿矿床成因分析 [J]. 地质与勘探, 2009, 45(4): 335 - 342.
- [41] HEDENQUIST J W, RICHARDS J P. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits [M] // RICHARDS J P, LARSON P B. Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology. Littleton: Society of Economic Geologists, 1998: 235 - 256.
- [42] RICHARDS J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu - (Mo - Au) deposit formation [J]. Economic Geology, 2003, 98: 1515 - 1533.
- [43] 罗照华,梁涛,陈必河,等. 板内造山作用与成矿 [J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1945 - 1956.
- [44] 李诺,孙亚莉,李晶,等. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼钨等时线年龄及其成矿地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2881 - 2888.
- [45] 张璟,邵军,周永恒,等. 内蒙古陈巴尔虎旗八大关铜钼矿岩石地球化学特征及 U - Pb、Re - Os 年龄 [J]. 地质通报, 2016, 35(8): 1388 - 1399.
- [46] 黄世武,张连昌,李克庆,等. 得尔布干成矿带太平川铜钼矿床含 CH₄ 流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1386 - 1396.
- [47] PHARAOH T C, PEARCE J A. Geochemical evidence for the geotectonic setting of early Proterozoic metavolcanic sequences in Lapland [J]. Precambrian Research, 1984, 25(1/3): 283 - 308.
- [48] BATCHELOR R A, BOWDEN P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, 48(1/4): 43 - 55.
- [49] 侯增谦,杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型 [J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1779 - 1817.
- [50] 卢欣祥,于在平,冯有利,等. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景 [J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 168 - 178.
- [51] 孙海瑞,严光生,吕志成,等. 东北地区钼矿的时空分布及成矿背景分析 [J]. 中国矿业, 2016, 25(S2): 189 - 196, 245.
- [52] 唐杰. 额尔古纳地块中生代火成岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克缝合带构造演化的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2016: 1 - 205.
- [53] 柳长峰,赵守恒,张浩然,等. 内蒙古赤峰大西营子金矿区赋矿火山岩年代学与岩石地球化学特征 [J]. 现代地质, 2020, 34(1): 27 - 39.
- [54] 王迪,赵国春,苏尚国,等. 大兴安岭南段晚中生代侵入岩时空分布及主脊与东坡岩体特征对比 [J]. 现代地质, 2020, 34(3): 466 - 482.
- [55] 郑建平,牛贺才,汤华云,等. 鄂霍茨克洋与太平洋构造域叠合的岩浆作用与成矿响应 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(4): 545 - 550.
- [56] 余宏全,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.
- [57] 李锦轶,张进,刘建峰,等. 中国大陆主要变形系统 [J]. 地质学前沿, 2014, 21(3): 226 - 245.
- [58] 袁建国,顾玉超,肖荣阁,等. 内蒙古锡林浩特东部地区早白垩世花岗岩地球化学、锆石 U - Pb 年龄及地质意义 [J]. 现代地质, 2017, 31(1): 20 - 32.
- [59] 徐立明,王大可,刘玉,等. 大兴安岭北段塔河南部早白垩世侵入岩年代学和地球化学 [J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1212 - 1226.