

DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601130015

华北克拉通北缘撒岱沟门钼矿区二长花岗岩成因及成矿意义

梁景利^{1,2,3}, 周红芳^{1,2}, 孙志辉^{1,2}, 杨 瑞^{1,2}, 王 鹏^{1,2}, 董津蒙^{1,2},
任颖伟³, 严向辉⁴, 林长会⁵, 董国臣^{3,*}

(1. 华北地质勘查局五一四地质大队, 河北 承德 067000; 2. 河北省地质资源勘探开发与生态保护重点实验室, 河北 承德 067000; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 甘肃省煤田地质研究所, 甘肃 兰州 730000; 5. 内蒙古第九地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026099)

摘要: 撒岱沟门钼矿是20世纪80年代于华北克拉通北缘发现的大型斑岩型钼矿, 已有研究多聚焦于成矿规律, 但关于两类赋矿岩体红色二长花岗岩和白色二长花岗岩之间的成因联系及其与成矿关系仍存在争议。本文在详细地质调查与工程验证基础上, 对二者开展岩石学、矿物学、地球化学及年代学研究, 探讨其成因联系、成岩过程及其对成矿的制约。锆石U-Pb定年显示, 红、白二长花岗岩侵位年龄分别为 (247.2 ± 2.0) Ma和 (245.1 ± 1.8) Ma, 属中三叠世同期岩浆活动。二者地球化学特征相似, SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 及全碱含量高, A/CNK为1.34~1.46, 富集Rb、K、Th、U及轻稀土元素, 亏损Nb、Ta、Ti、P和重稀土元素, 具不同程度Eu负异常。二者中黑云母均主要为壳源铁质黑云母, 少量为镁质黑云母。研究表明二者均为高硅高钾过铝质I型钾玄岩系列花岗岩; 具有相似的成因和形成环境, 岩浆源自下地壳部分熔融, 温压、侵位深度及氧化条件基本一致, 并均利于钼富集迁移。综上表明二者实属同一岩体, 侵位于后碰撞伸展环境; 岩浆冷凝结晶形成主体红色二长花岗岩, 白色二长花岗岩为其后期经高岭土化蚀变产物; 钼成矿作用随后发生, 共同构成了华北克拉通北缘燕辽地区中三叠世一期连续的岩浆-钼成矿事件典型代表。

关键词: 华北克拉通北缘; 锆石U-Pb年龄; 全岩地球化学; 黑云母成分特征; 撒岱沟门钼矿床

中图分类号: P588.1; P595; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1075-21

Petrogenesis and Metallogenic Significance of the Monzogranite in the Sadaigoumen Molybdenum Deposit on the Northern Margin of the North China Craton

LIANG Jingli^{1,2,3}, ZHOU Hongfang^{1,2}, SUN Zhihui^{1,2}, YANG Rui^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, DONG JinMeng^{1,2},
REN Yingwei³, YAN Xianghui⁴, LIN Changhui⁵, DONG Guochen^{3,*}

(1. 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde, Hebei 067000, China; 2. Hebei Province Key Laboratory of Geological Resources Exploration and Ecological Protection, Chengde, Hebei 067000, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Gansu Institute of Coalfield Geology, Lanzhou, Gansu 730000, China; 5. Inner Mongolia ninth Geology Mineral Exploration and Development Co., Ltd. Xilinhot, Inner Mongolia 026099, China)

收稿日期: 2026-01-13; **修回日期:** 2026-04-10; **编辑:** 李龚健。

基金项目: 天津华北地质勘查局“承德地区特征岩体及尾矿砂中三稀元素含矿性基础研究项目”(HK2023-B13); 天津华北地质勘查局五一四地质大队“丰宁县十道沟钼多金属矿床岩体成因与矿化耦合机制研究项目”(HKWYS2025-C21)。

作者简介: 梁景利, 男, 高级工程师, 1988年出生, 主要从事矿产资源普查与评价工作。Email: 379768655@qq.com。

***通信作者:** 董国臣, 男, 教授, 博士生导师, 1962年出生, 主要从事岩石学及矿床学研究。Email: donggc@cugb.edu.cn。

引用格式: 梁景利, 周红芳, 孙志辉, 等. 华北克拉通北缘撒岱沟门钼矿区二长花岗岩成因及成矿意义 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1075-1095. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601130015.

LIANG Jingli, ZHOU Hongfang, SUN Zhihui, et al. Petrogenesis and Metallogenic Significance of the Monzogranite in the Sadaigoumen Molybdenum Deposit on the Northern Margin of the North China Craton [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1075-1095. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601130015.

Abstract: The Sadaigoumen molybdenum deposit is a large-scale porphyry molybdenum deposit discovered in the 1980s on the northern margin of the North China Craton. Previous studies have mainly focused on its metallogenic regularity, whereas the genetic relationship between the two ore-hosting rocks (the red monzogranite and the white monzogranite) and their link to mineralization remains controversial. Based on detailed geological surveys and engineering verification, this study presents petrological, mineralogical, geochemical, and geochronological data to investigate their genetic connection, diagenetic processes, and constraints on mineralization. Zircon U-Pb dating yields emplacement ages of (247.2 ± 2.0) Ma and (245.1 ± 1.8) Ma for the red and white monzogranites, respectively, indicating coeval Middle Triassic magmatism. Both granites show similar geochemical characteristics: high SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , and total alkali contents; $A/\text{CNK}=1.34 - 1.46$; enrichment in Rb, K, Th, U, and LREEs; depletion in Nb, Ta, Ti, P, and HREEs; and variable negative Eu anomalies. Biotite in both monzogranites is dominated by crust-derived ferruginous biotite, with minor magnesian biotite. The results demonstrate that both monzogranites are high-silica, high-K, peraluminous I-type shoshonitic series granites. They share a similar origin and tectonic setting, derived from partial melting of the lower crust, with comparable P-T conditions, emplacement depths, and oxygen fugacity, all favorable for Mo enrichment and migration. In summary, the two represent the same pluton emplaced in a post-collisional extensional setting. The main body formed as red monzogranite during magma cooling and crystallization, whereas the white monzogranite is a later product of kaolinization alteration. Molybdenum mineralization occurred subsequently, together forming a typical example of a continuous Middle Triassic magmatic-molybdenum mineralization event in the Yanliao area, northern margin of the North China Craton.

Key words: Northern Hebei Province; zircon U-Pb dating; whole-rock geochemistry; biotite composition; Sadaigoumen Molybdenum Deposit

0 引言

撒岱沟门钼矿位于河北省丰宁县城北 11 km 处, 矿床探明钼金属量 29 万 t, Mo 平均品位 0.059%, 曾名列“六五”时期全国有色金属地质勘探“十大发现之一”; 其含矿岩体为印支期, 且普遍遭受强烈的钾硅化蚀变; 含矿地段岩石呈肉红色、局部白色, 二者渐变过渡, 除颜色不同外, 矿物成份无明显差别, 大片白色二长花岗岩主要分布于 3 线以北^①。近年来, 许多学者围绕该矿床开展了大量研究工作, 重点聚焦于成岩成矿过程及成矿流体特征等方面。代军治等^[1]指出钼矿化过程中成矿流体先后经历了岩浆脱水、去气, 成矿期流体沸腾与不混溶作用, 以及后期的大气降水混合作用。沈光银^[2]认为矿区钼矿化主要受 SN 向和 EW 向断裂控制, 矿体赋存于岩体接触带附近, 尤以原生节理及碎裂岩带为主; 围岩蚀变强烈, 其中钾化蚀变与辉钼矿化关系密切。魏然等^[3-4]测定了区内 3 个红色二长花岗岩锆石 U-

Pb 年龄为 (257.4 ± 1.1) Ma、 (256.9 ± 0.9) Ma、 (247 ± 1.2) Ma, 认为岩体侵位时间为 257.4 ~ 247.7 Ma, 侵位速率约 50 m/Ma, 岩浆侵位后的冷却作用导致了垂向上不同位置样品的年龄差异。骆文娟等^[5]研究认为赋矿的二长花岗岩为准过铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩, 岩体压力 1.42 ~ 2.15 kbar, 侵位深度 5.27 ~ 7.98 km, 平均 6.78 km。Jiang 等^[6]精确测定了辉钼矿 Re-Os 年龄为 (236.5 ± 2.2) Ma, 并将其作为撒岱沟门钼矿床的成矿时代。Sun 等^[7-8]总结前人成果, 认为该矿床经历了 248 Ma 和 236 Ma 两个成矿阶段。Wang 等^[9]测定二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (239.5 ± 1.5) Ma。Chen 等^[10]测定红色二长花岗岩和白色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (242.2 ± 2.0) Ma、 (243.7 ± 1.6) Ma; 指出二者均为高硅、高钾, 属准铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩; 精确测定了辉钼矿 Re-Os 年龄为 (238.0 ± 1.9) Ma, 并结合另外两种斑岩锆石 U-Pb 年龄 (240.2 ± 1.7) Ma、 (221.7 ± 1.6) Ma, 认为撒岱沟门钼矿化并非孤立

① 华北有色地质勘探公司五一四地质大队. 河北省丰宁县撒岱沟门钼矿地质评价报告[R], 1985.

事件。上述学者都认为撒岱沟门矿床中红色二长花岗岩分布于北侧,白色二长花岗岩分布于南侧^[1-10],二者呈相变过渡关系;岩体遭受强烈的钾化和硅化蚀变。张莉莉等^[11]测定红色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (248 ± 1) Ma,认为其为成矿前中三叠世侵入岩,分布于矿区南侧,其红色并非完全由钾化所致;测定白色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (240 ± 1) Ma,认为其为中三叠世另一种侵入岩,分布于矿区北侧;指出二者呈渐变过渡接触,具有相似的岩石地球化学特征,均为高硅、富碱、富钾的 I 型花岗岩,属于准铝质到弱过铝质、高钾钙碱性至钾玄岩系列,并在 Sr-Nd-Hf 同位素组成上显示同源特征;继而推断两岩体可能是来自同一岩浆房不同阶段脉动侵位的产物。

总体来看,以往对撒岱沟门钼矿成矿岩体的研究仍存在以下几方面不足:(1)赋矿的红色二长花岗岩与白色二长花岗岩在结构、构造、成分上基本无明显差异,但二者接触关系存在渐变过渡、相变过渡与脉动侵入接触等多种认识,尚未统一;(2)不同学者对以往勘查资料的利用方式不一致,导致对红色与白色二长花岗岩“南”“北”分布特征的认识存在分歧,进而影响了岩体成因的理解;同时部分测试样品采集信息相悖,数据可靠性有待进一步验证;(3)尽管普遍认为红色二长花岗岩是赋矿主岩体,但对其“红”色成因存在钾化蚀变致“红”、不完全钾化致“红”的不同解释,红色与白色二长花岗岩的成因及相互关系尚不清晰;(4)明确针对红色和白色二长花岗岩开展的年代学、岩石地球化学研究相对薄弱,制约了二者成因及与成矿作用的深入认识;已有年代学测定结果差异较大,是导致对成因认识分歧的直接原因。

作者及团队于 2018—2019 年深入撒岱沟门钼矿区,完成了《河北省丰宁县撒岱沟门钼矿地质评价报告》资料整理复核、野外现状调查、钻探工程验证等工作,确认了矿床内花岗岩体的分布特征。矿区平面及垂向上红色二长花岗岩大范围出露于南侧及深部,局部见红色二长花岗岩包裹白色二长花岗岩;白色二长花岗岩小范围分布于北侧及深部,与古元古代晚期变质钾长花岗闪长岩为侵入接触关系;红色二长花岗岩与白色二长花岗岩呈渐变过渡,界线不明显,平面上呈曲褶

状,肉眼下颜色由肉红色-浅肉红色-灰白色渐变,成分、结构、构造无明显变化;辉钼矿化石英细脉密集发育程度与二者岩性变化无明显关系。并在此基础上,系统开展岩相学、矿物学、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学等研究,精确限定红色和白色二长花岗岩形成时代,阐明二者空间关系、成因联系及源区性质,揭示其形成的构造环境,厘清岩浆活动及其对成矿作用的制约。研究结果有助于深化对撒岱沟门钼矿床成岩成矿演化规律的认识,并指导区域找矿勘查工作。

1 区域地质背景

撒岱沟门钼矿床大地构造位置位于华北克拉通北缘(图 1(a)),燕辽成矿带中部。矿区第四系沉积物覆盖严重(图 1(b)),地层出露较差,主要为古元古界东井子组(Pt_1d),其主要出露于区域东北和西南“两角”,由石榴斜长变粒岩、石榴二长浅粒岩和透闪透辉大理岩等组成一套低角闪岩相变质沉积岩系。

区域主体构造呈北东和北东东向(图 1(b))。受华北板块与西伯利亚板块碰撞、古亚洲洋闭合、陆内造山等构造运动的影响,区域岩浆活动频繁。古元古代变质深成岩体包括变质花岗闪长斑岩、变质钾长花岗闪长岩等,多呈 NEE 或近 EW 向展布。晚古生代侵入岩主要为红色二长花岗岩、白色二长花岗岩和中细粒黑云二长花岗岩,其中前两者为主要的含矿岩体。中生代侵入岩包括中粒斑状黑云二长花岗岩、中细粒少斑二长花岗岩等,侵入于晚古生代侵入岩。

2 矿床地质及岩体特征

撒岱沟门钼区内除第四系松散沉积物外,未有其它地层出露(图 1(c))。区内断裂和节理裂隙发育,其中断裂构造以小规模平移断层为主;节理可以划分为四组,一般单个裂面长 1~2 m,被石英细脉所充填,组合形态具贯穿性,交织呈网共轭产出。碎裂岩带内矿物破裂或弯曲变形,局部糜棱岩化,辉钼矿化明显,并伴有高岭土化及萤石化蚀变。

矿区及周边大面积出露岩浆岩(图 1(c)),包括古元古代变质花岗闪长岩($\gamma\sigma Pt_1^3$)、变质钾长花岗闪长岩($\zeta\gamma\sigma Pt_1^3$)、变质斜长角闪岩($\psi o Pt_1^3$)以及中三叠世二长花岗岩($\eta\gamma T_2$)。区内

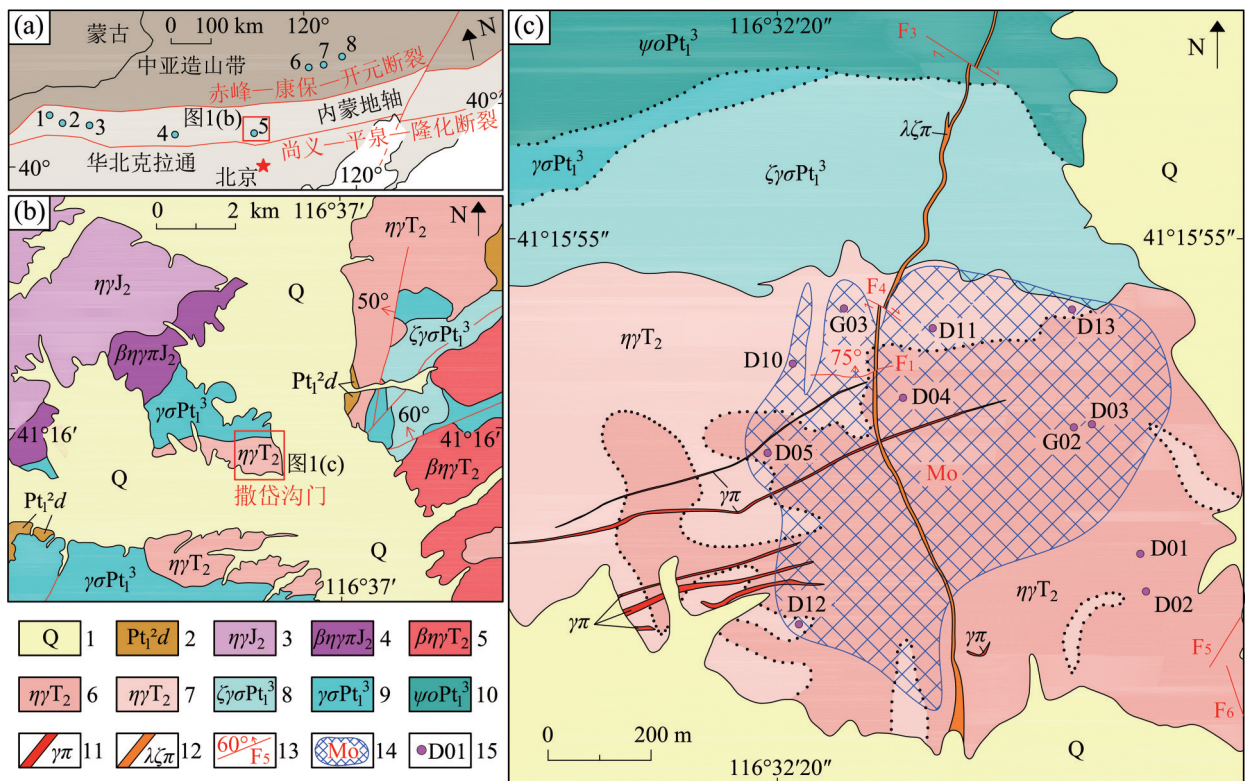


图1 华北克拉通北缘三叠纪钼矿分布图 (a, 修改自文献 [6, 12–13]), 撒岱沟门钼矿床区域地质图 (b, 修改自文献 [14]) 及矿区地质图 (c)

Fig. 1 Distribution map of Triassic Molybdenum deposits on the north margin of the North China Craton (a, modified from references [6, 12, 13]), regional geological map of the Sadaigoumen Molybdenum deposit (b, modified from reference [14]), and geological map of the ore district (c)

图(a)中: 1. 查干花钼矿(243 ± 4) Ma; 2. 查干德尔斯钼矿(243 ± 2) Ma; 3. 西沙德盖钼矿(226 ± 3) Ma; 4. 大苏计钼矿(223 ± 3) Ma; 5. 撒岱沟门钼矿(238 ± 1.9) Ma; 6. 车户沟钼矿(250 ± 7) Ma; 7. 元宝山钼矿(248 ± 3) Ma; 8. 白土营子钼铜矿(248 ± 10) Ma。图(b)和(c)图例: 1. 第四系; 2. 古元古代东井子岩组; 3. 早侏罗世中细粒少斑二长花岗岩; 4. 早侏罗世中粒斑状黑云二长花岗岩; 5. 中三叠世中细粒黑云二长花岗岩; 6. 中三叠世红色二长花岗岩; 7. 中三叠世白色二长花岗岩; 8. 古元古代晚期变质钾长花岗闪长岩; 9. 古元古代变质花岗闪长斑岩; 10. 古元古代变质斜长角闪岩; 11. 花岗斑岩脉; 12. 石英正长斑岩脉; 13. 断层; 14. 地表出露钼矿体; 15. 样品采集点

脉岩也较为发育, 包括花岗斑岩脉、石英正长斑岩脉等, 整体走向以近EW向和NS向为主, 均侵入至古元古代变质钾长花岗闪长岩和中三叠世二长花岗岩中。其中花岗斑岩脉呈暗红—浅肉红色, 长约240 ~ 830 m, 脉宽约4 ~ 15 m, 东侧逐步可见细脉浸染状辉钼矿化; 石英正长斑岩呈肉红色, 长约1600 m, 宽约4 ~ 12 m, 切穿二长花岗岩、花岗斑岩和钼矿体。

区内中三叠世二长花岗岩出露面积约2.5 km², 侵入古元古代变质花岗闪长岩中, 按颜色区分为红色和白色二长花岗岩。红色二长花岗岩广泛分布于矿区中南部, 岩石呈浅红色—肉红色(图2(a)); 白色二长花岗岩多集中分布于中北部, 多呈灰白色(图2(b))。岩石矿物学研究表明二者均呈不等粒结构、包含结构、似斑状结构; 斑晶为钾长

石、斜长石; 主要矿物成份基本一致, 包括钾长石(约35% ~ 45%)、石英(约30%)、斜长石(约20%)以及少量黑云母(约5% ~ 10%)和金属矿物(磁铁矿及少量黄铁矿, 含量<5%)组成, 副矿物有磷灰石、锆石等(图2(c-f))。其中钾长石呈半自形—它形, 主要为微斜长石, 局部发育土化; 斜长石呈半自形或不规则板状, 局部已绢云母化。相比于红色二长花岗岩, 白色二长花岗岩中的钾长石土化较为明显, 并且部分黑云母已绿泥石化而呈绿泥石光性。经地表调查和工程揭示, 红色二长花岗岩和白色二长花岗岩为渐变接触, 整体无明显界线(图2(g-h))。

矿体以3线和7线为富矿中心向四周辐射而逐步分支, 呈SN向或NE向展布的不规则透镜状产出, 南北长约950 m, 宽约330 ~ 960 m, 垂深介于

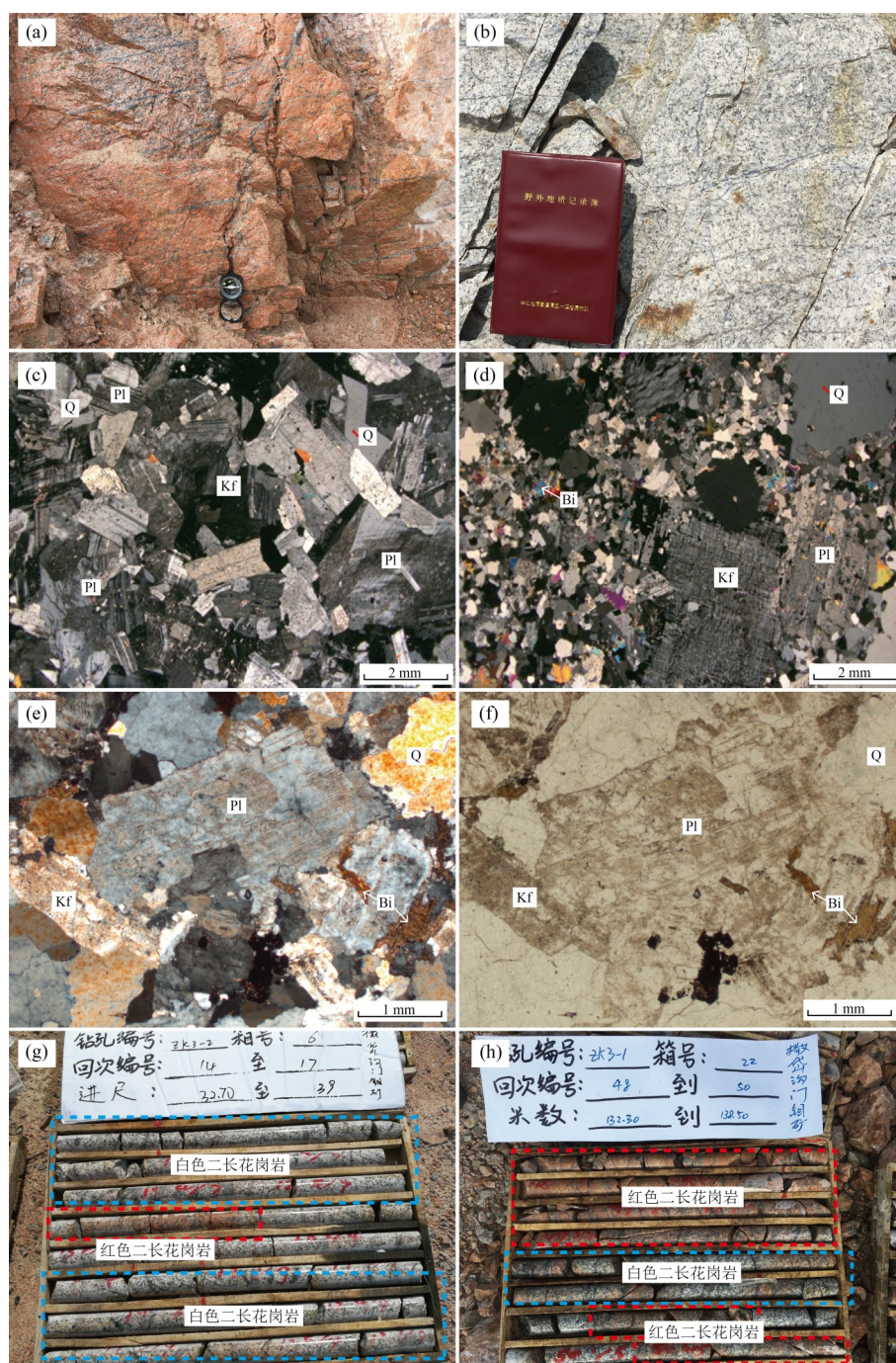


图2 撒岱沟门钼矿床二长花岗岩野外和岩石学特征

Fig. 2 Field and petrological characteristics of monzogranites in zhe Sadaigoumen Molybdenum Deposit

(a) 红色二长花岗岩野外露头;(b) 白色二长花岗岩野外露头;(c) 红色二长花岗岩(正交偏光);(d) 红色二长花岗岩(正交偏光);(e) 白色二长花岗岩(正交偏光);(f) 白色二长花岗岩(单偏光);(g) ZK3-2 钻孔岩心照片;(h) ZK3-1 钻孔岩心照片;Q. 石英;Pl. 斜长石;Kf. 钾长石;Bi. 黑云母

74 ~ 540 m。赋矿岩性无专属性, 包括红色二长花岗岩、白色二长花岗岩及花岗斑岩等, 其中红色二长花岗岩为主要赋矿岩体。矿石构造以细脉状、浸染状及网脉状为主, 矿石矿物主要包括辉钼矿、黄铁矿以及少量磁铁矿、赤铁矿和黄铜矿; 脉石矿物主要包括石英、钾长石以及斜长石, 此外还

有少量黑云母、萤石及方解石。

3 样品采集及测试分析

本次研究在撒岱沟门矿区详细的野外勘查基础上, 采集了具有代表性的5件红色二长花岗岩(D01 ~ D05 样品) 和4件白色二长花岗岩样品

(D10 ~ D13 样品), 用来完成全岩地球化学分析(图 1 (c); 表 1)。样品实验前处理工作在中国地质大学(北京)样品加工实验室完成, 前处理过程如下: 首先清理原岩表面, 剔除附着灰土、泥砂及风化氧化物等杂质; 随后使用锯片切割机将样品分割为多个约 5 × 5 × 5 cm 的小块, 确保无明显外来物质; 再将样品使用刚玉腭板颚式破碎机破碎, 并放入玛瑙球磨机中粉碎至 200 目; 最终将完成制备的样品粉末(重量约 20 g/袋)邮寄至河北省区域地质调查院实验室。全岩主量元素与微量元素测定实验环境温度为 18 ~ 27 °C。其中, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法测定, 所用实验仪器为荷兰帕纳科公司生产的 Axios Max X 射线荧光光谱仪, 实验过程如下: 首先将 0.6 g 试样与 4.5 g 四硼酸锂、1.0 g 偏硼酸锂、0.5 g 溴化锂制成的混合溶剂混合均匀, 加入 0.5 的硝酸铵作为氧化剂, 5 滴 200 g/L 的溴化锂溶液作为脱模剂, 而后在自动熔样机中 1000 °C 融解成液体状, 最后在白金模

具中冷却制成晶体片状采用 X 射线荧光光谱仪分析, 数据经过灼烧减量校准后获得岩石中各主要氧化物的百分含量, 氧化亚铁采用滴定法测定。微量及稀土元素则使用美国赛默飞世尔科技公司生产的 ICAPQ 电感耦合等离子体质谱仪测定, 采用高压溶样釜两次酸溶分析。首先准确称取 50 mg 试料放于封闭溶样器的内罐中, 而后加入 1 mL 氢氟酸和 0.5 mL 浓硝酸, 密封。将溶样器放入烘箱中, 在 185 °C ± 5 °C 的环境中加热 24 h, 待其冷却后取出内罐, 置于电热板上加热蒸至近干, 再加入 0.5 mL 硝酸蒸发近干, 重复操作此步骤一次, 加入 5 mL 硝酸, 再次密封, 放入烘箱中, 在 130 °C 环境下加热 3 h。冷却后取出内罐, 将溶液定量转移至 50 mL 比色管中。用去离子水稀释, 定容至 50 mL, 摇匀。此溶液直接用于 ICP-MS 测定。上述元素分析误差均控制在 5% 以内, 样品的烧失量则是利用 P124S 电子分析天平完成的。

表 1 测试样品采集位置
Table 1 Locations of analyzed samples

样品	岩性	采集位置		
		经度	纬度	高程(m)
D01	红色二长花岗岩	116°35'55.4490"	41°15'35.2683"	749
D02	红色二长花岗岩	116°35'55.9360"	41°15'32.9037"	731
D03	红色二长花岗岩	116°35'35.6668"	41°15'42.6853"	297
D04	红色二长花岗岩	116°35'35.5852"	41°15'45.0203"	653
D05	红色二长花岗岩	116°35'24.3091"	41°15'41.4795"	700
D10	白色二长花岗岩	116°35'26.3788"	41°15'47.1271"	689
D11	白色二长花岗岩	116°35'38.0496"	41°15'49.4051"	665
D12	白色二长花岗岩	116°35'26.9966"	41°15'30.7273"	750
D13	白色二长花岗岩	116°35'49.6414"	41°15'50.6127"	688
G02	红色二长花岗岩	116°35'49.8588"	41°15'43.1904"	713
G03	白色二长花岗岩	116°35'30.6101"	41°15'50.6105"	665

注: 采样位置坐标采用 2000 国家大地坐标系, 中央子午线 117°; 1985 国家高程基准; D03 样品取自钻孔。

采集具有代表性的 1 件红色二长花岗岩 (G02 样品) 和 1 件白色二长花岗岩样品 (G03 样品), 用来完成锆石 U-Pb 定年 (图 1 (c); 表 1)。锆石单矿物颗粒的挑选、制靶及相关照相工作均在河北省区域地质调查院实验室完成。具体流程如下: 首先将小块岩石人工破碎, 采用电磁选与重液分选法分离出重矿物, 随后放置于双目显微镜下, 经人工观察并挑选出所有锆石颗粒。锆石制靶及光学显微照相同样于该实验室进行。选取晶形完整、透明度较高的单颗粒锆石, 制成环氧树脂靶

后, 经打磨抛光, 依次在反射光、透射光及阴极发光下进行图像采集。实验所用阴极发光系统为 GATAN MINI CL, 电子光学显微系统为日本电子扫描电镜 JSM-6510。综合对照所获得的锆石靶反射光、透射光与阴极发光图像, 在避开裂隙和包裹体的基础上, 选择洁净、透明且环带清晰的区域作为分析点位。
锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年工作在桂林理工大学同位素实验室完成 (G02、G03 样品)。实验所用的激光烧蚀多接收器等离子质谱 (LA-MC-

ICPMS) 系统由美国 ESI 公司生产的 New Wave 193 nm FX 激光器和 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪组成, 实验设备参数设定为: 激光波长为 193 nm, 脉冲宽度为 5 ns, 束斑直径为 30 μm ; 信号灵敏度调节是通过将氦气作为载气, 氩气作为补偿气完成。激光剥蚀采用单点剥蚀模式。分析前使用标样 GJ-1 和 SRM610 对仪器进行调试。正式实验过程中, U-Pb 分馏校正是基于 GJ-1 锆石标准样品作为外标完成的, 每测定 8 个样品点后连续测定 2 次 GJ-1 标样。实验结束后采用 ICPMSDataCal 程序^[15]对获得的原始实验数据进行处理, 处理内容包括信号选择、元素含量与 U-Th-Pb 同位素比值计算及年龄计算, 过程中未进行普通 Pb 校正。最后使用 Isoplot 4.15 程序绘制出锆石 U-Pb 谐和曲线图及加权平均年龄图, 年龄平均值误差为 95% 置信度^[16]。

黑云母的主量元素组成测定在中国地质科学院地质研究所完成, 所用实验设备为 JXA-8100 型电子探针, 该设备产自日本电子 (JEOL) 公司。实验步骤如下: 首先将样品薄片放置于双目显微镜下, 通过镜下观察圈定出合适的黑云母矿物,

并拍照存档, 随后对样品薄片进行清洁及镀碳等实验前处理工作, 而后将薄片放置于电子探针仪器内部, 对仪器焦距、对比度及实验参数进行调整 (D01、D04、D10、D12 样品)。具体实验参数为: 电压 15 kV, 电流 2.0×10^{-8} nA, 摄谱时间 10 s, 束斑直径 2 ~ 5 μm 。测试数据经 ZAF 法进行校正。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

红色二长花岗岩 (G02 样品) 与白色二长花岗岩 (G03 样品) 中的锆石多呈无色透明, 以细长的自形—半自形长柱状为主, 锥面发育完好。锆石颗粒长度为 80~200 μm , 长宽比为 1:1 ~ 4:1。CL 图像 (图 3) 显示绝大多数锆石具清晰的振荡环带特征, 指示其为典型的岩浆锆石。

锆石的 U-Pb 测年结果 (表 2) 显示红色二长花岗岩与白色二长花岗岩锆石的 Th 含量分别为 630 ~ 2802 ppm 和 161 ~ 2407 ppm, U 含量分别为 527 ~ 1609 ppm 和 123 ~ 977 ppm, 相应的 Th/U 比值分别介于 0.78 ~ 2.91 和 0.75 ~ 5.00。结合锆石的晶形特征、振荡环带以及较高的 Th/U 比值, 表明两类锆石为岩浆成因。

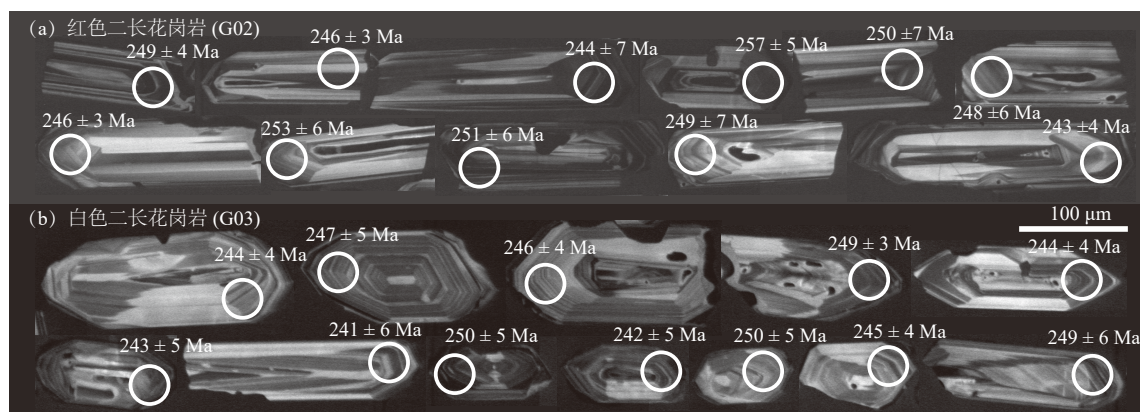


图3 撒岱沟门红色二长花岗岩 (G02 样品) 与白色二长花岗岩 (G03 样品) 锆石 CL 阴极发光图像

Fig. 3 Zircon CL (cathodoluminescence) images of the red monzogranite (sample G02) and the white monzogranite (sample G03) from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit

在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图 (图 4) 中, 红色二长花岗岩的 16 个分析点以及白色二长花岗岩的 19 个分析点均位于谐和曲线及其附近。红色二长花岗岩与白色二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (243 ~ 257) Ma 和 (241 ~ 250) Ma, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 (247.2 ± 2.0) Ma 和 (245.1 ± 1.8) Ma (图 4)。结合锆石的岩浆成因特征, 这些年龄可解释为两类岩体的结晶年龄,

并近似代表其侵位时代。

4.2 全岩元素组成

撒岱沟门红色二长花岗岩与白色二长花岗岩的全岩主量和微量元素组成测定结果 (表 3) 显示: 5 件红色二长花岗岩样品 (D01 ~ D05) 烧失量 (LOI) 为 1.36% ~ 2.27%, SiO_2 含量为 69.83% ~ 72.64%, K_2O 含量为 5.22% ~ 5.87%, Al_2O_3 含量为 13.54% ~ 15.28%, CaO 含量为 0.42% ~ 1.49%,

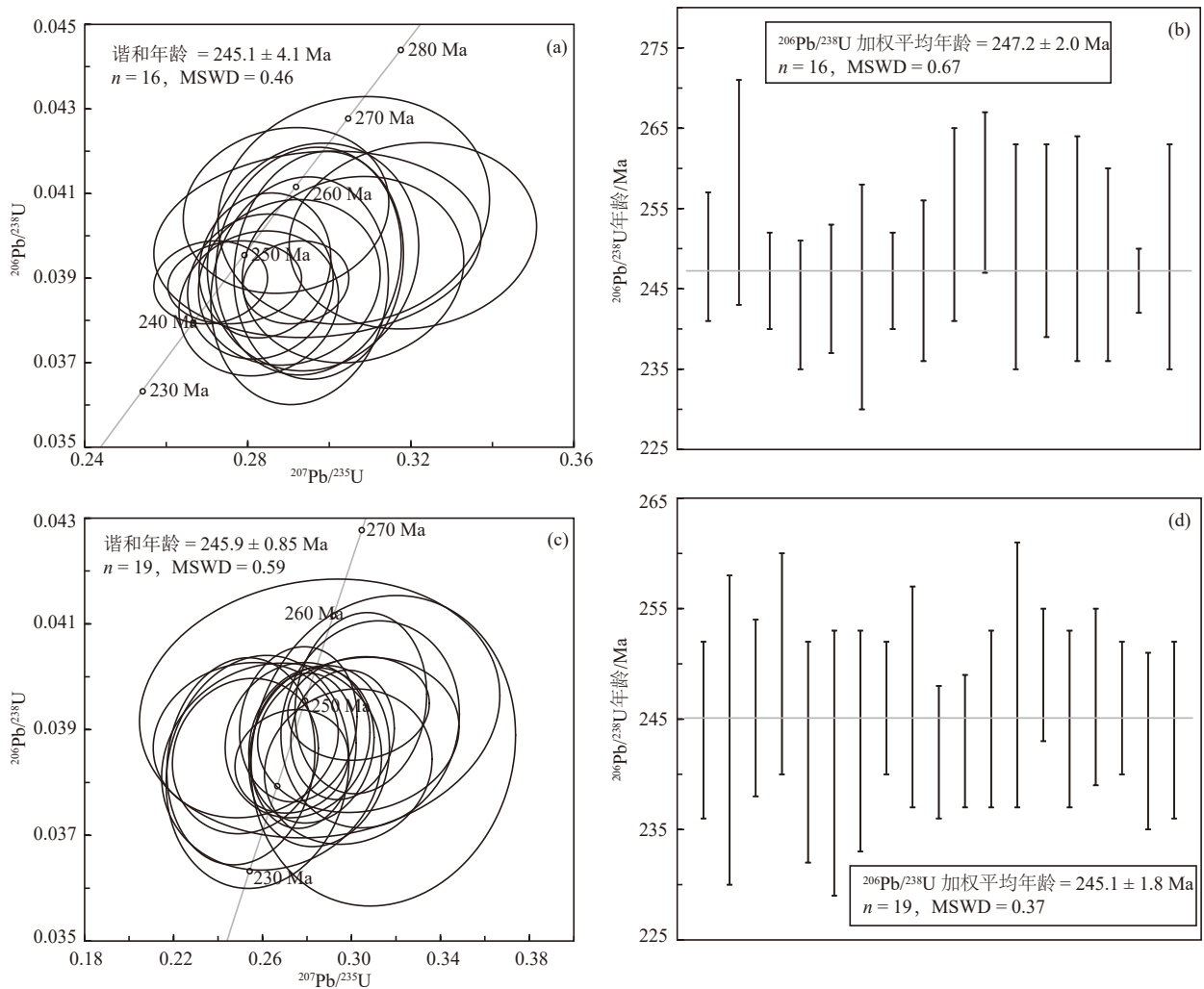


图4 撒岱沟门二长花岗岩锆石U-Pb谐和曲线与加权平均年龄图 (a、b: 红色二长花岗岩; c、d: 白色二长花岗岩)
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia curves and weighted mean age diagrams for monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit (a and b: red monzogranite; c and d: white monzogranite)

MgO 含量为 0.28% ~ 0.61%; $K_2O + Na_2O$ 含量为 8.03% ~ 9.57%, K_2O/Na_2O 为 1.52 ~ 2.14, 均投点于 K_2O-SiO_2 图解中的钾玄岩系列 (图 5 (a)); A/CNK 为 1.34 ~ 1.43, A/NK 为 1.54 ~ 1.62, 均投点于 $A/CNK-A/NK$ 图解中的过铝质区域 (图 5 (b)); 稀土元素总含量 (ΣREE) 较高, 为 209.9 ~ 326.3 ppm, $LREE/HREE$ 值与 $(La/Yb)_N$ 值分别为 26.3 ~ 31.0 和 57.17 ~ 86.19, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中显示右倾趋势 (图 6 (a)), 并且具有轻微的 Ce 负异常 (δCe 为 0.92 ~ 0.93) 和 Eu 中等负异常 (δEu 为 0.62 ~ 0.78); 在原始地幔标准化微量元素图 (图 6 (b)) 中, 显示富集 Rb、Th、U、K 等元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素。

4 件白色二长花岗岩样品 (D10 ~ D13) 烧失量 (LOI) 为 0.65% ~ 0.76%, SiO_2 含量为 70.74% ~

71.62%, K_2O 含量为 5.04% ~ 5.68%, Al_2O_3 含量为 13.34% ~ 14.97%, CaO 含量为 1.29% ~ 1.44%, MgO 含量为 0.38% ~ 0.57%; $K_2O + Na_2O$ 含量为 8.30% ~ 9.29%, K_2O/Na_2O 为 1.47 ~ 1.59, 均投点于 K_2O-SiO_2 图解中的钾玄岩系列 (图 5 (a)); A/CNK 为 1.34 ~ 1.46, A/NK 为 1.54 ~ 1.74, 均投点于 $A/CNK-A/NK$ 图解中的过铝质区域 (图 5 (b)); 稀土元素总含量 (ΣREE) 较高, 为 205.2 ~ 230.2 ppm, $LREE/HREE$ 值与 $(La/Yb)_N$ 值分别为 17.3 ~ 28.0 和 36.81 ~ 62.29, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中显示右倾趋势 (图 6 (a)), 并且具有轻微的 Ce 负异常 (δCe 为 0.91 ~ 0.93)、Eu 中等负异常为主 (δEu 为 0.51 ~ 0.83); 在原始地幔标准化微量元素图 (图 6 (b)) 中, 显示富集 Rb、Th、U、K 等元素, 亏损 Nb、

表 2 撒岱沟门二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
G02(红色二长花岗岩)														
1	55	1609	1385	0.86	0.0524	0.0011	0.2842	0.0066	0.0393	0.0007	249	4	257	19
2	58	710	1073	1.51	0.0537	0.0032	0.3060	0.0136	0.0406	0.0011	257	7	249	11
3	80	915	1576	1.72	0.0515	0.0012	0.2768	0.0067	0.0389	0.0004	246	3	251	7
4	75	846	859	1.01	0.0534	0.0013	0.2827	0.0080	0.0384	0.0007	243	4	252	37
5	27	805	630	0.78	0.0532	0.0015	0.2831	0.0073	0.0388	0.0007	245	4	255	21
6	12	1109	1985	1.79	0.0562	0.0020	0.2927	0.0089	0.0387	0.0011	244	7	262	9
7	81	1573	2802	1.78	0.0543	0.0010	0.2918	0.0053	0.0389	0.0004	246	3	256	18
8	35	656	1136	1.73	0.0560	0.0034	0.2902	0.0091	0.0389	0.0008	246	5	255	11
9	48	527	1531	2.91	0.0601	0.0035	0.3205	0.0124	0.0400	0.0009	253	6	246	18
10	51	531	1096	2.06	0.0529	0.0029	0.2894	0.0103	0.0406	0.0008	257	5	254	6
11	34	1166	1540	1.32	0.0543	0.0010	0.2949	0.0093	0.0394	0.0011	249	7	250	23
12	47	685	1807	2.64	0.0533	0.0032	0.2971	0.0164	0.0398	0.0009	251	6	256	42
13	61	980	1345	1.37	0.0549	0.0015	0.2960	0.0106	0.0395	0.0011	250	7	256	6
14	47	809	2006	2.48	0.0559	0.0023	0.3058	0.0111	0.0392	0.0009	248	6	255	50
15	79	1317	2504	1.90	0.0505	0.0011	0.2709	0.0057	0.0389	0.0004	246	2	255	19
16	63	934	2009	2.15	0.0548	0.0022	0.2974	0.0085	0.0393	0.0011	249	7	267	16
G03(白色二长花岗岩)														
1	4	481	2407	5.00	0.0543	0.0038	0.2855	0.0129	0.0385	0.0007	244	4	258	6
2	8	415	1024	2.47	0.0625	0.0074	0.3143	0.0243	0.0386	0.0012	244	7	255	7
3	13	474	569	1.20	0.0520	0.0042	0.2758	0.0133	0.0388	0.0006	246	4	251	4
4	3	340	772	2.27	0.0542	0.0038	0.3042	0.0121	0.0395	0.0007	250	5	397	9
5	56	214	161	0.75	0.0504	0.0062	0.2641	0.0202	0.0383	0.0008	242	5	256	7
6	29	245	496	2.03	0.0402	0.0046	0.2578	0.0168	0.0382	0.0009	241	6	244	6
7	44	279	875	3.14	0.0451	0.0033	0.2503	0.0136	0.0384	0.0008	243	5	251	4
8	35	478	1045	2.19	0.0502	0.0030	0.2960	0.0095	0.0389	0.0005	246	3	251	5
9	10	570	1668	2.93	0.0569	0.0043	0.3084	0.0164	0.0391	0.0008	247	5	253	4
10	10	182	273	1.49	0.0522	0.0045	0.2986	0.0154	0.0383	0.0006	242	3	383	6
11	14	309	753	2.44	0.0513	0.0019	0.2731	0.0104	0.0384	0.0004	243	3	258	4
12	30	97.5	316	3.24	0.0480	0.0035	0.2525	0.0170	0.0388	0.0006	245	4	248	5
13	9	123	204	1.66	0.0429	0.0041	0.2857	0.0331	0.0394	0.0010	249	6	255	4
14	24	977	2289	2.34	0.0559	0.0028	0.3032	0.0130	0.0394	0.0004	249	3	240	4
15	32	469	1041	2.22	0.0531	0.0028	0.2820	0.0115	0.0387	0.0006	245	4	247	4
16	16	407	503	1.24	0.0503	0.0031	0.2761	0.0108	0.0391	0.0006	247	4	256	4
17	29	200	457	2.28	0.0517	0.0046	0.3031	0.0185	0.0389	0.0006	246	3	250	4
18	24	327	1168	3.57	0.0448	0.0032	0.2523	0.0134	0.0385	0.0006	243	4	250	6
19	28	381	1054	2.77	0.0526	0.0019	0.2784	0.0097	0.0386	0.0006	244	4	256	4

Ta、P、Ti 等元素。

二者均表现出高硅、高钾、富碱的特征，均属于过铝质钾玄岩系列（图 5（a-b））；球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中均显示右倾趋势（图 6（a）），轻稀土元素相对重稀土元素明显富集，并且具有轻微的 Ce 负异常（ δCe 为 0.91 ~

0.93）、不同程度的 Eu 负异常，以中等负异常为主（ δEu 为 0.51 ~ 0.83）；在原始地幔标准化微量元素图中均显示右倾斜阶梯式下降型式（图 6（b）），均表现出大离子亲石元素（Rb、K）与 Th、U 显著富集，Nb、Ta、Ti 等高场强元素及 P 明显亏损特征。

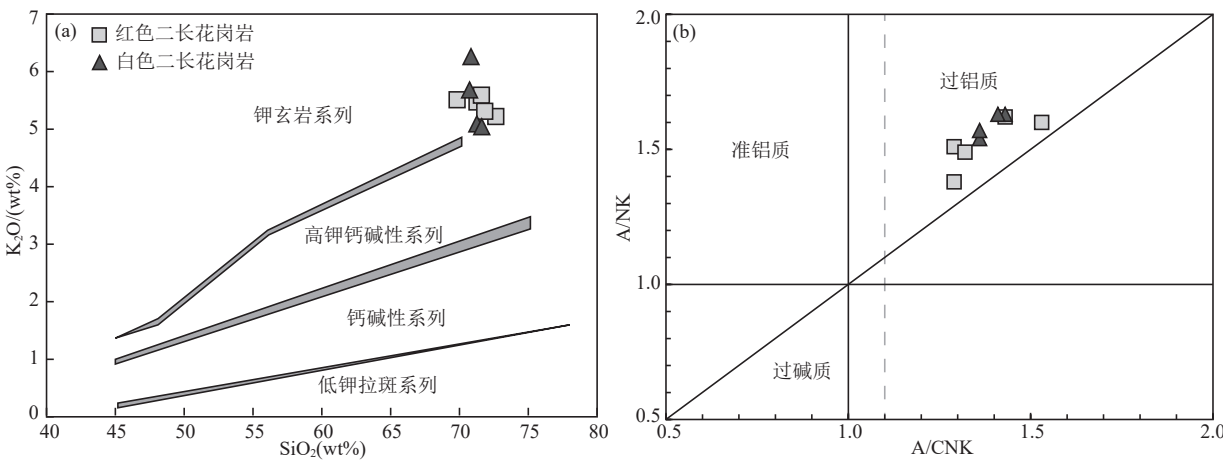


图5 撒岱沟门二长花岗岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解 (a, 据文献 [17]) 及 A/CNK-A/NK 图解 (b, 据文献 [18])
Fig. 5 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram (a, after reference [17]) and A/CNK-A/NK diagram (b, after reference [18]) for monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit

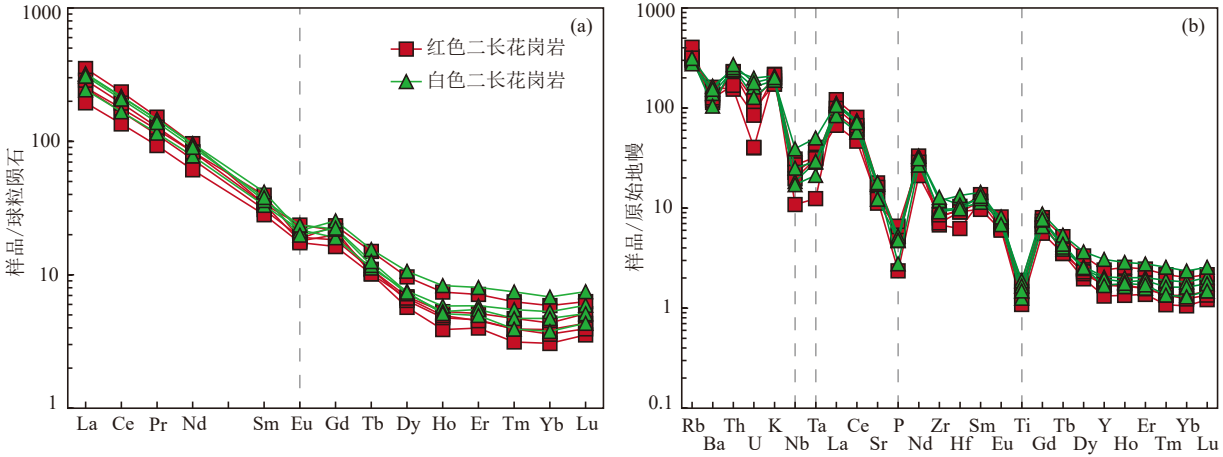


图6 撒岱沟门二长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (a) 及原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (球粒陨石及原始地幔的标准化数值据文献 [19])
Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit (normalization values for chondrite and primitive mantle after reference [19])

表3 撒岱沟门二长花岗岩主量 (wt%) 与微量元素 (ppm) 分析结果

Table 3 Major element (wt%) and trace element (ppm) analyses of monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit									
样号	D01	D02	D03	D04	D05	D10	D11	D12	D13
SiO_2	71.28	71.60	72.64	71.84	69.83	71.26	71.62	70.74	70.84
Al_2O_3	14.34	14.21	13.54	13.81	15.28	14.41	13.34	14.97	14.48
TiO_2	0.40	0.35	0.47	0.30	0.48	0.32	0.45	0.32	0.27
FeO^{T}	3.53	2.87	3.24	2.81	3.79	3.59	3.09	3.91	3.70
CaO	1.28	0.73	0.42	1.49	1.44	1.29	1.32	1.44	1.31
MgO	0.37	0.28	0.46	0.48	0.61	0.44	0.38	0.57	0.47
K_2O	5.59	5.47	5.22	5.31	5.87	5.09	5.04	5.68	5.47
Na_2O	3.22	2.56	3.20	3.49	3.70	3.21	3.43	3.61	3.43
MnO	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.03	0.02
P_2O_5	0.10	0.10	0.10	0.12	0.08	0.11	0.10	0.10	0.10
LOI	1.97	2.27	1.85	1.36	1.83	0.67	0.75	0.65	0.76

续表

样号	D01	D02	D03	D04	D05	D10	D11	D12	D13
Total	99.32	98.41	98.38	99.04	99.96	97.91	97.51	98.18	99.90
Na ₂ O+K ₂ O	8.81	8.03	8.42	8.80	9.57	8.30	8.47	9.29	8.90
K ₂ O/Na ₂ O	1.74	2.14	1.63	1.52	1.59	1.59	1.47	1.57	1.59
CaO/Na ₂ O	0.40	0.29	0.13	0.43	0.39	0.40	0.38	0.40	0.38
A/CNK	1.36	1.35	1.42	1.34	1.43	1.46	1.36	1.34	1.36
A/NK	1.58	1.54	1.61	1.57	1.62	1.74	1.57	1.56	1.54
Mg [#]	16.13	14.81	18.18	27.90	20.89	17.93	19.94	21.33	30.01
T _{Zr}	756	720	747	721	743	734	773	727	747
La	71.03	56.45	88.92	69.35	58.98	61.66	59.01	55.15	57.63
Ce	123.40	98.37	153.10	121.60	102.30	107.10	102.10	95.49	102.10
Pr	12.67	10.18	15.76	12.63	10.66	11.04	11.13	9.99	10.95
Nd	40.07	32.39	50.58	41.29	34.26	35.10	37.93	31.85	36.37
Sm	5.38	4.37	6.53	5.66	4.73	4.76	6.43	4.41	5.08
Eu	1.11	1.03	1.24	1.14	1.11	1.00	0.99	1.00	1.26
Gd	4.48	3.44	5.35	4.50	3.76	3.78	5.16	3.45	3.90
Tb	0.47	0.35	0.52	0.48	0.41	0.40	0.67	0.37	0.42
Dy	2.00	1.51	2.08	1.96	1.74	1.67	3.25	1.57	1.92
Ho	0.33	0.24	0.33	0.33	0.30	0.28	0.54	0.27	0.33
Er	0.97	0.73	0.95	0.93	0.85	0.81	1.43	0.76	0.97
Tm	0.13	0.10	0.12	0.12	0.12	0.11	0.19	0.11	0.14
Yb	0.86	0.63	0.74	0.77	0.74	0.71	1.15	0.66	0.90
Lu	0.15	0.10	0.12	0.13	0.13	0.11	0.19	0.11	0.15
ΣREE	263.1	209.9	326.3	260.9	220.1	228.5	230.2	205.2	222.1
LREE/ HREE	27.0	28.6	31.0	27.3	26.3	28.0	17.3	27.1	24.4
(La/Yb) _N	59.24	64.27	86.19	64.60	57.17	62.29	36.81	59.94	45.93
δEu	0.67	0.78	0.62	0.67	0.78	0.70	0.51	0.76	0.83
δCe	0.93	0.93	0.92	0.93	0.93	0.93	0.91	0.92	0.93
Sr	332.02	325.59	332.93	314.02	337.94	330.58	284.79	355.10	365.83
Rb	232.10	195.92	203.85	189.94	207.97	206.01	173.03	213.26	182.93
Ba	893.58	857.92	939.64	898.90	940.22	646.77	602.56	981.26	976.99
Th	48.00	15.13	26.31	20.57	13.90	24.04	25.32	23.81	20.31
Nb	20.34	17.58	20.28	19.94	21.57	19.27	23.77	18.72	12.79
Zr	123.11	78.67	100.06	80.74	101.95	86.83	150.82	89.01	108.19
Cs	2.61	1.97	1.94	2.01	3.18	1.83	2.29	1.83	1.65
Ga	24.91	22.81	22.65	22.25	22.83	22.23	21.04	21.74	19.25
Hf	3.92	2.69	2.80	2.51	3.22	2.79	5.32	2.97	3.08
Sc	4.02	2.51	3.21	3.09	2.95	2.57	3.90	2.87	2.08
Cr	13.27	16.26	8.20	7.63	9.61	6.50	9.82	9.52	7.76
V	20.77	19.08	20.51	16.75	15.31	13.47	21.29	16.71	8.90
Ni	3.62	3.96	4.19	2.84	3.07	2.52	2.82	2.76	3.45
Pb	37.46	35.58	32.67	30.62	36.39	31.82	31.16	39.34	33.95
U	4.95	2.12	2.55	1.69	0.84	4.66	3.63	2.94	4.19
Y	9.70	6.71	9.21	9.17	8.50	7.93	14.59	7.95	9.32
Ta	1.56	1.64	1.40	1.64	1.95	1.25	1.43	1.53	1.43

4.3 黑云母成分

红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中黑云母电子探针分析结果(表4)显示二者黑云母的氧化物总质量分数分别为94.91%~96.57%和95.47%~

96.40%, 均在误差允许范围内。其中, 红色二长花岗岩中黑云母的SiO₂和Al₂O₃分别为34.28%~36.78%和14.29%~15.68%, FeO^T和MgO分别为21.25%~23.68%和8.91%~10.90%, 而K₂O为

8.83% ~ 10.15%, 此外还有少量的 TiO_2 (1.93% ~ 2.83%) 及 Na_2O (0.03% ~ 0.15%)。白色二长花岗岩中黑云母同样具有较高的 SiO_2 (35.42% ~ 36.68%)、 Al_2O_3 (14.42% ~ 15.22%)、 FeO^T (20.17% ~ 23.79%)、 MgO (8.43% ~ 11.05%) 及 K_2O (9.78% ~ 10.46%), 而 TiO_2 与 Na_2O 含量较低, 分别为 2.23% ~ 2.63% 和 0.05% ~ 0.15%。

黑云母的阳离子数是以 22 个 O 原子数为基础, 根据主量元素成分数据计算得出。二长花岗岩中的大多数样品投点集中于 $\text{Mg}^{2+} - (\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+}) -$

$(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+})$ 三角分类图解 (图 7 (a)) 中的铁质黑云母范围内, 还有少量落在靠近铁质黑云母区域的镁质黑云母区域。红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中黑云母的 X_{Mg} 值分别为 0.40 ~ 0.48 和 0.39 ~ 0.49, 指示其岩浆成因; $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 值变化较小, 分别为 0.50 ~ 0.58 和 0.48 ~ 0.59, 表明二者均未受到后期流体改造作用的影响^[20]。这一结果与 $10^*\text{TiO}_2 - (\text{FeO}^T + \text{MnO}) - \text{MgO}$ 图解 (图 7 (b)) 一致, 黑云母样品大多集中在岩浆黑云母区域, 少量落在重结晶黑云母区域, 表明其为岩浆黑云母。

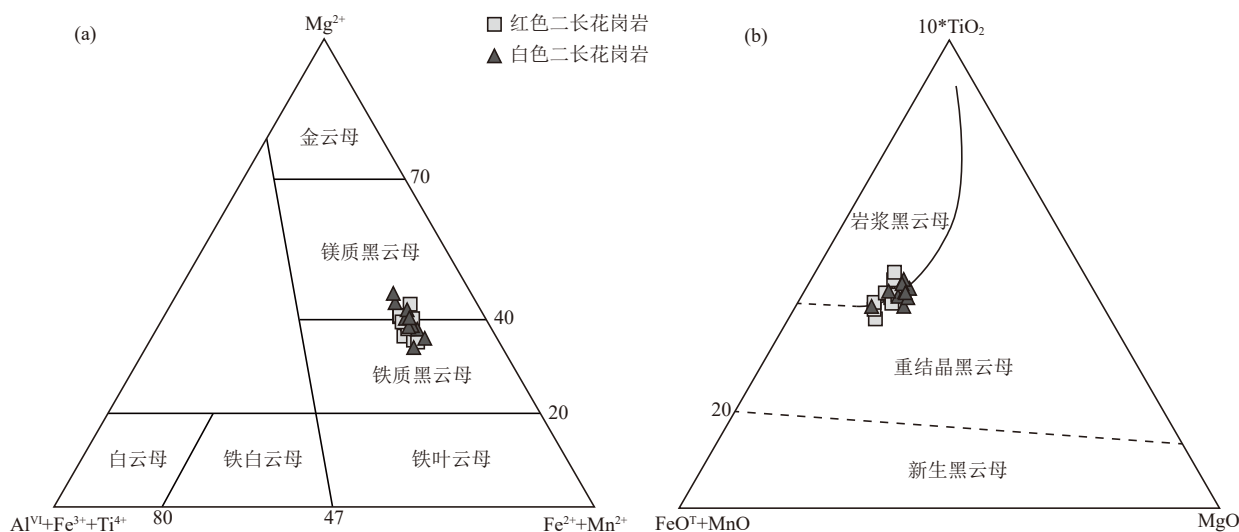


图 7 撒岱沟门二长花岗岩中黑云母成因图解: $\text{Mg}^{2+} - (\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+}) - (\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+})$ 三角图解 (a, 据文献 [21 - 22]), $10^*\text{TiO}_2 - (\text{FeO}^T + \text{MnO}) - \text{MgO}$ 图解 (b, 据文献 [23])

Fig. 7 Genetic diagrams for biotite in monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit, including $\text{Mg}^{2+} - (\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+}) - (\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+})$ ternary diagram (a) (after reference [21 - 22]) and $10 \times \text{TiO}_2 - (\text{FeO}^T + \text{MnO}) - \text{MgO}$ diagram (b) (after reference [23])

5 讨论

5.1 岩浆活动时代

华北克拉通北缘在印支期和燕山期经历了多期岩浆一成矿作用, 形成了以查干德尔斯和大苏计为代表的斑岩型钼矿床 (图 1 (a))。已有研究表明, 查干德尔斯赋矿主岩体侵位年龄 (256.6 ± 3.4) Ma, 辉钼矿 Re-Os 年龄 (243.0 ± 2.2) Ma^[24-26]; 大苏计花岗斑岩的侵位年龄 (225 ± 1) Ma, 辉钼矿 Re-Os 年龄 (231.2 ± 2.1) Ma^[27-29]; 指示该区域在晚二叠世一晚三叠世存在长期显著的岩浆一钼矿化活动。

关于撒岱沟门钼矿区二长花岗岩体的形成时代, 前人研究已获得较多年代学数据。魏然等^[3-4] 获得红色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为

(257.4 ± 1.1) Ma、(256.9 ± 0.9) Ma、(247 ± 1.2) Ma; Wang 等^[9] 获得二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (239.5 ± 1.5) Ma; Chen 等^[10] 获得红色二长花岗岩与白色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (242.2 ± 2.0) Ma 和 (243.7 ± 1.6) Ma; 张莉莉等^[11] 获得白色二长花岗岩与红色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (240.0 ± 1.0) Ma 和 (248.0 ± 1.0) Ma。本次研究获得红色二长花岗岩及白色二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 (247.2 ± 2.0) Ma 和 (245.1 ± 1.8) Ma, 二者在误差范围内一致, 处于前人研究的主要范围 (248.0 ± 1.0) Ma ~ (239.5 ± 1.5) Ma 内; 同时二者在时间跨度上互有先后, 反映出同一岩浆房持续活动特征。综上所述认为红色二长花岗岩和白色二长花岗岩为中三叠世同期岩浆活动的产物, 其岩浆活动可能持续

表 4 撒岱沟门二长花岗岩黑云母主量元素 (wt%) 组成数据
Table 4 Major element (wt%) compositions of biotite from monzogranites in the Sadaigoumen Molybdenum deposit

点号	D01-1	D01-2	D01-3	D01-4	D01-5	D01-6	D04-1	D04-2	D04-3	D04-4	D04-5	D10-1	D10-2	D10-3	D10-4	D10-5	D10-6	D10-7	D10-8	D12-1	D12-2
岩性	红色二长花岗岩											白色二长花岗岩									
SiO ₂	35.71	36.31	34.87	36.78	36.00	36.21	34.28	36.05	35.76	36.67	36.35	35.77	36.68	35.66	35.91	35.42	36.42	35.62	36.33	36.31	36.33
TiO ₂	2.83	2.39	2.70	2.20	2.42	2.35	2.32	2.41	2.13	1.93	2.31	2.56	2.40	2.28	2.23	2.42	2.34	2.53	2.52	2.63	2.59
Al ₂ O ₃	15.44	14.29	15.14	15.18	14.84	14.59	15.68	15.06	15.22	15.42	14.66	14.90	14.91	14.42	15.14	15.22	14.62	14.80	14.81	14.53	14.45
FeO ^T	21.49	21.25	21.81	21.44	22.44	22.03	24.31	22.11	23.68	22.94	21.37	21.69	20.17	23.61	22.00	23.79	22.93	23.01	21.04	20.70	21.08
MnO	0.48	0.41	0.35	0.41	0.37	0.43	0.38	0.43	0.32	0.36	0.38	0.55	0.59	0.50	0.54	0.29	0.30	0.30	0.47	0.44	0.47
MgO	9.87	10.90	10.00	10.34	9.46	10.27	8.91	9.78	8.92	9.16	10.11	10.15	11.05	8.93	9.60	8.43	9.79	9.50	10.59	10.72	10.45
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.11	0.13	0.15	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.07	0.12	0.07	0.09	0.08	0.05	0.07	0.11	0.12	0.10	0.10	0.15
K ₂ O	10.15	10.04	9.94	10.12	9.93	9.42	8.83	10.11	9.72	9.80	9.66	10.05	9.98	10.04	10.15	9.78	9.83	9.99	10.46	10.14	10.05
总量	96.19	95.89	95.06	96.57	95.69	95.41	94.91	96.05	95.90	96.44	95.03	95.88	95.93	95.62	95.72	95.47	96.57	95.97	96.40	95.69	95.70
以 22 个 O 原子为基准的离子数																					
Si	5.51	5.61	5.46	5.62	5.60	5.61	5.41	5.57	5.57	5.64	5.65	5.54	5.62	5.60	5.58	5.55	5.62	5.54	5.58	5.61	5.62
^T Al	2.81	2.60	2.79	2.73	2.72	2.67	2.92	2.74	2.79	2.80	2.68	2.72	2.69	2.67	2.77	2.81	2.66	2.71	2.68	2.64	2.63
Ti	0.33	0.28	0.32	0.25	0.28	0.27	0.27	0.28	0.25	0.22	0.27	0.30	0.28	0.27	0.26	0.28	0.27	0.30	0.29	0.31	0.30
Fe ³⁺	0.27	0.23	0.21	0.28	0.29	0.31	0.30	0.27	0.29	0.32	0.31	0.25	0.28	0.24	0.26	0.30	0.28	0.24	0.22	0.26	0.26
Fe ²⁺	2.51	2.52	2.64	2.46	2.63	2.55	2.91	2.59	2.79	2.63	2.47	2.56	2.30	2.86	2.60	2.82	2.68	2.75	2.48	2.41	2.46
Mg	2.27	2.51	2.34	2.36	2.19	2.37	2.10	2.25	2.07	2.10	2.34	2.35	2.52	2.09	2.22	1.97	2.25	2.20	2.43	2.47	2.41
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04
K	2.00	1.98	1.98	1.97	1.97	1.86	1.78	1.99	1.93	1.92	1.91	1.99	1.95	2.01	2.01	1.96	1.94	1.98	2.05	2.00	1.98
X _{Mg}	0.45	0.48	0.45	0.46	0.43	0.45	0.40	0.44	0.40	0.42	0.46	0.45	0.49	0.40	0.44	0.39	0.43	0.42	0.47	0.48	0.47
MF	0.44	0.47	0.45	0.46	0.42	0.45	0.39	0.44	0.40	0.41	0.45	0.45	0.49	0.40	0.43	0.38	0.43	0.42	0.47	0.47	0.46
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg ²⁺)	0.52	0.50	0.53	0.51	0.55	0.52	0.58	0.53	0.57	0.56	0.51	0.52	0.48	0.58	0.54	0.59	0.54	0.56	0.51	0.49	0.51
P(Mpa)	1.97	1.35	1.93	1.76	1.71	1.55	2.31	1.79	1.94	1.94	1.60	1.72	1.63	1.55	1.87	1.99	1.52	1.70	1.59	1.48	1.45
H(km)	7.50	5.14	7.35	6.67	6.51	5.88	8.76	6.79	7.36	7.38	6.08	6.53	6.18	5.89	7.10	7.56	5.79	6.44	6.06	5.63	5.52
T _m (°C)	667	644	661	625	638	637	628	639	612	592	635	652	647	625	625	633	632	645	651	660	656

注：^TAl 为黑云母中 Al 阳离子的总和；FeO^T 为电子探针测试 FeO 质量分数；氧化系数=Fe³⁺/(Fe³⁺+Fe²⁺)；X_{Mg}=Mg/(Fe²⁺+Mg²⁺)；MF=2*Mg/(Fe²⁺+Mg+Mn)；P 为黑云母全铝含量计算得出的结晶压力；H 为利用 $P = \rho g H$ 公式计算得出的侵位深度；T_m(°C) 为利用黑云母 Ti 温度计算得出的黑云母结晶温度。

9 Ma之久。

Jiang等^[6]获得辉钼矿Re-Os年龄为 (236.5 ± 2.2) Ma; Chen等^[10]获得辉钼矿Re-Os年龄为 (238.0 ± 1.9) Ma; 张莉莉等^[11]获得与辉钼矿伴生的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (237 ± 2) Ma; 这表明钼成矿作用发生于 (238.0 ± 1.9) Ma ~ (236.5 ± 2.2) Ma, 略晚于二长花岗岩成岩末期(239 Ma), 岩浆活动与成矿作用在时间尺度上高度耦合。同时, Chen等^[10]测定的两种斑岩中近EW向展布的含矿的花岗斑岩(图1(c)) 锆石U-Pb年龄为 (240.2 ± 1.7) Ma、近SN向展布的不含矿的石英正长斑岩(图1(c)) 锆石U-Pb年龄为 (221.7 ± 1.6) Ma。综合上述证据和测试误差, 可以认为撒岱沟门钼矿床是中三叠世一期连续岩浆-成矿事件的典型代表。从中三叠世早期至晚期, 撒岱沟门地区经历了持续的岩浆侵位、冷却与结晶过程,

并于末期触发钼矿化, 这为华北克拉通北缘燕辽地区中三叠世岩浆-钼矿化成岩成矿系统提供了坚实的年代学证据。

5.2 岩石成因与源区

5.2.1 成因类型

撒岱沟门红色二长花岗岩与白色二长花岗岩具有较低的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 和Ga/Al值, 以及相对较低的锆石饱和温度(分别为 $720 \sim 756$ °C和 $727 \sim 773$ °C)均表明其不具备A型花岗岩的特征^[30-31]。岩体均表现出较高的 SiO_2 、 K_2O 含量以及A/CNK值, 属于钾玄岩系列^[32-33]; 红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中黑云母的MF值分别为 $0.39 \sim 0.47$ 和 $0.38 \sim 0.49$ (表4), 均指向I型花岗岩^[34-37]。这与黑云母 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 判别图解(图8(a))和 $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 判别图解(图8(b))投图结果一致, 所有样品均落在造山带钙碱性系列, 暗示

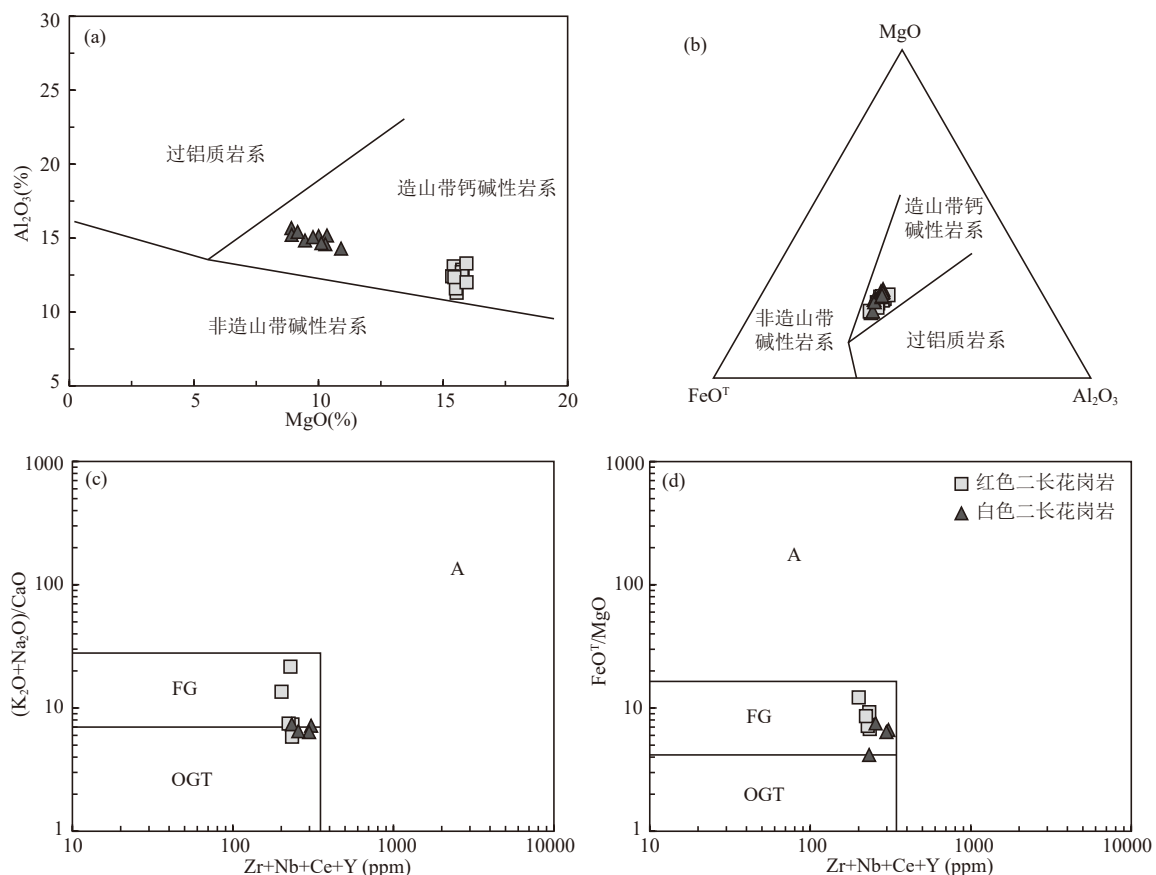


图8 撒岱沟门二长花岗岩成因类型判别图解: 黑云母 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(a), $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 三角图解(b, 据文献[38]), $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解(c)以及 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - \text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 图解(d, 据文献[39])

Fig. 8 Genetic type discrimination diagrams for monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum deposit, including $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram for biotite (a), $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ternary diagram (b) (after reference [38]), $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ diagram (c) and $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - \text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ diagram (d, after reference [39])

A. A型花岗岩; FG. 分异花岗岩; OGT. 未分异M-,I-及S-型花岗岩

其为I型花岗岩。同时在 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O) / CaO$ 图解(图8(c))中,大多数样品落在典型的M、I和S型花岗岩区域,少量样品落入分异花岗岩区域;在 $(Zr + Nb + Ce + Y) - FeO^T / MgO$ 图解(图8(d))中,所有样品均落在了分异花岗岩区域。

从矿物组成来看,红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中均未发育白云母或堇青石等典型S型花岗岩的代表性矿物,但有黑云母暗色镁铁质矿物发育。因此我们认为,红色二长花岗岩与白色二长花岗岩均为I型花岗岩。

5.2.2 岩浆源区

撒岱沟门红色二长花岗岩与白色二长花岗岩具有高度相似的地球化学组成(图5和6;表3),暗示其具有相同的岩浆源区。岩体的地球化学特征与由地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆相似,即相对富集LREE和LILE,而高场强元素(HFSE)

以及不相容元素(如Nb、Ta、Ti)相对亏损^[40-49]。同时红色二长花岗岩与白色二长花岗岩的La/Nb、Th/U、Nb/Ta、Zr/Hf及Nb/Pb比值与大陆地壳平均值一致(分别为2.2、4.0、12.4、35.5及0.7),暗示其为壳源成因^[50-51]。岩石 $Mg^\#$ 值也可以用来判断岩浆源区,壳源成因的岩石 $Mg^\#$ 值较低(< 40),而幔源物质参与会使 $Mg^\#$ 值升高^[52]。红色二长花岗岩与白色二长花岗岩均具有较低的 $Mg^\#$ 值(分别为14.81~27.90和17.93~30.01),并且在 $Mg^\# - SiO_2$ 图(图9(a))解中落入纯壳源熔体(1~3 GPa)范围,均表明其地壳来源。

此外红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中的黑云母均为铁质黑云母及镁质黑云母,暗示其下地壳来源^[53];这也与黑云母 $FeO^T / (FeO^T + MgO) - MgO$ 图解(图9(b))投图结果一致,绝大部分样品落在其中的壳源区域,同样表明其地壳来源。

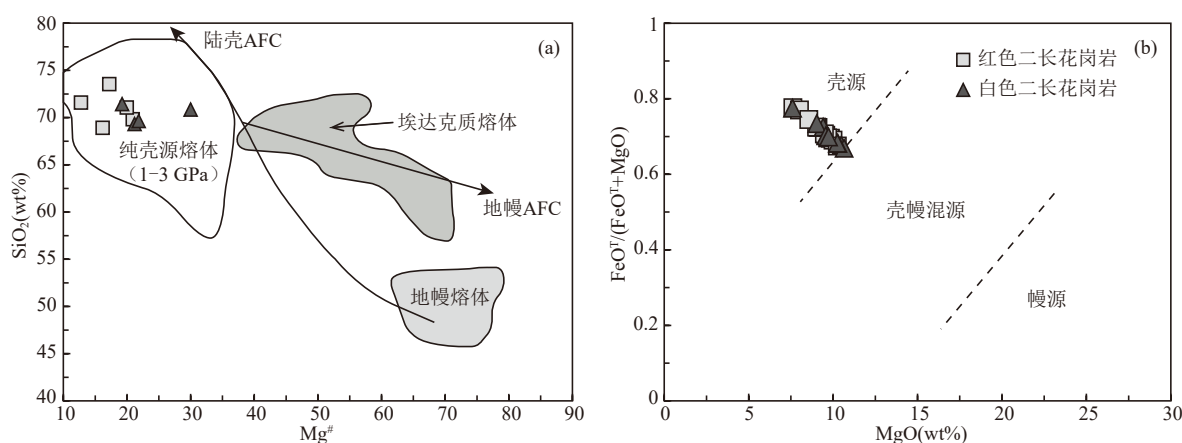


图9 撒岱沟门二长花岗岩源区判别图解: $Mg^\# - SiO_2$ 图解(a, 据文献[54]), 黑云母 $MgO - FeO^T / (FeO^T + MgO)$ 图解(b, 据文献[55])

Fig. 9 Source discrimination diagrams for monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit: (a) $Mg^\# - SiO_2$ diagram (after reference [54]), (b) $MgO - FeO^T / (FeO^T + MgO)$ diagram for biotite (after reference [55])

前文提及,红色二长花岗岩为主体,大范围分布于矿区中南部;白色二长花岗岩多集中分布于矿区中北部;二者为同期岩浆活动的产物,因此两岩体间的成因联系或是演化关系或是同一岩体受后期改造导致。红色与白色二长花岗岩具有高度相似的地球化学特征,二者均具有较高的 K_2O 含量和 K_2O/Na_2O 值,且差异不大,表明两者不存在演化关系;矿物学研究表明二者结构、构造亦无明显差异,具有相同的矿物组成,区别在于白色二长花岗岩中钾长石高岭土化相对较严重,且部分黑云母已绿泥石化。因此判断红色二长花岗

岩并非是白色二长花岗岩钾化蚀变的产物,红色二长花岗岩的“红”应为岩体自然结晶状态下的固有颜色,局部钾化可能加剧“红”色。经过野外调查和工程验证,矿区地表和钻孔中均存在红色二长花岗岩中局部见白色二长花岗岩、白色二长花岗岩中局部见红色二长花岗岩现象(图1(c); 2(g-h)),两类岩体呈渐变过渡接触关系,不具脉动、涌动侵入接触特征;同时撒岱沟门地区以南及东北方向地表大范围出露的二长花岗岩均为红色(图1(b))。因此,我们认为撒岱沟门钼矿床内红色二长花岗岩与白色二长花岗岩实为同一岩体;

高硅、高钾、富碱岩浆侵位冷凝固晶形成的二长花岗岩岩体,主体为红色二长花岗岩,白色二长花岗岩为岩体受后期高岭土化蚀变形成的产物,主要分布于侵位岩体的顶部、边部。

5.3 对钼成矿的意义

斑岩型矿床成矿作用与花岗质岩浆—热液活动密切相关,其中岩浆演化过程中的温度、压力、挥发分及氧逸度等因素,共同制约着岩浆热液的形成与成矿元素的迁移、富集^[56-61]。本文对红色与白色二长花岗岩的温度、压力及氧逸度条件进行进一步计算,以明确其形成时的条件及其对成矿作用的制约。

5.3.1 结晶温度及压力

红色二长花岗岩与白色二长花岗岩中锆石均达到饱和状态。CL阴极发光图像(图3)显示,锆石均发育明显的震荡环带,未见核一边结构,且晶体形态较好,表明岩浆体系中无继承锆石发育。

利用Watson等^[62]提出的锆石饱和温度计算公式:

$$T = 12900 / [2.95 + 2.85 \times (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2 \times \text{Ca}^{2+}) / (\text{Al}^{3+} \times \text{Si}^{4+}) + \ln(496000 / \text{Zr}_{\text{熔体}})] - 273.15 \quad (1)$$

估算锆石饱和结晶时的岩浆温度。计算得出红色二长花岗岩与白色二长花岗岩锆石饱和温度分别为720~756℃和727~773℃(表3)。同时,利用Henry等^[63]提出的适用于花岗质岩浆体系的黑云母Ti地质温度计:

$$T = \{[\ln(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283 \times (X_{\text{Mg}})^3] / 4.6482 \times 10^{-9}\}^{0.333}, X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}) \quad (2)$$

求得红色与白色二长花岗岩的黑云母结晶温度分别为592~667℃和625~660℃(表4)。结果显示黑云母结晶温度显著低于锆石饱和温度,清晰指出二者存在先后结晶序列:锆石为二长花岗岩早期高温结晶产物,记录初始结晶条件;黑云母为中低温晚期结晶产物,记录岩浆近固相线固结条件^[64]。综合限定:红色与白色二长花岗岩的结晶温度区间分别为592~756℃和625~773℃,二者整体基本一致,且均落在中酸性岩浆结晶的典型温度范围(550~800℃)内;反映撒岱沟门钼矿区二长花岗岩岩浆经历了从高温到低温连续、缓慢的冷凝固晶过程^[65]。黑云母的稳定结晶表明岩浆晚期阶段已达到水饱和,并引发流体出溶,为钼等成矿元素向流体相迁移富集创造

了关键条件^[66]。

Uchida等^[67]研究发现,黑云母的全铝含量($T\text{Al}$)受岩体固结时的压力控制,具体表现为两者之间存在的良好的正相关关系,并据此提出了黑云母全铝压力计:

$$P(\text{kbar}) = 3.03 \times T\text{Al} - 6.53(\pm 0.33) \quad (3)$$

利用该公式,计算得到红色与白色二长花岗岩的固结压力分别为1.35~2.31 kbar和1.45~1.99 kbar。根据流体静压强公式 $P = \rho g H$ 进一步估算红色与白色二长花岗岩对应的侵位深度,分别为5.14~8.76 km和5.52~7.56 km。二者侵位深度基本重叠,均属于浅成—中浅成侵入体范畴;该深度区间内的岩浆既保留了流体活动特性和较低的黏度,避免了热量过早耗散,又有利于含钼热液在浅部渗透性较好的空间沉淀^[68-69]。

5.3.2 岩浆氧逸度条件

研究表明,氧逸度($f\text{O}_2$)是斑岩型矿床形成的关键因素,其会强烈影响Mo在岩浆中的溶解度,S作为硫酸盐(SO_4^{2-})的溶解度远高于硫化物(S^{2-}),因此较高的氧逸度有助于将钼提取到岩浆熔体中,而且氧化岩浆的出熔流体可能含有更高的钼含量^[70-72]。瑞利分馏模型表明,氧化岩浆(氧逸度>NNO)可能通过分馏结晶损失14%的钼,而还原岩浆(氧逸度<NNO-0.5)则可能损失90%的钼^[73],因此氧化岩浆有利于钼矿床的形成。

在黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 三角图解(图10(a))中,红色二长花岗岩样品主要集中于NNO氧逸度缓冲线,而白色二长花岗岩样品则落在NNO缓冲线与HM缓冲线之间,且靠近NNO缓冲线一侧,均表现出氧化岩浆特性。此外与黑云母平衡的岩浆结晶温度用黑云母结晶温度来表示^[61],同时结合黑云母的稳定性 $[100 \times \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Mg})]$,利用 T - $\log f\text{O}_2$ 图解(图10(b))估算出红色二长花岗岩与白色二长花岗岩的氧逸度分别为-16.83~-18.30 bar和-15.41~-17.16 bar^[74]。二者氧逸度高度重叠,仅存在小幅差异;母岩浆具有较高的氧化态,有利于硫以 SO_4^{2-} 形式稳定存在并促进钼的运移,最终在构造优势位置富集形成钼矿床。

综上所述,撒岱沟门钼矿床红色二长花岗岩与白色二长花岗岩具有相似的成因及形成环境:结晶温度592~773℃、结晶压力1.35~2.31 kbar、对应侵位深度5.14~8.76 km、氧逸度介于-15.41~

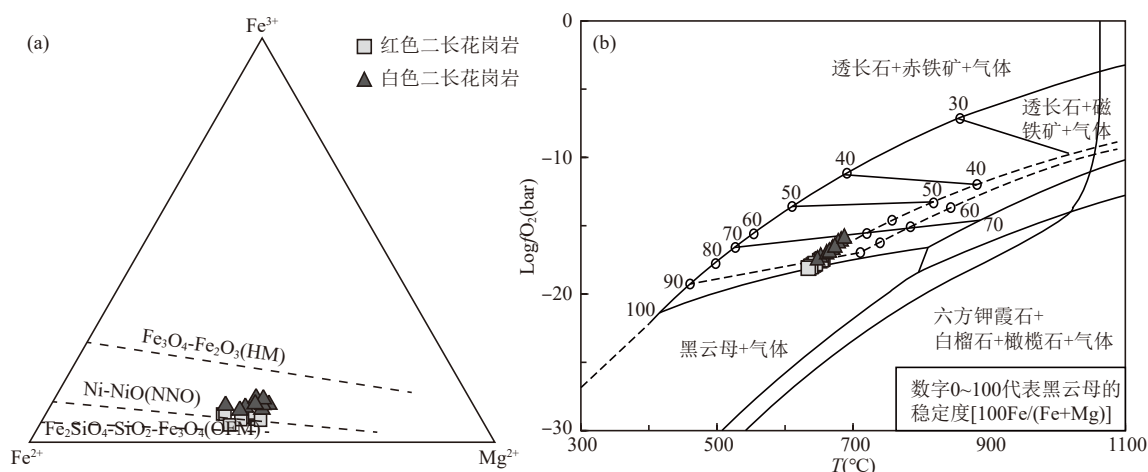


图10 撒岱沟门二长花岗岩中黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 三角图解 (a) 及 T (°C) - $\text{Log } f\text{O}_2$ (bar) 图解 (b, 据文献 [65])

Fig. 10 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} ternary diagram for biotite (a) and T (°C) - $\text{Log } f\text{O}_2$ (bar) diagram (b) of monzogranites from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit (after reference [65])

-18.30 bar, 形成于氧化环境, 共同构成良好的耦合成矿效应。岩浆活动缓慢冷却, 逐步形成的适宜温压条件和氧化环境是成矿流体活化、运移及钼元素分异富集的前提; 浅成一中浅成侵位深度则有利于富钼流体在构造优势部位沉淀成矿, 最终形成大型钼矿床。上述岩石学特征与成岩成矿年代学约束高度吻合, 进一步佐证红色二长花岗岩与白色二长花岗岩为同一岩体, 岩浆活动与成矿作用为一期连续事件。

5.4 构造背景

斑岩型钼矿的形成通常与高氧逸度、富挥发分 (特别是 F) 的钙碱性花岗质岩浆密切相关 [58, 71]。在全球尺度上, 此类矿床主要产于陆内裂谷或汇聚板块边缘的岩浆弧环境。撒岱沟门二长花岗岩属于钾玄岩系列花岗岩, 这类岩石通常形成于同碰撞或后碰撞构造背景 [75-76]。Pearce 等 [77] 发现不同构造环境产出的花岗岩, 其 $(Y + Nb)$ 、 $(Yb + Ta)$ 与 Rb 含量特征存在显著差异。撒岱沟门二长花岗岩样品均明显落在 $(Y + Nb)$ - Rb 图解 (图 11 (a)) 和 $(Yb + Ta)$ - Rb 图解 (图 11 (b)) 中的后碰撞与同碰撞花岗岩区域的重叠部位, 指示其形成于碰撞相关环境。在 $R1$ - $R2$ 构造背景判别图解 (图 11 (c)) 中, 样品投点主要集中于同碰撞区域或其附近, 进一步暗示其形成于碰撞相关的构造背景 [78]。这一结果也被 $(Rb/30)$ - Hf - $Ta \times 3$ 判别图解 (图 11 (d)) 所支持, 大多数样品投点于图解中的后碰撞区域, 同样支持碰撞相关的构造背景 [79]。

针对华北克拉通北缘的构造演化, 前人已开展大量研究并形成较为一致的认识: 古亚洲洋板块于早古生代向华北板块俯冲碰撞并持续至早石炭世, 期间华北克拉通北缘处于弧陆碰撞后的伸展环境 [80-85]; 在二叠纪期间, 华北板块沿索伦科尔-林西缝合带与蒙古微陆块碰撞, 华北克拉通北缘处于同碰撞造山环境, 并在三叠纪转为碰撞后伸展环境 [86-90]; 而后, 华北克拉通在侏罗纪-白垩纪期间, 受古亚洲洋闭合与蒙古-鄂霍茨克洋闭合后伸展等多重构造运动的共同作用发生克拉通破坏与岩石圈减薄 [91-93]。

本次研究获得撒岱沟门红色与白色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (247.2 ± 2.0) Ma 和 (245.1 ± 1.8) Ma, 为中三叠世岩浆活动产物; 综合前人对中三叠世华北克拉通北缘构造演化研究所取得的成果与本文取得的认识, 我们认为撒岱沟门二长花岗岩侵位于后碰撞伸展构造环境。

6 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明撒岱沟门钼矿床的红色二长花岗岩与白色二长花岗岩的侵位年龄分别为 (247.2 ± 2.0) Ma 和 (245.1 ± 1.8) Ma, 为中三叠世同期岩浆侵位产物。

(2) 岩石地球化学及黑云母成分特征表明, 红色二长花岗岩与白色二长花岗岩均具高硅、高钾、富碱特征, 轻稀土元素与大离子亲石元素 (Rb 、 K)、 Th 、 U 显著富集, 重稀土元素与 Nb 、 Ta 、 Ti 等高场强元素及 P 明显亏损; 为 I 型花岗

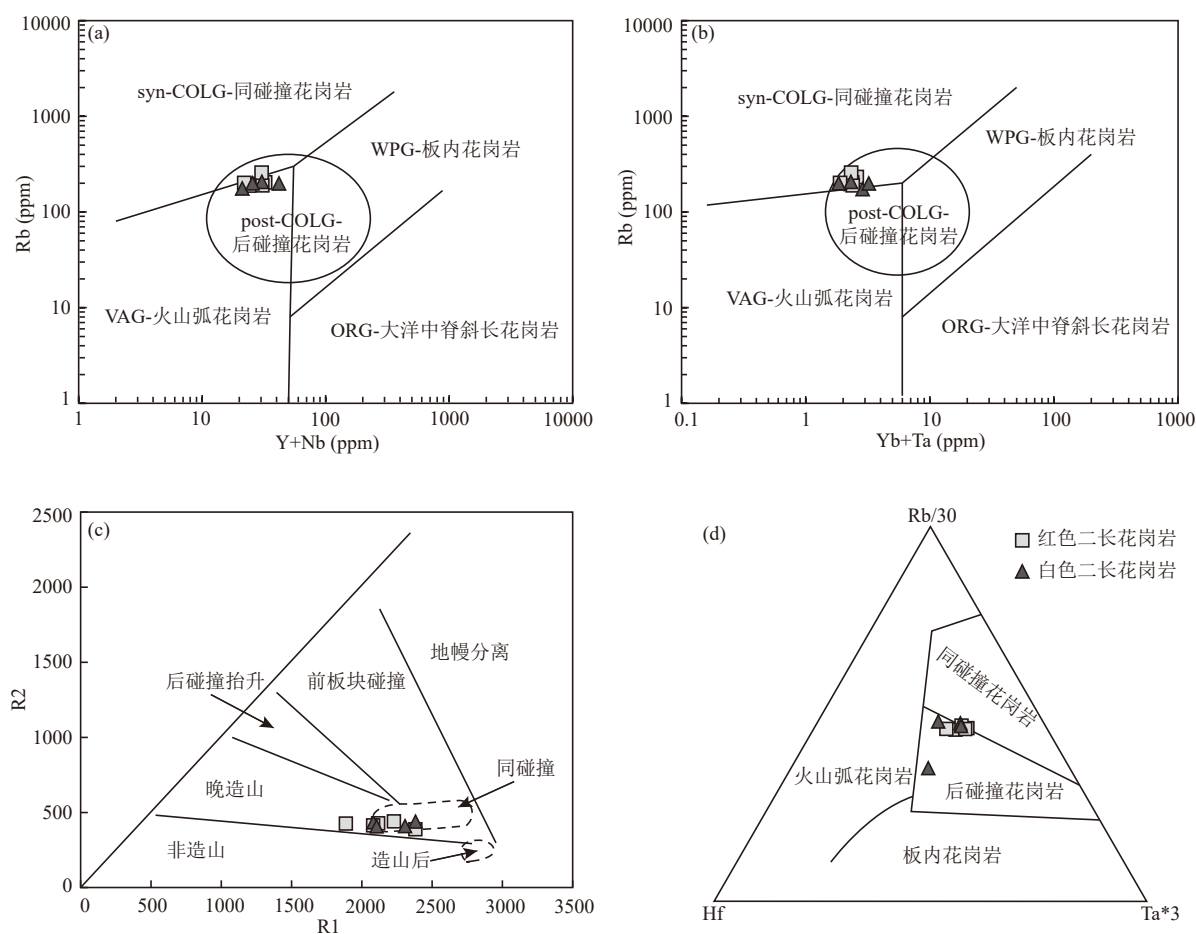


图 11 撒岱沟门二长花岗岩构造背景判别图解: (Y + Nb) - Rb 判别图解 (a, 底图据文献 [77]), (Yb + Ta) - Rb 判别图解 (b, 底图据文献 [77]), R1 - R2 图解 (c, 底图据文献 [78]) 及 Rb/30 - Hf - Ta*3 三角图解 (d, 底图据文献 [79])

Fig. 11 Tectonic setting discrimination diagrams for monzogranite from the Sadaigoumen Molybdenum Deposit: (a) (Y + Nb) - Rb diagram (base map after reference [77]), (b) (Yb + Ta) - Rb diagram (base map after reference [77]), (c) R1 - R2 diagram (base map after reference [78]), and (d) Rb/30 - Hf - Ta*3 ternary diagram (base map after reference [79])

岩, 属于过铝质钾玄岩系列; 其母岩浆均来源于地壳物质的部分熔融。

(3) 红色二长花岗岩与白色二长花岗岩具有高度相似的成因和形成环境, 结晶温度 592 ~ 773 °C、结晶压力 1.35 ~ 2.31 kbar、对应侵位深度 5.14 ~ 8.76 km、氧逸度介于 -15.41 ~ -18.30 bar, 形成于氧化环境, 均有利于钼元素的运移及富集。

(4) 红色二长花岗岩与白色二长花岗岩应为同一岩体。二长花岗岩体形成于后碰撞伸展构造环境, 其侵位、冷凝、结晶形成主体红色二长花岗岩, 白色二长花岗岩是红色二长花岗岩受后期高岭土化蚀变改造形成; 钼成矿作用紧随其后, 二者构成华北克拉通北缘燕辽地区中三叠世的一期连续的岩浆-钼成矿事件。

致谢: 本次野外和研究工作得到了河北鑫源矿业有限责任公司、河北华勘资环勘测有限公司的大力支持。样品处理和实验环节得到了廊坊岩拓地质服务有限公司、桂林理工大学、中国地质大学(北京)相关老师的指导和帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 代军治, 谢桂青, 段焕春, 等. 河北撒岱沟门斑岩型钼矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2519 - 2529.
- [2] 沈光银. 河北撒岱沟门钼矿床地质特征及找矿远景[J]. 矿产勘查, 2011, 2(5): 494 - 500.
- [3] 魏然, 王建国, 王义天, 等. 河北省丰宁县撒岱沟门钼矿床二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 619 - 620.
- [4] 魏然, 王建国, 王义天, 等. 河北省撒岱沟门斑岩型钼矿床

- 二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1736–1748.
- [5] 骆文娟, 张德会, 孙剑. 河北丰宁撒岱沟门钼矿区成矿岩体地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 491–505.
- [6] JIANG S H, LIANG Q L, BAGAS L. Re-Os ages for molybdenum mineralization in the Fengning region of northern Hebei Province, China: New constraints on the timing of mineralization and geodynamic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79: 873–883.
- [7] SUN Z J, WANG Z Q, YU H N, et al. Geochronology, geochemistry, and Hf Isotope of the granites from the Mo deposits in Fengning region, China: Implications for tectonic evolution and mineralization of the North China Craton[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(14): 434.
- [8] SUN Z J, WANG Z Q, YU H N, et al. Geochemistry, zircon U-Pb, and molybdenite Re-Os geochronology of the Mo deposit in Fengning region, Hebei Province, China[J]. Geological Journal, 2019, 54(6): 3619–3642.
- [9] WANG C Y, SUN Z J, LIU G H, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the intrusions from the Sadaigoumen Mo deposit in the northern margin of the North China Craton: Implications for mineralization process and tectonic evolution[J]. Geological Journal, 2020, 55(1): 949–966.
- [10] CHEN P W, ZENG Q D, ZHOU T C. Petrogenesis and Mo prospecting significance of Sadaigoumen granites on the northern margin of the North China Craton[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 214: 106536.
- [11] 张莉莉, 江思宏, 李红梅, 等. 河北丰宁撒岱沟门钼矿床成岩成矿年代学及成矿岩体地球化学特征[J]. 地球学报, 2019, 40(5): 708–724.
- [12] ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177–202.
- [13] WANG G R, WU G, XU L Q, et al. Molybdenite Re-Os age, H-O-C-S-Pb isotopes, and fluid inclusion study of the Caosiyao porphyry Mo deposit in Inner Mongolia, China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 728–744.
- [14] 河北省区域地质矿产调查研究所. 丰宁县幅 K50E017011 1: 5万地质图说明书[R]. 石家庄: 河北省自然资源档案馆, 1997.
- [15] 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[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [16] LUDWIG K R. User's manual for isoplot 3.75: A geochronological toolkit for Microsoft Excel (Special Publication No. 5) [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2012: 76.
- [17] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [18] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [19] 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(1): 313–345.
- [20] FOSTER M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[R]. Washington: United States Geological Survey, 1960: 11–49.
- [21] 任颖伟, 王红, 郑岩, 等. 冀北兰峡沟钼花岗岩成因及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2025, 44(3): 556–572.
- [22] 佟匡胤, 草晓东, 郭继海, 等. 小兴安岭北缘五道沟钼矿床成岩成矿年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2025, 61(4): 667–683.
- [23] NACHIT H, IBHI A, ABIA E H, et al. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites[J]. Comptes Rendus Géoscience, 2005, 337(16): 1415–1420.
- [24] 张若然. 内蒙古查干德尔斯钼矿成矿岩体地球化学及年代学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [25] 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 等. 内蒙古乌拉特后旗查干德尔斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 377–384.
- [26] 张艳飞, 梁帅. 内蒙古查干德尔斯钼矿成矿流体地球化学特征及矿床成因[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 106–114.
- [27] 吴昊, 武广, 陶宏, 等. 内蒙古卓资县大苏计斑岩型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1251–1267.
- [28] 吴昊, 武广, 陶宏, 等. 内蒙古大苏计斑岩钼矿床花岗质杂岩年代学、地球化学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 矿床地质, 2018, 37(2): 311–338.
- [29] 廖曼琪, 赖勇, 周弋涛, 等. 内蒙古大苏计斑岩型钼矿赋矿岩体的锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(4): 763–780.
- [30] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641.
- [31] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371–391.
- [32] CHAPPELL B W, WHITE A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1992, 83(1/2): 1–26.
- [33] 张招崇. K₂O-SiO₂图解的岩石系列划分问题[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1413–1416.
- [34] 杨阳, 王晓霞, 于晓卫, 等. 胶西北中生代花岗岩中黑云母和角闪石成分特征及成岩成矿意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3123–3136.
- [35] 陈敏, 王雁鹤, 谷强, 等. 松潘-甘孜地体青海吾和玛高分异 I 型花岗岩的识别与岩石成因[J]. 地质通报, 2024, 43

- (5): 789–801.
- [36] 李光洁, 陈永清, 尚志, 等. 扬子地块西缘峨山新元古代高分异 I 型花岗岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 20–39.
- [37] 孙玉洁, 李晓彦, 张超. 基于机器学习的黑云母成分判别花岗岩成因类型方法研究[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 523–540.
- [38] ABDEL-RAHMAN A M. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. Journal of Petrology, 1994, 35(2): 525–541.
- [39] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [40] BARBARIN B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. Lithos, 1999, 46(3): 605–626.
- [41] 杨爱雪, 吕水, 许曼, 等. 冀东高家店岩体锆石年代学和微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(2): 503–524.
- [42] 潘少军, 张建芳, 陈小友, 等. 浙江嵊泗正长花岗岩的形成时代与成因: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Hf 同位素的证据[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 430–444.
- [43] 赵光辉, 徐林刚, 宋彦博, 等. 老挝 Sepon 斑岩型铜金矿集区 Padan 岩体锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其地质意义[J]. 矿床地质, 2025, 44(1): 231–247.
- [44] 张潇, 王晰, 王鹏, 等. 吉南地区晚三叠世斑状花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 地质与勘探, 2025, 61(4): 751–761.
- [45] 任颖伟, 王红, 董国臣, 等. 内蒙古七家子早三叠世侵入岩成因及其地质意义[J]. 现代地质, 2025, 39(5): 1232–1248.
- [46] 王建民, 靳胜凯, 马明, 等. 内蒙古化德地区中二叠世德包图花岗岩成因及构造意义[J]. 地质与资源, 2026, 35(1): 1–11.
- [47] 刘青占, 蒋孝君, 王果, 等. 内蒙古南炮台花岗斑岩成因与构造环境: 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩元素组成制约[J]. 现代地质, 2024, 38(1): 154–168.
- [48] 马维, 马婧轩, 洪阳百合, 等. 嫩江洋闭合时限: 来自早二叠世大乌苏岩体锆石年代学和地球化学的制约[J]. 地质与资源, 2024, 33(3): 267–279.
- [49] 吴晓贺, 张聚全, 段站站, 等. 华北克拉通中部营等岩体的成因及构造意义: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学的约束[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 728–751.
- [50] 张招崇. La/Sm-La 图解是用于判别岩浆岩是分离结晶还是部分熔融形成的吗?[J]. 现代地质, 2024, 38(2): 547–548.
- [51] RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(3): 267–309.
- [52] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891–931.
- [53] 谢应雯, 张玉泉. 横断山不同成因类型花岗岩类岩石中黑云母的标型特征[J]. 矿物学报, 1987(3): 245–254.
- [54] STERN C R, KILIAN R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 123(3): 263–281.
- [55] WONES D R, EUCSTNN H P. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. American Mineralogist, 1965, 50: 1228–1272.
- [56] KEPPLER H, WYLLIE P J. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1991, 109(2): 139–150.
- [57] WEBSTER J D, SINTONI M F, DE VIVO B. The partitioning behavior of Cl, S, and H₂O in aqueous vapor- $\pm$ saline-liquid saturated phonolitic and trachytic melts at 200 MPa[J]. Chemical Geology, 2009, 263(1/2/3/4): 19–36.
- [58] SILLITOE R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010, 105(1): 3–41.
- [59] 谢刚, 李伟, 陈斌锋, 等. 赣南新安钨矿床花岗闪长岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素研究及其意义[J]. 矿床地质, 2025, 44(6): 1209–1223.
- [60] 杜晓飞, 王威, 张传林, 等. 新疆东天山哈尔里克山早二叠世超基性岩墙锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质力学学报, 2025, 31(1): 156–168.
- [61] 严松涛, 吴青松, 代雪健, 等. 四川新龙地区中酸性侵入岩年代学、地球化学及对甘孜-理塘洋演化过程的制约[J]. 地质通报, 2024, 43(Z1): 401–415.
- [62] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2): 295–304.
- [63] HENRY D J, GUIDOTTI C V, THOMSON J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. American Mineralogist, 2005, 90: 316–328.
- [64] 刘锬, 李赛赛, 辛良伟, 等. 白云母/黑云母 Ti 地质温度计的适用性: 桂东北资源韧性剪切带例析[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 774–786.
- [65] 赵裕达, 张文高, 刘昊, 等. 花岗岩侵位后的热应力时空演化及其影响因素[J]. 地质力学学报, 2024, 30(1): 38–56.
- [66] 王志强, 周美娟, 黎训飞, 等. 高硅花岗岩流体出溶作用的识别和意义[J]. 华东地质, 2024, 45(1): 26–48.
- [67] UCHIDA E, ENDO S, MAKINO M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. Resource Geology, 2007, 57(1): 47–56.
- [68] 丁高明, 晏国龙, 王坤明, 等. 东秦岭夜长坪钨矿床流体包裹体特征及对成矿作用的指示[J]. 现代地质, 2024, 38(4): 1177–1191.
- [69] 李永峰, 毛景文, 王燕, 等. 河南省嵩县鱼池岭斑岩钨矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2509–2522.

- [70] CARROLL M R, RUTHERFORD M J. Sulfur speciation in hydrous experimental glasses of varying oxidation state: Results from measured wavelength shifts of sulfur X-rays[J]. *American Mineralogist*, 1988, 73(7/8): 845 – 849.
- [71] CANDELA P A, BOUTON S L. The influence of oxygen fugacity on tungsten and molybdenum partitioning between silicate melts and ilmenite[J]. *Economic Geology*, 1990, 85(3): 633 – 640.
- [72] BALI E, KEPPLER H, AUDETAT A. The mobility of W and Mo in subduction zone fluids and the Mo-W-Th-U systematics of island arc magmas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 351/352: 195 – 207.
- [73] MENGASON M J, CANDELA P A, PICCOLI P M. Molybdenum, tungsten and manganese partitioning in the system pyrrhotite-Fe-S-O melt-rhyolite melt: Impact of sulfide segregation on arc magma evolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(22): 7018 – 7030.
- [74] FOLEY S F, WHELLER G E. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: The role of residual titanates[J]. *Chemical Geology*, 1990, 85(1/2): 1 – 18.
- [75] CONDIE K C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*[M]. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1982:400.
- [76] LIEGEOIS G P. Preface: some words on the post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 1998, 45: 15 – 17.
- [77] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956 – 983.
- [78] BATCHELOR R A, BOWDEN P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/2/3/4): 43 – 55.
- [79] 侯增谦, 杨志明, 张洪瑞, 等. 大陆碰撞成矿作用: 新认识与新进展[J]. *地学前缘*, 2025, 32(6): 179 – 209.
- [80] ZHANG X H, ZHANG H F, JIANG N, et al. Early Devonian alkaline intrusive complex from the northern North China Craton: A petrological monitor of post-collisional tectonics [J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167(4): 717 – 730.
- [81] 王金芳, 宋宇桐, 李康硕, 等. 冀北古元古代东瓦窑杂岩体的发现及其对华北克拉通伸展事件的制约[J]. *地质通报*, 2024, 43(1): 46 – 60.
- [82] 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 等. 华北克拉通新太古代晚期岩浆作用: 对构造体制和克拉通化的启示[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 77 – 94.
- [83] 王博, 赵国春. 古亚洲洋的最终闭合时限: 来自白乃庙岛弧带东段二叠纪-三叠纪岩浆作用的证据[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 1019 – 1030.
- [84] 甄世民, 王大钊, 白海军, 等. 华北克拉通北缘张家口-宣化地区古生代-中生代岩浆构造活动与成矿作用[J]. *岩石学报*, 2021, 37(6): 1619 – 1652.
- [85] 周舰. 冀北大隅固元古代花岗岩地球化学特征、岩石成因及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3): 828 – 839.
- [86] PEI F P, ZHANG Y, WANG Z W, et al. Early-Middle Paleozoic subduction-collision history of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from igneous and metasedimentary rocks of central Jilin Province, NE China [J]. *Lithos*, 2016, 261: 164 – 180.
- [87] LIU Y J, LI W M, FENG Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2017, 43: 123 – 148.
- [88] DU J Y, TAO N, JIANG B, et al. Recognition of Late Carboniferous arc-related volcanic rocks from Ongniud Banner, south-eastern Inner Mongolia: Evidence of southward subduction and implication of closure time for Palaeo-Asian Ocean[J]. *Geological Journal*, 2021, 56(9): 4499 – 4522.
- [89] 王丹阳, 李猛兴, 王权, 等. 华北克拉通减薄的岩浆浅表响应: 来自大青山岩体的证据[J]. *华东地质*, 2024, 45(2): 173 – 186.
- [90] SHI Y, SHI S S, LIU Z H, et al. Back-arc system formation and extinction in the southern Central Asian Orogenic Belt: New constraints from the Faku ophiolite in north Liaoning, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2022, 103: 64 – 83.
- [91] ZHANG S H, ZHAO Y, DAVIS G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 131: 49 – 87.
- [92] 王晓青, 刘敏, 毛景文. 华北克拉通中部造山带中条山地区古元古代盆地演化[J]. *地质通报*, 2024, 43(4): 546 – 560.
- [93] 薛燕萍, 袁小平, 梁景利, 等. 河北平泉市柴家沟钼矿床地质特征、找矿标志及成因探讨[J]. *矿产与地质*, 2023, 37(1): 39 – 48.