



辽东翁泉沟硼矿区二长花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约

赵 岩^{1,2}, 李生辉³, 杨中柱^{1,2}, 张 朋^{1,2}, 陈井胜^{1,2}, 张 璟^{1,2}, 陈 聪^{1,2}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 辽宁省自然资源厅深部矿产资源探测与评价重点实验室, 辽宁 沈阳 110032;
3. 辽宁省有色地质 103 队有限责任公司, 辽宁 丹东 118008

摘 要: 辽东地区翁泉沟硼矿区露天采场产出一条切穿硼矿体的二长花岗岩脉。本研究采集了该二长花岗岩脉的薄片、化学分析样品, 并进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试分析。该二长花岗岩脉具有高 SiO₂ 含量, 为 71.82%~75.68%, 较高的 Na₂O+K₂O 含量, 为 8.41%~10.57%, 属钙碱性-高钾钙碱性系列花岗岩。岩脉中锆石颗粒呈自形柱状, CL 图中较黑, 因铀含量较高引起。U-Pb 上交点年龄为 1842±29 Ma, 其中 9 个测点得出 1842±30 Ma 的加权平均年龄, 反映了该花岗岩脉侵位于古元古代晚期, 同时翁泉沟硼镁铁矿成矿应早于该时代。此年龄与前人研究古元古代胶辽吉造山过程中变质作用峰后时间相吻合, 反映了古元古代造山作用过程中伴随了硼矿成矿事件。

关键词: 锆石 LA-ICP-MS; U-Pb 年龄; 胶辽吉造山带; 翁泉沟硼镁铁矿; 辽宁省

ZIRCON U-Pb DATING OF MONZOGRAHITE DIKES IN WENGQUANGOU BORON OREFIELD, EASTERN LIAONING: Constraints on Metallogenic Age

ZHAO Yan^{1,2}, LI Sheng-hui³, YANG Zhong-zhu^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, CHEN Jing-sheng^{1,2},
ZHANG Jing^{1,2}, CHEN Cong^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Deep Mineral Resources Exploration and Evaluation, Liaoning Provincial Department of Natural Resources, Shenyang 110032, China;

3. Liaoning Non-Ferrous No.103 Geological Team Co., Ltd., Dandong 118008, Liaoning Province, China

Abstract: A monzogranite dike cuts through the ludwigite orebody in the open pit of Wengquangou boron deposit, Liaodong Peninsula. Samples of the dike are collected for thin section and zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology analysis. The monzogranite dike is characterized by high SiO₂ content (71.82%–75.68%) and high Na₂O+K₂O content (8.41%–10.57%), belonging to calc alkali-high K calc alkaline series granite. The zircon grains in the dikes are euhedral column in shape and dark in the CL image due to the high uranium content. The U-Pb upper intercept age is 1842 ±29 Ma, among which 9 testing points yield the weighted average age of 1842 ±30 Ma, indicating that the emplacement age of dike was Late Paleoproterozoic and the Wengquangou ludwigite deposit should be formed earlier. The age is consistent with the post-peak time of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogeny, reflecting the boron mineralization occurred during the process.

Key words: zircon LA-ICP-MS; U-Pb age; Jiao-Liao-Ji orogenic belt; Wengquangou ludwigite; Liaoning Province

收稿日期: 2022-03-20; 修回日期: 2022-05-06. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家重点研发计划项目“华北克拉通辽东/胶东重要成矿区带金多金属矿深部预测及勘查示范”(2018YFC0603804); 中国地质调查局地质调查项目“东北地区铜金稀有金属矿产地质调查”(DD20221678-03).

作者简介: 赵岩(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 从事辽东前寒武纪地质及成矿研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//cugzhaoyan@126.com

0 引言

硼矿作为一种重要的工业原料,除了自身能够提高玻璃制品强度和熔点外,还能与过渡元素及金属氧化物反应形成具有质轻、阻燃、耐磨、高硬度、高导电率等特性的化合物,在机械、冶金、化工、军事等领域均有重要应用^[1-2]。在新一轮的战略性矿产找矿行动(2021—2035年)中,硼矿已被列为我国战略性矿产资源。据自然资源部2021年《中国矿产资源报告》统计,我国硼矿资源分布以辽宁和青海为主,其中辽宁省硼矿禀赋最佳,储量约占全国的65%左右,对其开展成因、成矿时代等相关研究对于国家自然资源战略保障具有积极意义。

长期以来,关于硼矿成矿时代研究较少,主要是直接测试含硼矿物形成时代存在难度。目前利用常用赋矿围岩里尔峪组变质火山岩原岩形成时代和变质时代分别限定硼矿成矿的下限和上限年龄^[3-5],或利用与硼矿伴生的沥青铀矿测年^[6]等方法取得了一定的成果,基本确定成矿发生在古元古代晚期,但成矿区间仍较宽,相差100 Ma左右,在一定程度上影响了对硼矿成矿背景和成矿作用的理解。笔者在辽东半岛凤城地区翁泉沟硼矿露天采场内发现一条切穿硼镁铁矿体的二长花岗岩脉,通过对其开展锆石 U-Pb 年代学研究,有效限定了硼矿成矿时代,同时对区域范围内硼矿与古元古代造山作用的关系进行探讨,深化对硼矿成矿作用的认识。

1 地质背景与矿床地质

辽东半岛硼矿与金、铅锌、铜、钴、菱镁矿、石墨、玉石等构成区域范围内重要的辽东-吉南成矿带,其分布和产出与华北克拉通东部古元古代胶辽吉造山带的演化具有密切关系^[7-13]。胶辽吉古元古代造山带从早期发育,经历了大洋开启、岛弧俯冲^[14](或称“裂谷开合”^[15])、碰撞造山等阶段,大量沉积岩系包括后期同造山花岗岩、基性岩脉等卷入了峰期造山作用^[16-19],并经历了1.95~1.9 Ga和1.85 Ga左右分别对应峰期、峰后的变质作用^[20-23],变质作用引发的大量成矿流体发生广泛水岩反应,期间伴随了多种矿床的就位^[24-28],或早期贫矿的重新富集等过程^[29]。从辽东半岛硼矿分布来看,目前已发现硼矿分布均与南辽河群变质变形较强的地层和花岗岩体密切相关。

翁泉沟硼矿是产于辽宁省凤城市西的一处大型矿床,以富硼、铁,同时伴生磷、铀和稀土元素为特征。矿区出露的地层主要为南辽河群里尔峪组,地层分作两段,一段为角闪变粒岩与钠长浅粒岩互层,二段为蛇纹岩与硼镁铁矿互层。这两段地层同时也是矿区范围内铀、磷和稀土元素赋存的层位^[6](图1)。矿区变质沉积岩地层变形强烈,褶皱构造发育,翁泉沟向斜属区域范围内虎皮峪-翁泉沟-红石砬子复式背斜的次级褶皱构造。主矿体(包括附近的铁、磷矿点)的产出均受到褶皱构造的控制。矿区发育近南北向、北东向和北西向3组主要断裂构造,其中近南北向和北东向断裂较晚,为破矿构造或与矿化关系不大,而北西向构造对矿体有一定控制作用。古元古代二长花岗岩是矿区出露的主要侵入岩,与区域范围内古元古代片麻状花岗岩岩石学特征相近,前人对其进行过锆石测年研究,结果显示形成于2.17 Ga前后^[30-33]。

翁泉沟硼铁矿体严格受向斜构造控制,局部被后期构造破坏。可分为两个含矿层:其一分布在翁泉沟、业家沟和东台子地区;另一个分布在周家大院一带。主要矿石类型有磁铁矿型、硼镁石型、硼镁石-磁铁矿型和含硼镁铁矿-磁铁矿型4种。主要矿石矿物为硼镁铁矿、磁铁矿、硼镁石和透安石。脉石矿物有蛇纹石、镁橄榄石、透辉石、透闪石等。围岩蚀变主要有透闪石化、蛇纹石化、金云母化和电气石化,其中蛇纹石化规模较大^[3]。

2 样品描述与测试方法

在翁泉沟露天采场北壁可以观察到二长花岗岩脉切穿主矿体现象(图2a)。二长花岗岩呈浅灰色,中粗粒花岗结构,块状构造。主要矿物有:斜长石(约30%),常见其扭曲变形的双晶纹;微斜长石(约35%),交代早期斜长石,常见其典型的格子双晶;石英(约占20%),无色透明状产出;白云母(约5%),呈无色至浅灰绿色,片状产出(图2)。研究中采集3件二长花岗岩脉岩石样品进行主微量元素分析(编号WX-1—WX-3),3件样品分布在翁泉沟硼镁铁矿露天采场北壁,坐标为123°49'46.6"E,40°39'40.2"N。同时采集锆石 U-Pb 年龄测试样品1件(编号21WZ),距离全分析样品采样点较近。

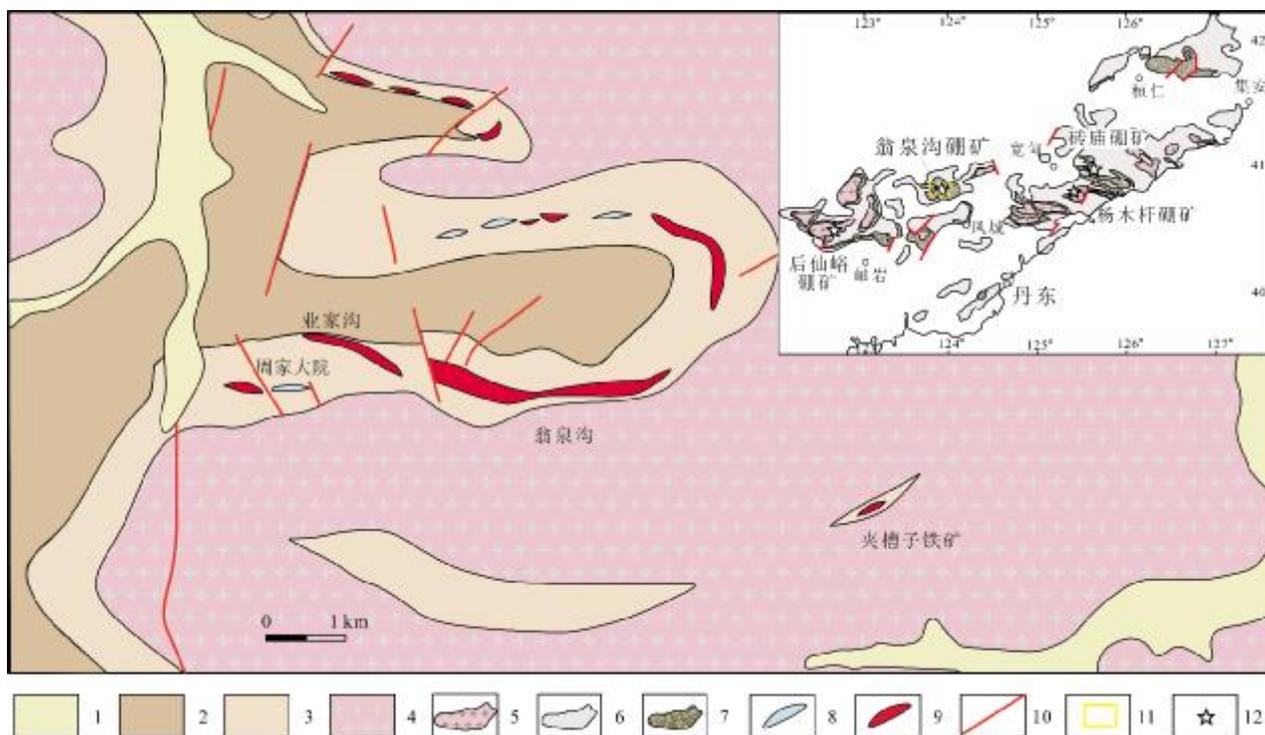


图1 辽东半岛翁泉沟硼矿床地质简图

(据文献[6]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Wengquangou boron deposit in Liaodong Peninsula

(Modified from Reference [6])

1—第四系 (Quaternary); 2—里尔峪组一段 (1st mem. of Lieryu fm.); 3—里尔峪组二段 (2nd mem. of Lieryu fm.); 4—古元古代片麻状二长花岗岩 (Paleoproterozoic gneissic monzogranite); 5—古元古代花岗岩类 (Paleoproterozoic granitoid); 6—北辽河群地层 (Northern Liaohe gr.); 7—南辽河群地层 (Southern Liaohe gr.); 8—磷矿体 (phosphate orebody); 9—硼镁铁矿体 (ludwigite orebody); 10—断裂 (fault); 11—研究区位置 (study area); 12—硼矿床 (boron deposit)

2.1 地球化学成分测试

3件岩石样品的主量和微量元素分析测试在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成. 主量元素测试分析利用了X射线荧光光谱法, 测试仪器为飞利浦PW2404X射线荧光光谱仪, 分析精度好于5%. 微量元素分析利用酸溶法制备样品并在HR ICPMS电感耦合等离子体质谱测试, 当元素含量大于 10×10^{-6} , 分析精度优于5%; 当含量小于 10×10^{-6} 时, 精度优于10%.

2.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试

锆石分析样品在全岩样品通过重磁分选后, 在双目镜下通过手选挑选出晶形完好、具代表性的锆石颗粒, 用环氧树脂固定于样品靶后抛光. 锆石样品阴极发光图像拍摄和 LA-ICP-MS 分析测试均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 详细的仪器参数和分析流程见文献[34]. GeolasPro 激光剥蚀系统由 MicroLas

光学系统和 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器组成, ICP-MS 仪器型号为 Agilent 7700e. 分析的激光束斑和频率分别为 $32 \mu\text{m}$ 和 5 Hz. 对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成^[35]. 锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3^[36] 完成.

3 结果

3.1 主微量元素含量分析

二长花岗岩的主微量元素含量结果见表1. 岩石 SiO_2 含量高, 为 71.82%~75.68%; K_2O 与 Na_2O 含量较高, 分别为 2.37%~3.96% 及 5.33%~7.22%; Al_2O_3 含量中等, 14.25%~16.06%; Fe_2O_3 和 FeO 含量很低, 均不足 1%; MgO 含量极低. 反映了该二长花岗岩脉属钙碱性-高钾钙碱性岩石系列(图3), 具有 A 型花岗岩的

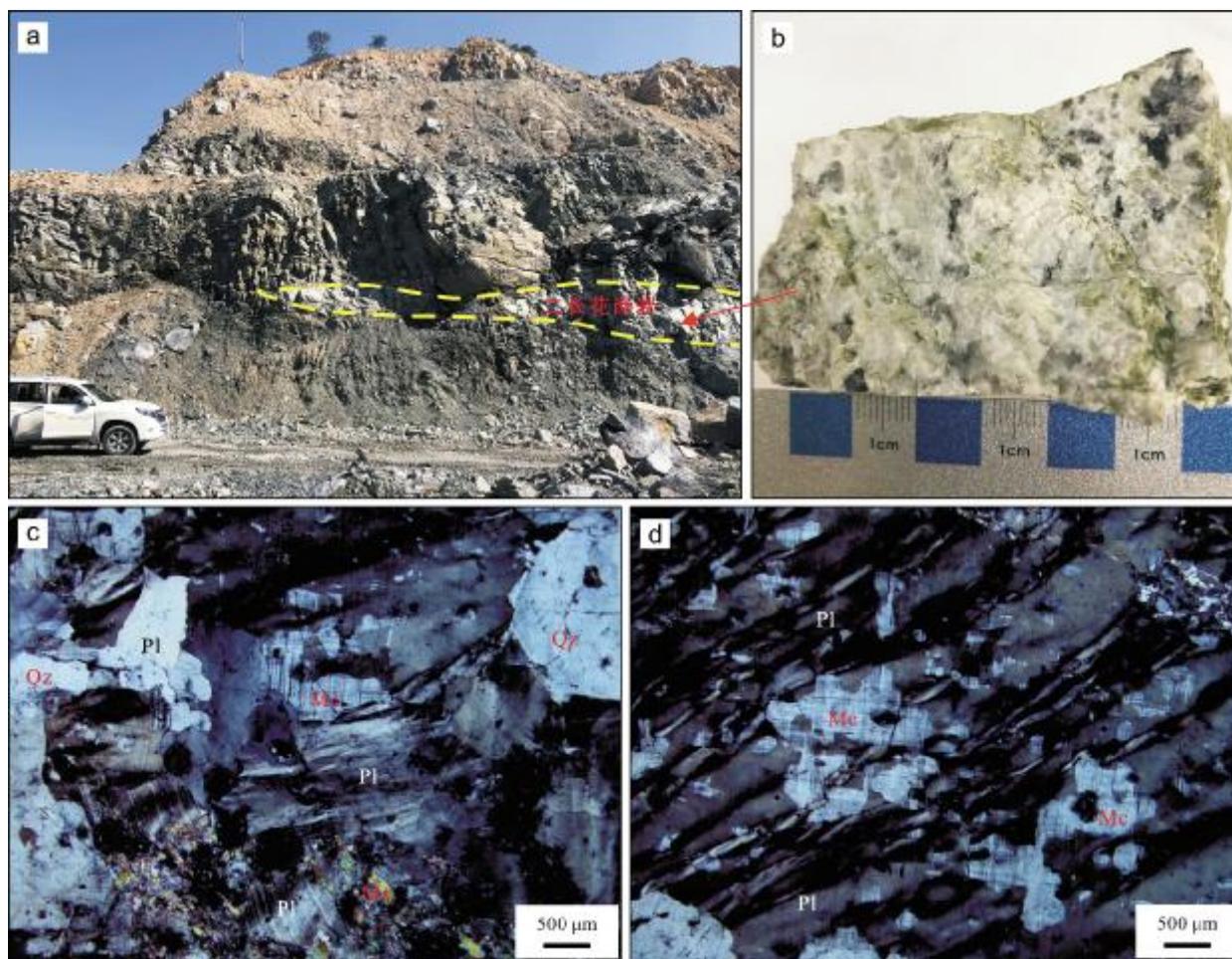


图2 翁泉沟硼镁铁矿床及二长花岗岩图片

Fig. 2 Photographs of Wengquangou ludwigite deposit and specimen and micrographs of monzogranite

Ms—白云母(muscovite); Pl—斜长石(plagioclase); Qz—石英(quartz); Mc—微斜长石(microcline)

特征(图4).

3.2 锆石 LA-ICP-MS 测年分析

从二长花岗岩脉中挑选的锆石颗粒均匀,自形程度较好,呈浅紫色-透明无色.在CL图像上可以看到锆石颗粒较黑,与锆石内U含量较高有关,基本均呈自形柱状,长约70~110 μm,宽约40~70 μm,内部发育振荡环带.由于U含量高,观察不是十分明显.锆石颗粒内部结构均一,甚少发育核幔结构(图5).因为U含量超高(通常在 $2\ 000\times 10^{-6}$ ~ $5\ 000\times 10^{-6}$ 之间),所以锆石Th/U值较低,但明显具有岩浆锆石特征.选取的25个锆石测点虽有一定铅丢失现象,但是仍得出了 $1\ 842\pm 29$ Ma的不一致曲线上交点年龄,MSWD值为2.4(图6a),其中9个测点分析得出了 $1\ 842\pm 30$ Ma的加权平均年龄(MSWD=1.6),二者吻合度高, $1\ 842$ Ma能够代表二长花岗岩脉的形成年龄.

4 讨论

4.1 二长花岗岩成岩年龄及其对硼镁铁矿成矿时代的制约

采自二长花岗岩脉的锆石在CL图像和锆石成分上均显示出岩浆锆石的特征.LA-ICP-MS测试得出了良好的不一致曲线上交点年龄,为 $1\ 842\pm 29$ Ma (MSWD=2.4),其中的9个测点分析得出的加权平均年龄也与此年龄一致, $1\ 842\pm 30$ Ma.综合认为二长花岗岩脉的形成时代应该为 $1\ 842$ Ma,属古元古代晚期,与区域范围内胶辽吉造山过程中变质作用峰后变质时代^[21-23]相吻合.

研究中同位素结果提供了翁泉沟硼镁铁矿成矿时代的良好制约.正如前述,前人在辽东地区硼矿成矿时代研究方面做了有益探索.从早期利用赋矿围岩里尔峪岩组的沉积时代对硼矿时代予以限定^[15],到利用

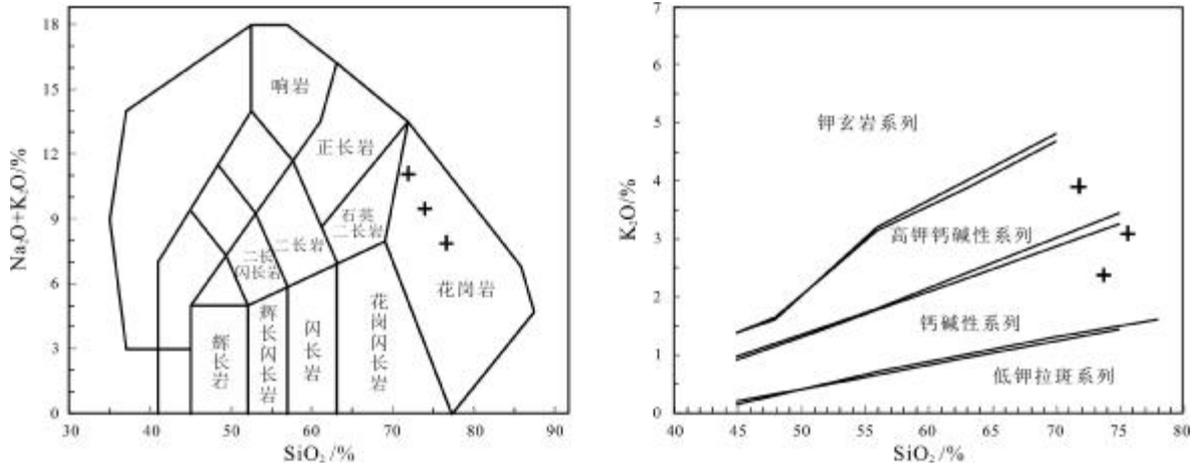


图 3 翁泉沟硼矿二长花岗岩判别图解
(底图据文献[37-38])

Fig. 3 Discrimination diagrams of monzogranite from Wengquangou boron deposit
(After References [37-38])

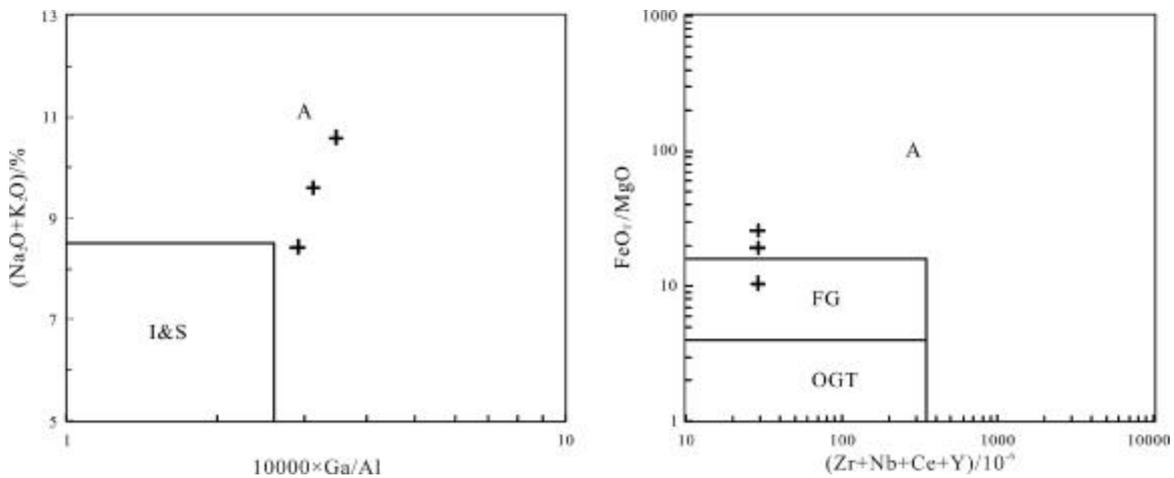


图 4 翁泉沟硼矿二长花岗岩岩性系列判别图解
(据文献[39]修改)

Fig. 4 Genetic type discrimination diagrams of monzogranite from Wengquangou boron deposit
(Modified from Reference [39])

里尔峪组变粒岩和电气石岩中锆石进行 U-Pb 年代学研究,得到变质火山岩成岩年龄为 2 170 Ma,认为其限定了硼矿的成矿时代下限,而电气石岩中锆石变质边测定出的 1 890~1 900 Ma 锆石年龄则能够代表区域范围内变质热液和硼成矿时代^[3]. 后期研究者利用翁泉沟硼矿内与硼矿伴生的沥青铀矿和晶质铀矿,分别开展了 LA-ICP-MS U-Pb 测年工作,获得了 1 908±23 Ma 和 1 896±14 Ma 的加权平均年龄,认为其代表了含铀矿物的形成年龄^[6]. 有研究者在开展了白云母

⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学,并结合了早期晶质铀矿 TIMS 研究结果基础上,认为 1 806 Ma 的结果能够代表硼矿成矿时代,而 1 908 Ma 的研究结果是混入了多余的 Pb 所致^[6]. 本研究利用切穿硼矿体的二长花岗岩脉中采集的锆石进行 U-Pb 年龄测试,获得的岩脉年龄为 1 842 Ma 左右. 根据野外切穿关系岩脉形成明显晚于硼镁铁矿成矿,即硼镁铁矿的成矿时代应早于 1 842 Ma. 综合前人对硼矿成矿时代的研究结果,其 1 896~1 908 Ma 的同位素测试结果应该能够比较好的限定翁泉沟硼镁

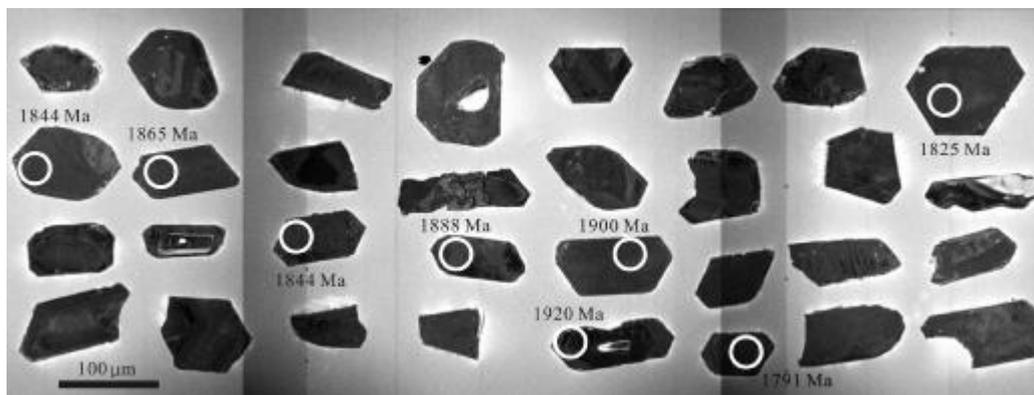


图 5 二长花岗岩部分锆石阴极发光图像

Fig. 5 The CL images of selected zircons in monzogranite from Wengquangou boron deposit

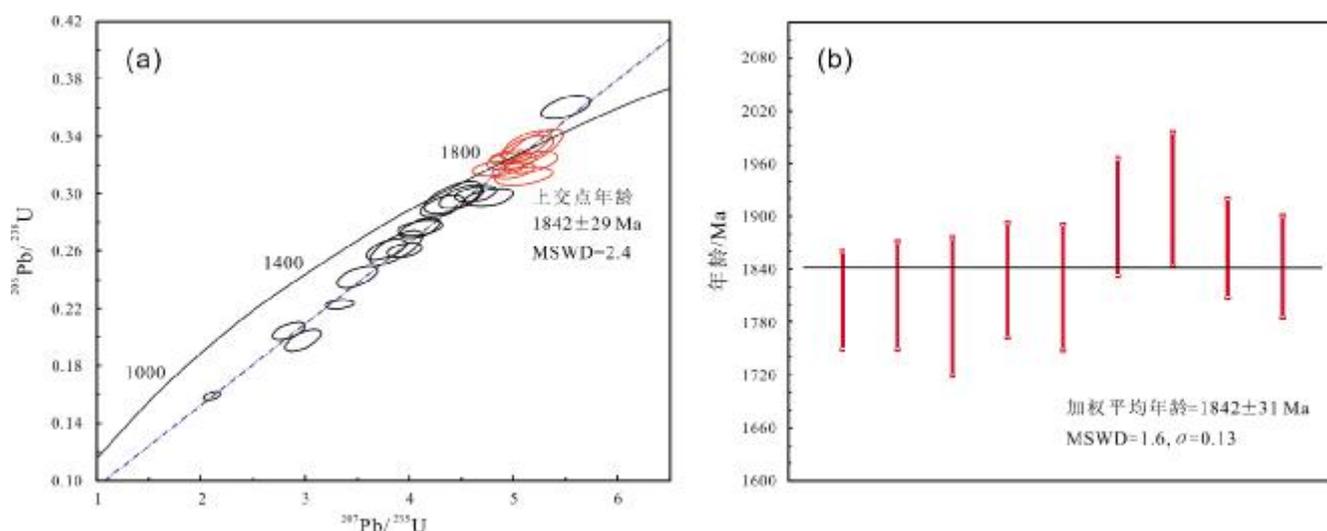


图 6 翁泉沟硼矿二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图解

Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram and weighted average age of zircon grains in monzogranite from Wengquangou boron deposit

铁矿的成矿时代。

4.2 地质意义

研究中发现产于翁泉沟硼镁铁矿的二长花岗岩脉年龄与华北克拉通完成克拉通化时间相吻合, 应形成于古元古代胶辽吉造山带碰撞造山结束之后。从区域范围来看, 该阶段仍伴随了大量的岩浆活动, 以碱性花岗岩、花岗伟晶岩为代表, 包括矿洞沟正长岩、三家子和宽甸地区花岗伟晶岩等, 年代学研究显示其形成年龄为 1 840~1 880 Ma^[21]。碱性花岗岩和伟晶岩脉的产出代表了造山后由挤压变为区域拉伸的构造环境^[40-43]。本研究中的二长花岗岩脉同样表现出全碱含量较高的地球化学特征, 产于胶辽吉造山活动晚阶段区域范围内岩石圈减薄背景之下。该阶段不仅伴随了岩浆活动, 同时也对应了峰后变质作用。据报道, 南辽

河群的变质作用局部能够达到麻粒岩相程度^[23, 44], 伴随了大量的变质流体与水岩反应、成矿作用的发生。

古元古代晚期是辽东-吉南成矿带中早期区域成矿作用的集中时段。早期研究通过似层状产出的硫铁矿、铜钴矿等矿床特征, 将其成矿时代限定在与赋矿围岩时代一致的古元古代^[15]。近年来同位素年代学测年技术的发展提供了更加有力的证据, 如喻钢等^[45]和刘军等^[46]分别在猫岭金矿获得了 2 316±140 Ma 和 2 287±95 Ma 的等时线年龄; 在青城子榛子沟铅锌矿获得了 1 798±8 Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄等^[28]。同时, 造山作用过程中的变质作用也引起已有矿产的富集和改造, 如在弓长岭 BIF 型铁矿研究中发现, 早期褐铁矿经历了 1 860 Ma 左右的变质作用变为品位更高的磁铁矿^[29]。翁泉沟硼镁铁矿的就位很可能就与造山过程晚期强烈

变质作用有关. 在高温变质流体的影响下, 早期地层中预富集的硼元素开始活化、富集, 最终在合适的构造空间下就位成矿.

5 结论

根据对辽东半岛凤城地区翁泉沟硼镁铁矿内切穿矿体二长花岗岩的相关研究, 并对成矿带内多种矿床成矿时代进行总结, 得出如下结论.

1) 二长花岗岩脉中锆石颗粒呈现出明显岩浆锆石的特征, 测试分析得出 $1\ 842\pm 29\ \text{Ma}$ 的 U-Pb 上交点年龄, 其中 9 个测点获得了 $1\ 842\pm 30\ \text{Ma}$ 的加权平均年龄, 反映了花岗岩脉侵位于古元古代晚期, 翁泉沟硼镁铁矿成矿应早于 $1\ 842\ \text{Ma}$.

2) 二长花岗岩脉形成于拉伸环境, 产于胶辽吉造山活动晚阶段区域范围内岩石圈减薄背景之下.

3) 古元古代晚期是辽东-吉南成矿带中早期区域成矿作用的集中时段之一, 形成新的矿产资源或已有矿产的再次富集, 包括硼矿在内的金、铅锌、富铁矿、石墨等.

致谢: 谨以此文庆祝沈阳地质调查中心成立六十周年! 六十年砥砺前行, 一甲子再创辉煌! 祝沈阳地质调查中心在推进地质调查事业转型升级、开创新时代东北地区地质调查新格局方面取得更大成就! 感谢辽宁地质勘探矿业集团第七地质大队有限公司领导对野外考察的大力支持, 感谢审稿人提出的建设性修改意见.

参考文献(References):

[1] 林秋婷, 陈晨, 刘海洋. 硼的地球化学性质及其在俯冲带的循环与成矿初探[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 5-12.
Lin C T, Chen C, Liu H Y. Boron prospecting based on boron cycling in subduction zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(1): 5-12.

[2] 焦森, 郑厚义, 屈云燕, 等. 全球硼矿资源供需形势分析[J]. 国土资源情报, 2020, 27(10): 85-89.
Jiao S, Zheng H Y, Qu Y Y, et al. Supply and demand situation of global boron resources[J]. Land and Resources Information, 2020, 27(10): 85-89.

[3] 张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 等. 辽东后仙峪硼矿区古元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(6): 985-999.
Zhang Y F, Liu J D, Xiao R G, et al. The hyalotourmalites of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning: Zircon features and

SHRIMP dating[J]. Earth Sciences — Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(6): 985-999.

[4] Liu J D, Xiao R G, Zhang Y F, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tourmalinites from boron-bearing series of borate deposits in eastern Liaoning and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(1): 118-130.

[5] Hu G Y, Li Y H, Fan C F, et al. In situ LA-MC-ICP-MS boron isotope and zircon U-Pb age determinations of Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning Province, Northeastern China [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 1127-1141.

[6] 赵宇霆. 辽宁凤城翁泉沟地区含铀硼铁矿床成岩成矿年代学研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018: 1-85.
Zhao Y T. Diagenetic and metallogenic geochronology of uranium-bearing boron iron deposit in Wengquangou area, Fengcheng, Liaoning Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 1-85.

[7] 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2665-2682.
Zhai M G, Peng P. Paleoproterozoic events in the North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2665-2682.

[8] 李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 等. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义[J]. 地质论评, 2001, 47(1): 9-18.
Li S Z, Han Z Z, Liu Y J, et al. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group [J]. Geological Review, 2001, 47(1): 9-18.

[9] 孙中任, 赵雪娟, 段会升, 等. 华北板块与西伯利亚板块缝合带之重磁证据[J]. 地质与资源, 2020, 29(5): 461-466.
Sun Z R, Zhao X J, Duan H S, et al. Gravity and magnetic evidences for the suture zone between North China plate and Siberian plate [J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 461-466.

[10] 张允平, 那福超, 宋维民, 等. 对东北地区古生代几个重要时段地层古生物信息的区域构造学思考[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 1-13.
Zhang Y P, Na F C, Song W M, et al. Regional tectonic implication of the Paleozoic stratigraphic paleontology information in Northeast China [J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 1-13.

[11] Yan X L, Chen B. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic Houxianyu borate deposit, NE China: Implications for the origin of borate deposit [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 94: 252-266.

[12] Dong A G, Zhu X K, Li Z H, et al. A multi-isotope approach towards constraining the origin of large-scale Paleoproterozoic B-(Fe) mineralization in NE China [J]. Precambrian Research, 2017, 292: 115-129.

[13] Wang Z Q, Chen B, Yan X L. Geochemistry and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic amphibolites, NE China: Implications for the origin of borate deposit [J]. Precambrian Research, 2019, 326: 258-271.

- [14]白瑾. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 47-89.
- Bai J. The Precambrian geology and Pb-Zn mineralization in the northern margin of North China platform[M]. Beijing: Geology Press, 1993: 47-89. (in Chinese)
- [15]张秋生, 杨振升, 刘连登. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-574.
- Zhang Q S, Yang Z S, Liu L D. Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-574.
- [16]赵岩, 寇林林, 张朋, 等. 辽东半岛隆昌地区~2113 Ma 变辉长岩地球化学与 Hf 同位素研究: 对胶辽吉造山带构造演化的制约[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3333-3345.
- Zhao Y, Kou L L, Zhang P, et al. Characteristics of geochemistry and Hf isotope from meta-gabbro in Longchang area, Liaodong Peninsula: Implications on evolution of the Jiao-Liao-Ji Paleoproterozoic orogenic belt[J]. Earth Science, 2019, 44(10): 3333-3345.
- [17]Li Z, Chen B, Wei C J, et al. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology, whole-rock Sm-Nd isotopes, and geochemistry [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 111: 711-732.
- [18]Li Z, Chen B, Wang J L. Geochronological framework and geodynamic implications of mafic magmatism in the Liaodong Peninsula and adjacent regions, North China Craton [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016, 90(1): 138-153.
- [19]Zhao Y, Lin S F, Zhang P, et al. Geochronology and geochemical characteristics of Paleoproterozoic syn-orogenic granitoids and constraints on the geological evolution of the Jiao-Liao-Ji orogenic belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 2021, 365: 106386.
- [20]卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社, 1996: 219-230.
- Lu L Z, Xu X C, Liu F L. Early Precambrian khondalite series in Northern China [M]. Changchun: Changchun Publishing House, 1996: 219-230. (in Chinese)
- [21]刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 胶-辽-吉古元古代造山活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 2816-2846.
- Liu F L, Liu P H, Wang F, et al. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 2816-2846.
- [22]刘平华, 蔡佳, 邹雷. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 P-T-t 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2649-2674.
- Liu P H, Cai J, Zou L. Metamorphic P-T-t path and its geological implication of the Sanjiazhi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and zircon U-Pb dating[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(9): 2649-2674.
- [23]文飞, 田忠华. 辽东半岛辽河群变泥质岩变质变形研究: 对古元古代造山作用及折返过程的启示[J]. 岩石学报, 2021, 37(2): 619-635.
- Wen F, Tian Z H. A metamorphic and deformational study of metapelites in the Liaohe Group located at Liaodong Peninsula: Significance to process of Paleoproterozoic orogenesis and exhumation [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(2): 619-635.
- [24]赵岩, 杨宏智, 杨凤超, 等. 辽东半岛青城子矿田典型金矿成因: 来自硫、氢、氧同位素的证据[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 21-28.
- Zhao Y, Yang H Z, Yang F C, et al. Genesis of typical gold deposits in Qingchengzi orefield, Liaodong Peninsula: Evidences from S-D-O isotopes[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 21-28.
- [25]赵岩, 张朋, 毕中伟, 等. 沉积建造在辽东半岛古元古代杨木杆硼矿富集成矿过程中的重要作用[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(2): 207-219.
- Zhao Y, Zhang P, Bi Z W, et al. Key role of sedimentary formation played in the mineralization process of the Paleoproterozoic Yangmugan boron deposit in Liaodong Peninsula, NE China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 207-219.
- [26]王林世, 彭虎, 郭亚波, 等. 辽宁东平金矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 246-251.
- Wang L S, Peng H, Guo Y B, et al. Geological characteristics and prospecting directions of Dongping gold deposit in Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 246-251.
- [27]隋真龙, 张琦, 冯啸宇, 等. 辽宁宽甸县爱林铁矿地质特征及控矿因素分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 120-125.
- Sui Z L, Zhang Q, Feng X Y, et al. Analysis on the geology and ore-controlling factors of Ailin iron deposit in Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 120-125.
- [28]Ma Y B, Bagas L, Xing S W, et al. Genesis of the stratiform Zhenzigou Pb-Zn deposit in the North China Craton: Rb-Sr and C-O-S-Pb isotope constraints[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 79: 88-104.
- [29]Li L X, Zi J W, Li H M, et al. High-grade magnetite mineralization at 1.86 Ga in Neoproterozoic banded iron formations, Gongchangling, China: In situ U-Pb geochronology of metamorphic-hydrothermal zircon and monazite[J]. Economic Geology, 2019, 114(6): 1159-1175.
- [30]胡古月, 李延河, 范昌福, 等. 辽东翁泉沟硼镁铁矿床海相蒸发成因: 来自稳定同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 2014, 33(4): 821-832.
- Hu G Y, Li Y H, Fan C F, et al. Marine evaporative genesis of Wengquanguo ludwigite deposit in eastern Liaoning Province: Evidences from stable isotopic compositions[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(4): 821-832.

- [31]赵岩, 张朋, 毕中伟, 等. 辽东岫岩地区两类古元古代花岗岩年代学、地球化学及地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(11): 4072-4090.
- Zhao Y, Zhang P, Bi Z W, et al. Geochronology and geochemistry of two types of Paleoproterozoic granites and their geological implications in the Xiuyan area, Liaodong Peninsula[J]. Earth Science, 2020, 45(11): 4072-4090.
- [32]Liu J, Zhang J, Liu Z H, et al. Geochemical and geochronological study on the Paleoproterozoic rock assemblage of the Xiuyan region: New constraints on an integrated rift-and-collision tectonic process involving the evolution of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton [J]. Precambrian Research, 2018, 310: 179-197.
- [33]Zhao Y, Zhang P, Li Y, et al. Geochemistry of two types of Palaeoproterozoic granites, and zircon U-Pb dating, and Lu-Hf isotopic characteristics in the Kuandian area within the Jiao-Liao-Ji belt: Implications for regional tectonic setting[J]. Geological Journal, 2020, 55(11): 7564-7580.
- [34]Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan orogen, southern Central Asian orogenic belt (CAOB) [J]. Precambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [35]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.
- [36]Ludwig K R. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [37]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(5): 523-548.
- [38]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [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]Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Are the south and north Liaohe Groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints[J]. Gondwana Research, 2006, 9(1/2): 198-208.
- [41]Li S Z, Zhao G C. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the eastern block of the North China Craton [J]. Precambrian Research, 2007, 158(1/2): 1-16.
- [42]Li Z, Chen B, Wei C J. Is the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt (North China Craton) a rift? [J]. International Journal of Earth Sciences, 2017, 106(1): 355-375.
- [43]Li Z, Chen B, Yan X L. The Liaohe Group: An insight into the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 2019, 326: 174-195.
- [44]Liu F L, Liu L S, Cai J, et al. A widespread Paleoproterozoic partial melting event within the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within pelitic granulites and its tectonic implications[J]. Precambrian Research, 2019, 326: 155-173.
- [45]喻钢, 杨刚, 陈江峰, 等. 辽东猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1248-1252.
- Yu G, Yang G, Chen J F, et al. Re-Os dating of gold-bearing arsenopyrite of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, Northeast China and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(14): 1509-1514.
- [46]刘军, 李铁刚, 段超. 辽宁猫岭大型金矿床成岩成矿年龄及同位素地球化学特征[J]. 地质通报, 2018, 37(7): 1325-1337.
- Liu J, Li T G, Duan C. Geochronology and isotopic geochemistry characteristics of the Maoling large gold deposit, Liaoning Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(7): 1325-1337.