

文章编号: 0258-7106(2014)02-0397-09

辽东明安硼镁矿床混合花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约*

胡古月¹, 范昌福^{1* *} , 李延河¹, 侯可军¹, 刘², 王天慧³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 金玛宽甸矿业有限公司, 辽宁 丹东 118200; 3 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要 辽东硼矿赋存于辽吉裂谷中央凹陷带内的里尔峪组地层中, 形成于火山活动与蒸发沉积交替旋回的环境, 后期经历了低压角闪岩相至混合岩化变质作用, 属沉积-变质型硼矿床, 主矿区包括有后仙峪、翁泉沟和砖庙-杨木杆三处。混合岩化作用使裂谷早期喷发的酸性火山岩发生原地重熔, 形成大量层状产出的混合花岗岩、变粒岩和浅粒岩。文章利用 LA-MC-ICP-MS 技术对砖庙-杨木杆矿区明安硼镁矿体下盘, 与上部地层发生同构造变形的层状混合花岗岩进行了锆石 U-Pb 年龄的测定, 尝试解决明安硼矿的成矿时代问题。混合花岗岩的锆石阴极发光图像显示, 锆石具有核-边结构, 核部的震荡环带为岩浆成因, 边部为变质增生成因。锆石核部的 U-Pb 定年结果表明: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $(2229 \pm 3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.8$), Th/U 值为 $0.4479 \sim 1.1309$ 。因此, 笔者认为 $(2229 \pm 3) \text{ Ma}$ 年龄代表了层状混合花岗岩原岩——酸性火山岩的喷发时代, 也代表了硼镁矿的初始含硼蒸发岩形成时代的下限。

关键词 地球化学; LA-MC-ICP-MS; 锆石 U-Pb 年龄; 混合花岗岩; 明安硼镁矿床; 辽河群; 里尔峪组

中图分类号: P618.21⁺9; P618.46

文献标志码: A

Zircon U-Pb dating of migmatitic granites of Ming'an Mg-borate deposit in Kuandian area, eastern Liaoning Province, and its constrains on mineralization age

HU GuYue¹, FAN ChangFu^{1* *} , LI YanHe¹, HOU KeJun¹, LIU Yi² and WANG TianHui³

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Jinma Kuandian Mining Co., Ltd., Dandong 118200, Liaoning, China; 3 Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract

Borate deposits in eastern Liaoning belong to a metamorphic volcano-sedimentary mineral type, and are distributed in the central part of "Liao-Ji rift". They were formed in an environment of volcanism and evaporation, and commonly experienced amphibolite facies metamorphism and migmatitization. The main ore districts include Houxianyu, Wenquangou and Zhuangmiao-Yangmugan Mg and Mg-Fe borate ore districts. Due to the regional intense migmatitization, the acid volcanic rocks were melted in-situ, and large mounts of layered migmatitic granites, leptytes and leptynites were formed. This paper reports an integrated study of U-Pb zircon age (LA-

* 本文得到国土资源部公益性行业科研专项经费项目(项目号: 201211074-2)资助

第一作者简介 胡古月, 男, 1985 年生, 博士研究生, 同位素地球化学专业。Email: wanghuguyue@126.com

** 通讯作者 范昌福, 男, 1979 年生, 副研究员, 长期从事地质环境研究。Email: fancf@cags.ac.cn

收稿日期 2013-03-27; 改回日期 2013-12-26。苏杭编辑。

MC-ICP-MS) of the layered migmatitic granites in the Ming'an borate deposit of the Zhuangmiao-Yangmugan ore district. This study may give a solution of the timing of the volcanic-sedimentary association and borate deposits. The zircon CL images of the migmatitic granites show that they have uniform core-rim microstructures, the cores have preserved the magmatic zone, and the rims display metamorphic structure. The U-Pb analyses of the magmatic core show a weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of (2229 ± 3) Ma (MSWD=0.8) and Th/U ratios of $0.4479 \sim 1.1309$. It is thus held that the weighted mean age of (2229 ± 3) Ma might represent the lower limit forming age of the boron-bearing evaporites.

Key words: geochemistry, LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating, migmatitic granite, Ming'an Mg-borate deposit, Liaoh Group, Lieryu Formation

赋存于古元古代辽吉裂谷中的硼镁(铁)矿占中国硼矿石产量的 90% 以上(刘敬党, 2006)。前人普遍认为硼矿床的形成与裂谷早期发生的火山活动密切相关(冯本智等, 1998; Peng et al., 2002; 肖荣阁等, 2003; 刘敬党等, 2007; 王翠芝等, 2008a, 2008b), 几乎所有的硼矿床(点)均分布在裂谷中央凹陷区的里尔峪组火山沉积地层中(陈荣度, 1990)。关于辽东硼矿床的成因目前存在 3 类主流观点: ① 蒸发沉积受变质改造矿床, 强调蒸发沉积是矿床硼质来源的决定性因素, “受变质”是在同生沉积的基础上的发展和演化(Peng et al., 1995, 2002; Jiang et al., 1997); ② 与海相火山活动有关的热液沉积矿床, 以热水沉积为主, 叠加后期变质改造(冯本智等, 1994; 1998; 邹日等, 1995; 谢宏远等, 1998); ③ 火山喷发初始富集—后期混合岩化热液成矿, 即硼来源于海底火山喷发, 后期的混合岩化作用是富集成矿的关键因素(王翠芝等, 2008a)。因此, 关于硼镁矿床的主成矿时代也存在 2 种观点: ① 辽吉裂谷早期演化的火山-沉积建造形成时期(Peng et al., 1995; 冯本智等, 1994; 李雪梅等, 2008; Xu et al., 2004; 曲洪祥等, 2005); ② 后期的区域变质和混合岩化时期(董申保, 1999; 王翠芝等, 2008a)。

由于辽吉裂谷内的硼酸盐矿石及周缘的电气石矿物普遍具有较高的硼同位素组成, 因此作者认为辽东硼矿属蒸发沉积成因。硼矿床外围分布大量的层状混合花岗岩、各类变粒岩和浅粒岩(姜春潮, 1987)地球化学特征显示其原岩具有酸性火山岩(邹日等, 1995)或凝灰岩(Peng et al., 1995, 1998; Jiang et al., 1997)的特征。因此, 辽东硼矿可能是形成于火山活动与蒸发沉积交替旋回的环境, 火山物质对含硼蒸发沉积物的长期保存起到了较好的保护作用(Peng et al., 1995; 2002; Jiang et al., 1997)。其中, 分布最广的混合花岗岩在野外明显呈

层状产出, 手标本上有条痕状结构(暗色矿物主要为角闪石和磁铁矿), 其岩石地球化学特征介于 A 型花岗岩和混合花岗岩之间, 致使长期以来有 3 种观点并立: ① 里尔峪组下部的酸性火山岩部分熔融形成的混合岩(姜春潮, 1987; 赵凤顺等, 1989; 刘敬党等, 2005, 2007); ② 侵位于辽河群下部的花岗岩(张秋生, 1984; Peng et al., 2002); ③ 辽河群的基底岩石, 属裂谷早期侵位的 A 型花岗岩(Luo et al., 2004; 路孝平等, 2004a, 2004b; Li et al., 2007)。本次研究在总结区域地质和地球化学工作的基础上, 采集了辽宁省宽甸县杨木杆-砖庙硼矿区的明安硼矿床下盘的混合花岗岩样品。此区域内呈层状产出的混合花岗岩与上部层位中的黑云变粒岩和镁质大理岩渐变过渡, 并发生同构造变形, 精确测定其 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄有助于深入了解辽河群的初始沉积时代, 对区域上呈大规模分布的混合花岗岩(俗称辽吉花岗岩)(姜春潮, 1987)的成因机制能提供一些有益的参考, 并有效判断宽甸地区硼矿的蒸发沉积成矿时代。

1 地质背景

1.1 辽河群

辽东元古代裂谷呈近 EW 向展布, 西窄东宽呈楔形横贯辽宁东部与吉林南部。西以瓦房店、盖州、大石桥一带为界, 向东经岫岩、凤城、宽甸、桓仁进入吉林长白山和朝鲜, 南北宽约 100 km, 东西长约 300 km(翟裕生等, 2008)。裂谷内沉积了一套古元古代火山-沉积岩, 长春地质学院区调队将其命名为辽河群, 以底部石英岩不整合于鞍山群变质岩之上, 自下而上分为 5 个组: 浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组, 变质程度达绿片岩相至角闪岩相(姜春潮, 1987)。根据岩相建造与构造特征, 裂谷带

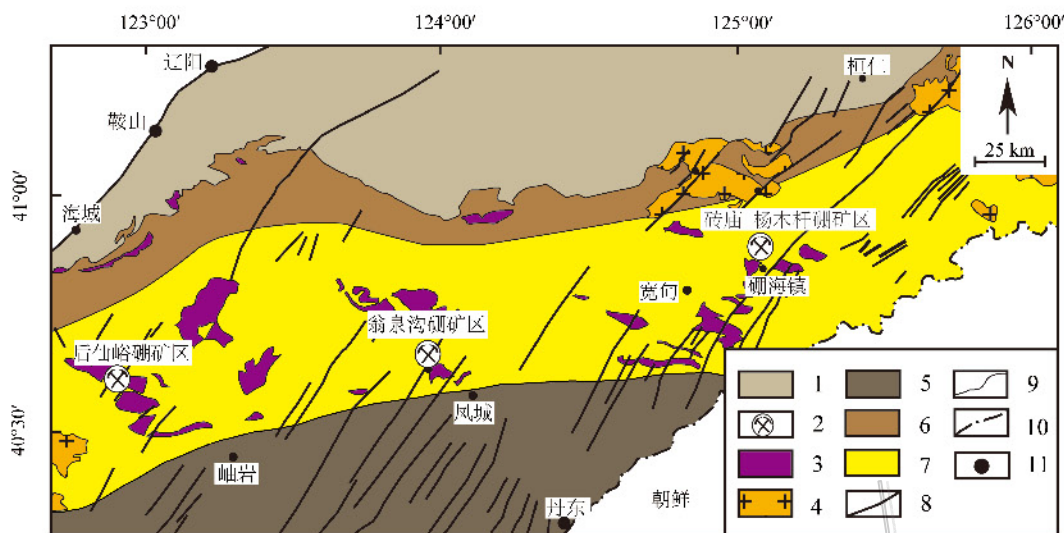


图1 辽东裂谷中硼矿床的分布简图(据陈荣度, 1990; 郝德峰等, 2004; Li et al., 2006 修改)

1—古太古代基底; 2—硼矿区; 3—元古代条痕状混合花岗岩; 4—巨斑状花岗岩; 5—辽河群南缘浅台区; 6—辽河群北缘斜坡区; 7—辽河群中央凹陷区; 8—中生代断层; 9—地质界线; 10—国界线; 11—地名

Fig. 1 Simplified geological map showing the locations of boron deposits (modified after Chen, 1990; Hao et al., 2004; Li et al., 2006)

1—Archean basement; 2—Boron ore district; 3—Paleoproterozoic layered granite; 4—Porphyritic granite; 5—South Liaohe shallow platform; 6—North Liaohe slope; 7—Liaohe central depression; 8—Mesozoic strike-slip fault; 9—Geological boundary; 10—National boundary; 11—Place name

横向上可划分为北缘斜坡(鞍山-桓仁北缘滨海斜坡)、中央凹陷(大石桥-宽甸轴部浅海凹陷)和南缘浅台(岫岩-丹东南缘滨海浅台)3个构造岩相区(陈荣度, 1990)(图1)。

1.2 含硼岩系和混合花岗岩

辽河群里尔峪组历来有南里尔峪组(属辽河群中央凹陷区和南缘浅台区)和北里尔峪组(属辽河群北缘斜坡区)之分(图1)(张秋生, 1984; Li et al., 2006)。辽吉裂谷中央凹陷区的南里尔峪组主要由变质火山喷发沉积物构成, 各类岩石的硼含量普遍较高(刘敬党等, 2007), 故又被命名为含硼岩系(张秋生, 1984)。含硼岩系内的混合花岗岩、各类变粒岩和浅粒岩在接触带上是渐变的, 可能是由同一套火山沉积地层经不同程度混合岩化形成(刘敬党等, 2007)。混合花岗岩常由于地层倒转而覆盖在硼矿体之上, 如已在后仙峪矿区的混合花岗岩的下面找到了隐伏硼矿体(刘敬党等, 2005)。至今未见有“条痕状混合花岗岩或辽吉花岗岩”侵入太古宙鞍山群(陈荣度, 1990)的报道。

含硼岩系底部的火山碎屑沉积岩经混合岩化作用而形成的混合花岗岩总体上近EW向或NEE向出露于辽吉裂谷之中, 主要分布在虎皮峪-哈达碑、北瓦、花峪、马风-什司县、牧牛河、大房身和四门子-青城

子及宽甸一带(图1)。在海城市析木镇和大石桥市后仙峪硼矿区附近, 常可见到混合花岗岩以层状或似层状产于辽河群下部或太古宙与古元古界辽河群的结合带部位(刘敬党等, 2005)。在宽甸地区主要以层状地层的形式分布于含硼岩系的下部层位, 并与上覆的变粒岩和镁质大理岩一并卷入区域内的褶皱构造。混合花岗岩的岩性有条痕状磁铁角闪二长混合花岗岩、条痕状角闪二长混合花岗岩和少量的条痕状磁铁二长混合花岗岩(姜春潮, 1987)。岩石的野外识别特征为: 中细粒粒状变晶结构, 角闪石或磁铁矿强烈定向构成的条痕状构造; 岩石风化面以肉红色为主, 新鲜面为灰白色或粉红色; 主要矿物有钾长石、石英、斜长石及少量的角闪石等, 钾长石多为微斜长石、条纹长石(郝德峰等, 2004)。

1.3 矿区地质特征及样品描述

辽东半岛层控硼矿床集中在古元古代的辽河群南里尔峪组地层(张秋生, 1984), 原岩以一套双峰式火山岩为主, 夹有火山凝灰岩, 少量的碎屑沉积和海相大理岩, 整体上是一套火山-海相沉积岩(姜春潮, 1987)。辽东地区的硼矿床自西向东可划分为大后仙峪硼矿区、翁泉沟硼矿区和宽甸县砖庙-杨木杆硼矿区三处。宽甸地区含硼岩系及硼矿床分布在硼海镇的东西两侧, 分属于硼海镇-杨木杆复背斜的东西

两翼,而西侧砖庙地区的硼矿床在储量上大大超过杨木杆,因此,尽管东西宽达 25 km,但前人在研究工作中仍将宽甸的硼矿聚集区称为砖庙-杨木杆硼矿区(张秋生,1984;姜春潮,1987;刘敬党等,2007)。砖庙-杨木杆矿区的所有硼矿床均赋存于镁质大理岩或蛇纹石化的镁质大理岩之中(王翠芝等,2008a;2008b),硼矿体与容矿岩石具有固定的层位,分布在含硼岩系的中下部,与南里尔峪组底部层状产出的条痕状混合花岗岩存在 25~100 m 的距离(陈荣度,1990)。

本次样品采自辽宁省宽甸县硼海镇东北部约 20 km 处(图 1),明安硼矿下盘层状混合花岗岩,属含硼岩系(辽河群南里尔峪组)的底部层位(图 2)。硼矿体的矿石矿物主要为板状、柱状和纤维状硼镁石,也能见到少量硼含量较高的透安石;脉石矿物主要是蛇纹石、白云石、菱镁矿和金云母。硼矿体的直接容矿围岩为较薄的蛇纹石化镁质大理岩层,之外是钾质变粒岩和层状混合岩的互层,外围是大面积分布的混合花岗岩(图 3a)。据 Peng 等(1995)对该

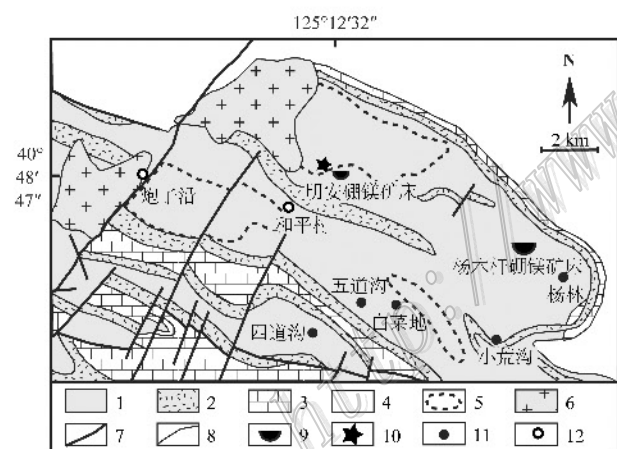


图 2 明安硼矿床地质简图

(据辽宁省地质矿产局 1:20 万矿产图绘制,1975)

1—里尔峪组(含硼岩系); 2—高家峪组; 3—大石桥组; 4—盖县组; 5—混合花岗岩; 6—巨斑状花岗岩; 7—中生代断层; 8—地质界线; 9—硼矿床; 10—采样位置; 11—磁铁矿点; 12—地名

Fig. 2 Simplified geological map of the Ming'an Mg-borate deposit (after 1:200 000 Mineral Resources Map by Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources, 1975)

1—Lieryu Formation (boron-bearing rock series); 2—Gaijiayu formation; 3—Dashiqiao Formation; 4—Gaijiao Formation; 5—Migmatized granite; 6—Porphyritic granite; 7—Mesozoic strike-slip fault; 8—Geological boundary; 9—Mg-borate deposit; 10—Sampling position; 11—Magnetite ore spot; 12—Place name

地区硼矿体周缘的出露地层进行野外调查,砖庙-杨木杆硼矿区周缘含硼岩系内出露的岩石可分为 5 个岩组:①底部条痕状花岗岩(在本文中,“条痕状花岗岩”为细粒状,以磁铁矿和角闪石为暗色条带,主要矿物组成为石英和微斜长石的混合花岗岩);②磁铁矿-微斜长石构成的变粒岩段,部分区域磁铁矿聚集而形成磁铁矿矿层,品位较低(~10%)而不具工业价值;③黑云母变粒岩和浅粒岩段(相对于长英质的浅粒岩,该段变粒岩之中含有大量的黑云母或角闪石等暗色矿物,且矿物颗粒较大),为含矿层位;④含钠长石为主的浅粒岩段,区域上此层内存在一些磁铁矿层(4~10 m 厚,品位为 30%~40%),称为“杨林式”铁矿,如四道沟、五道沟和白菜地等小型铁矿点(图 2);⑤最上部为高家峪组的含石墨变质岩段。

编号为 GA-1 的层状混合岩样品由酸性火山碎屑岩经混合岩化形成,岩石总体呈肉红色,含有少量的暗色矿物,可见暗色矿物角闪石定向排列(图 3a),靠近硼矿体附近的混合岩在矿物组成上表现为黑云母和磁铁矿增多,局部出现绿泥石化蚀变(图 3b)。镜下可见大量蚀变严重的钾长石和条纹长石、石英及云母类矿物(图 3c、d),有部分微斜长石被石英交代,斜长石发生绢云母化。其主要矿物为微斜长石和条纹长石 50%~55%、石英 20%、斜长石 20%~25%,次要矿物为角闪石及少量次生磁铁矿、绿泥石及副矿物磷灰石、榍石、锆石等。

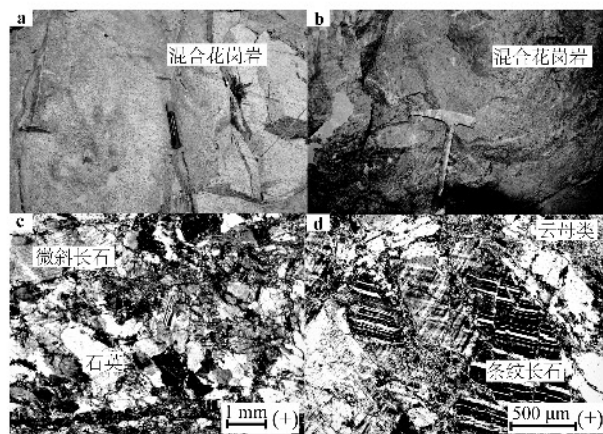


图 3 明安硼矿床下盘的混合花岗岩的野外露头(a、b)和显微照片(c、d)

Fig. 3 Field photograph (a, b) and photomicrographs (c, d) of migmatitized granite on the footwall of the Ming'an Mg-borate deposit

2 测试方法和结果

2.1 测试方法

本次进行锆石测年的样品从约 5 kg 的混合花岗岩 (GA-1) 中挑选出。样品的破碎和锆石的挑选由河北省廊坊市科大技术服务公司完成。阴极发光照相 (CL) 在配备阴极荧光探头的 JSM6510 型扫描电镜上完成。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。信号较弱的 ²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁴Pb (+²⁰⁴Hg)、²⁰²Hg 用离子计数器 (multi-ion-counters) 接收, ²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 信号用法拉第杯接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收, 且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据, 锆石颗粒 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 的测试精度 (2 σ) 均为 2% 左右, 对锆石标准的定年精度和准确度在 1% (2 σ) 左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127 ($w(\text{U})$ 为 923×10^{-9} , $w(\text{Th})$ 为 439×10^{-9} , Th/U 比值为 0.475, Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。测试过程中每测定 5~7 个样品前后重复测定两次锆石 GJ-1 对样品进行校正, 并测量一个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu et al., 2010), 测量过程中绝大多数分析点的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值 > 1000, 未进行普通铅校正, ²⁰⁴Pb 由离子计数器检测, ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程参见侯可军等 (2009), 样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 $(336.5 \pm 1.1) \text{ Ma}$ ($n=3$), 对应的年龄推荐值为 $(337.13 \pm 0.37) \text{ Ma}$ (Slama et al., 2008), 两者在误差范围内完全一致。

2.2 测试结果

本次锆石样品的 U-Pb 年龄测试结果见表 1。

锆石长宽比为 2:1 至等轴状, 粒度介于 50~150

μm , 如图 4a 所示。锆石粒度相差较大, 但内部显微结构一致, 暗示不同锆石颗粒的形成和经历基本相同。从阴极发光图像的颜色上判断, 锆石内部结构包括具有较宽的震荡环带的岩浆核和无分带或面状分带结构的变质边 (图 4a)。较宽的岩浆震荡环带说明锆石的形成温度较高 (吴元保等, 2004), 变质热液蚀变作用造成了锆石边缘上的缺口 (如 GA-1-8 锆石右上角的缺口)。样品 GA-1 锆石核部的 LA-MC-ICP-MS 分析结果如下: $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 54.3×10^{-6} ~ 129.8×10^{-6} 和 30.4×10^{-6} ~ 140.1×10^{-6} , Th/U 比值介于 0.4479~1.1309 (表 1), 岩浆成因特征明显。从表 1 中可以看到, 因 GA-1-10 的谐和性较差, GA-1-16 的误差过大, 予以剔除; 在谐和图上, 所有样品点都分布于谐和线下方 (图 4b), 谐和度 95%~99%, 说明锆石在变质作用过程中发生了 Pb 轻微丢失。GA-1 锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄在 2227~2350 Ma, 加权平均年龄为 $(2229 \pm 3) \text{ Ma}$ (图 4b), 没有出现多组年龄的现象; 在谐和图上, 18

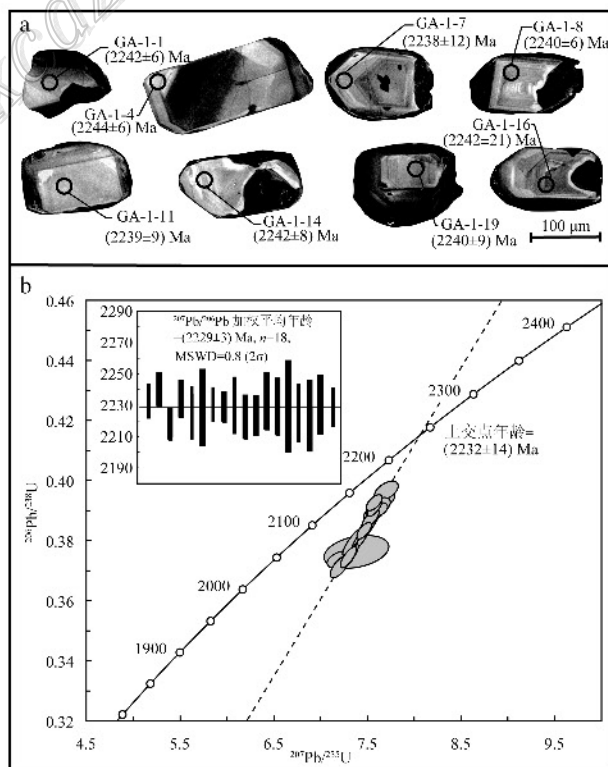


图 4 明安硼镁矿床下盘的混合花岗岩锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 定年结果(b)

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence (CL) images (a) and U-Pb dating data of migmatitized granites (b) of the Ming'an Mg-borate deposit

表 1 宽甸县明安福镁矿矿层状混合岩(GA-1)LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据
Table 1 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic data of migmatized granites in the Ming'an deposit, Kuandian County

测 点	$w(B)/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			谐和度/%	
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		
GA-1-1	91.3	76.8	331	0.8410	0.1412	0.0005	7.4972	0.0724	0.3852	0.0035	2242	6	96
GA-1-2	77.2	52.2	264	0.6763	0.1417	0.0004	7.4545	0.0376	0.3816	0.0018	2250	5	96
GA-1-3	62.4	36.8	191	0.5897	0.1399	0.0003	7.3200	0.0378	0.3795	0.0017	2227	5	96
GA-1-4	67.8	30.4	176	0.4479	0.1414	0.0005	7.3006	0.0385	0.3746	0.0017	2244	6	95
GA-1-5	42.5	16.8	215	0.3943	0.1504	0.0016	9.0152	0.1588	0.4327	0.0036	2350	18	99
GA-1-6	101.6	62.5	302	0.6146	0.1405	0.0006	7.1935	0.0419	0.3713	0.0015	2235	8	95
GA-1-7	71.9	50.3	245	0.6996	0.1409	0.0006	7.5252	0.0357	0.3874	0.0013	2238	12	96
GA-1-8	103.5	117.0	462	1.1306	0.1411	0.0005	7.4556	0.0319	0.3833	0.0011	2240	6	96
GA-1-9	117.4	118.2	471	1.0070	0.1408	0.0004	7.3946	0.0254	0.3809	0.0013	2238	5	96
GA-1-10	179.1	164.0	701	0.9156	0.1528	0.0012	7.4673	0.1064	0.3544	0.0025	2377	13	89
GA-1-11	71.5	73.9	325	1.0344	0.1410	0.0007	7.6150	0.0496	0.3913	0.0012	2229	9	97
GA-1-12	81.9	59.3	279	0.7241	0.1404	0.0006	7.5693	0.0327	0.3910	0.0012	2232	7	97
GA-1-13	85.2	76.0	327	0.8919	0.1397	0.0005	7.5627	0.0350	0.3927	0.0011	2233	6	97
GA-1-14	69.7	70.2	298	1.0068	0.1411	0.0007	7.5960	0.0466	0.3902	0.0010	2242	9	97
GA-1-15	57.6	47.0	213	0.8161	0.1409	0.0007	7.5615	0.0460	0.3893	0.0011	2238	9	97
GA-1-16	65.3	50.5	239	0.7727	0.1412	0.0017	7.3713	0.1412	0.3763	0.0022	2242	21	95
GA-1-17	54.3	50.3	225	0.9266	0.1406	0.0008	7.6928	0.0518	0.3966	0.0013	2234	9	98
GA-1-18	72.6	72.4	303	0.9982	0.1397	0.0009	7.2025	0.0571	0.3737	0.0012	2233	11	95
GA-1-19	59.4	45.9	213	0.7734	0.1411	0.0008	7.6577	0.0535	0.3935	0.0014	2240	9	97
GA-1-20	129.8	140.1	559	1.0793	0.1411	0.0004	7.2880	0.0359	0.3745	0.0014	2242	5	95

个样品点呈现较好的线性分布,上交点年龄为(2232 ± 14) Ma (图 4b)。由于铅丢失的原因,较老的岩浆锆石一般采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,故认为(2229 ± 3) Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权年龄代表了辽吉裂谷早期拉张裂陷阶段火山喷发的时代。

3 讨 论

3.1 里尔峪组层状混合花岗岩的成因

层状花岗岩的“原地重熔说”在 19 世纪末已经出现(马莫,1979),硅铝质岩石在 700℃ 以下便开始熔融,温度升高,压力下降和含水量增加均可使熔融程度相应增加,并在重熔界面上形成层状的混合花岗岩(陈国能等,1996;陈国能,1998)。古元古代辽吉裂谷中的辽河群里尔峪组中的层状花岗质岩石的成因和形成时代一直以来受到学者们的关注。混合花岗岩总是出现在辽河群的底部或大型褶皱构造的核部,并在大多数情况下,经过变形作用的改造;但局部又侵入辽河群之中,过去曾一度被认为是“底劈”花岗质侵入岩(张秋生,1984)。近来比较流行的观点是此种条痕状混合花岗岩作为辽河群的基底岩石而存在,属于裂谷早期的 A 型花岗岩,花岗质岩石侵位于辽河群的地质现象是由后期构造运动形成的“断层”所致(路孝平等,2004a;Li et al.,2007)。最下部的条痕状花岗质岩石锆石的核部具有一致的 2.17 Ga 锆石 U-Pb 年龄,而边部变质年龄为 1.9 Ga 左右(Luo et al.,2004;路孝平等,2004b;Wan et al.,2006;Lu et al.,2006)。最近的锆石定年结果显示,里尔峪组中普遍呈层状产出的各类变粒岩、浅粒岩、电气石岩以及混合花岗岩中的岩浆成因锆石核部均具有 2.24~2.15 Ga 的年龄,且在砖庙硼矿上盘岩石中的斜长角闪岩中存在有年龄为 1.87 Ga 的变质重结晶锆石,可代表区域上混合岩化的时代(胡古月,未发表)。因此,笔者认为大量辽河群变质火山岩岩浆锆石核部年龄都集中在 2.2 Ga 左右的现象是难以用碎屑沉积成因进行简单解释的,将里尔峪组中的各类变粒岩、浅粒岩和层状混合花岗岩的原岩均解释为 2.24~2.15 Ga 内形成的长英质火山喷发沉积岩,则能较好地解释大量的不同混合岩化程度的岩石具有相同的岩浆锆石核,并且具有 ± 90 Ma 的时间差。

华北克拉通的东部陆块和西部陆块,在 1.85 Ga 左右沿中部造山带发生陆块拼贴的地质模型已经取

得共识,代表着哥伦比亚超大陆聚合事件在华北克拉通的响应,形成晋豫陆-陆碰撞造山带(Zhao et al.,2005;Wan et al.,2006;Zhai et al.,2011)。与此次构造挤压事件相对应,辽东地区的古元古代下辽河群地层也发生了普遍的区域深变质作用,强烈的混合岩化作用使得裂谷早期喷发的酸性火山岩发生原地重熔作用而形成大量呈层状产出的混合花岗岩。在辽河群区域变质过程中,低压角闪岩相的变质条件(陈曼云,1994)可使得长英质的火山-沉积地层发生大规模的部分熔融,并在构造引力作用下矿物呈定向排列而形成“条痕状”结构。后期强烈的变质和混合岩化作用使得先期沉积的含硼蒸发岩中的硼质发生迁移,与矿体外围的硅铝质矿物发生反应,形成大量含电气石变粒岩(Xu et al.,2004)。

3.2 硼矿成矿时代探讨

辽东宽甸地区的硼镁矿床初始成矿环境可能与土耳其西安托尼亚地区第三纪硼矿床具有相似性,处于被动大陆边缘的构造背景之下(Peng et al.,2002),火山活动和蒸发沉积作用的交替旋回环境之中(Jiang et al.,1997)。各类变粒岩和浅粒岩的原岩恢复均表明含硼建造在形成过程中伴随有间歇性的酸性火山活动(冯本智等,1998;Peng et al.,1998-2002;刘敬党,2006;刘敬党等,2007)。紧邻矿体下盘的层状混合花岗岩是由古元古代的酸性火山喷发岩经过较强的混合岩化作用而来,其锆石核部具有高温岩浆结晶作用形成的宽岩浆震荡环带(吴元保等,2004),此种较宽震荡环带在里尔峪组各类变粒岩和浅粒岩的锆石核部是普遍存在的(胡古月,未发表)。混合花岗岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石核部 U-Pb 定年的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均结果为(2229 ± 3) Ma,认为代表了裂谷早期的火山喷发时代,亦大致代表了上盘的明安硼镁矿床初始含硼蒸发岩的沉积年龄的下限,而后期区域上的混合岩化变质作用使得含硼蒸发岩发生脱水和变质(~ 1.9 Ga),形成了硼镁矿床。

4 结 论

明安硼镁矿床下盘的层状混合花岗岩的原岩为辽吉裂谷早期拉张裂陷阶段形成的酸性火山岩,其锆石核部的 U-Pb 年龄代表了辽东早期拉张裂陷阶段的酸性火山岩的喷发沉积时代,亦大致代表了该矿床的初始含硼蒸发岩的沉积时代下限。因此,推

测硼镁矿床的主沉积成矿时代为 (2229 ± 3) Ma。

参考文献/References

- 陈国能,曹建劲,张珂. 1996. 原地重熔与地球化学元素场——论花岗岩的成因与成矿及大陆内部的物质旋回[M]. 北京:地质出版社. 96 页.
- 陈国能. 1998. 花岗岩成因与成矿理论研究进展——原地重熔说与元素地球化学场简介[J]. 地球科学进展, 13(2): 140-144.
- 陈曼云. 1994. 辽宁大石桥-海城地区辽河群变泥质岩石的变质变形序列的研究[J]. 辽宁地质, 1: 44-53.
- 陈荣度. 1990. 辽吉裂谷的地质构造演化[J]. 中国区域地质, 4: 306-315.
- 董申保. 1999. 变质作用矿床概述[J]. 地学前缘, 6(2): 231-242.
- 冯本智, 邹日. 1994. 辽宁营口后仙峪硼矿床特征及成因[J]. 地学前缘, 1(4): 235-237.
- 冯本智, 卢静文, 邹日, 胡厚利, 谢宏远. 1998. 中国辽吉地区早元古代大型-超大型硼矿床的形成条件[J]. 长春科技大学学报, 28(1): 1-15.
- 郝德峰, 李三忠, 赵国春, 孙敏, 韩宗珠, 赵广涛. 2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及其对构造演化的制约[J]. 岩石学报, 20(6): 1409-1416.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 321 页.
- 李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 霍亮, 李延军. 2008. 辽东后仙峪硼矿床含硼岩系中电英岩的地球化学特征及其成因[J]. 世界地质, 27(3): 260-266.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王翠芝, 周红春, 费红彩. 2005. 辽宁大石桥花岗质岩石成因分析及其在硼矿勘查中的意义[J]. 吉林大学学报[地球科学版], 35: 714-719.
- 刘敬党. 2006. 辽东地区下元古界镁硼酸盐矿床控矿模型及其勘查与评价研究[博士学位论文]. 导师: 肖荣阁. 中国地质大学(北京).
- 刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 王翠芝. 2007. 辽东硼矿区域成矿模型[M]. 北京:地质出版社. 426 页.
- 路孝平, 吴福元, 林景仟, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004a. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. 地质科学, 39(1): 123-138.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 赵成弼, 郭春丽. 2004b. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景[J]. 岩石学

报, 20(3): 381-392.

- 马莫. 1979. 花岗岩岩石学与花岗岩问题[M]. 袁廷佐译. 北京:地质出版社. 63-88.
- 曲洪祥, 郭伟静, 张永, 谭文刚, 陈树良, 李全林, 卞雄飞. 2005. 辽东地区硼矿床成因探讨与硼矿远景区预测[J]. 地质与资源, 14(2): 132-138.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 2008a. 辽东硼矿的成矿机制及成矿模式[J]. 地球科学, 33(6): 813-824.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 2008b. 辽东-吉南硼矿的控矿因素及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 27(6): 727-741.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 肖荣阁, 大井隆夫, 费红彩, 野村雅夫. 2003. 辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究[J]. 现代地质, 17(2): 137-142.
- 谢宏远, 冯本智, 邹日, 堀宜太. 1998. 辽宁杨木杆硼矿床地质地球化学特征[J]. 矿床地质, 17(4): 355-362.
- 翟裕生, 彭润民, 陈从喜, 蔡克勤. 2008. 中国重要成矿系列的形成机制和结构特征[M]. 北京:地质出版社. 173 页.
- 张秋生. 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用[M]. 长春:吉林人民出版社. 536 页.
- 赵凤顺, 胡平. 1989. 虎皮峪条痕状花岗质岩石特征及成因探讨[J]. 辽宁地质, 4: 298-310.
- 邹日, 冯本智. 1995. 营口后仙峪硼矿容矿火山-热水沉积岩系特征[J]. 地球化学, 24(增刊): 46-54.
- Jiang S Y, Palmer M R, Peng Q M and Yang J H. 1997. Chemical and stable isotope compositions of Proterozoic metamorphosed evaporate and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China[J]. Chemical Geology, 135: 189-211.
- Li S Z, Zhao G C, Sun M, Han Z Z, Zhao G T and Hao D F. 2006. Are the South and North Liaohe Groups different exotic terranes? - Nd isotope constraints on the Jiao-Liao-Ji orogen[J]. Gondwana Research, 9: 198-208.
- Li S Z and Zhao G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constrains on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 158: 1-16.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. 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, 51: 537-571.
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, Wilde S A, Yang J H, Liu X M and Zhang

- X O. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146: 138-164.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, Li S Z, Xu P, Ye K and Xia X P. 2004. LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Orogen[J]. *Precambrian Research*, 134: 349-371.
- Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1-35.
- Peng Q M and Palmer M R. 1995. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporate[J]. *Precambrian Research*, 72: 185-197.
- Peng Q M, Palmer M R and Lu J W. 1998. Geology and geochemistry of the Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning-Jilin, northeastern China: Evidence of metaevaporites[J]. *Hydrobiologia*, 381: 51-57.
- Peng Q M and Palmer M R. 2002. The Paleoproterozoic Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin Provinces, Northeast China[J]. *Econ. Geol.*, 97: 93-108.
- Slama J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1-35.
- Wan Y S, Song B, Liu D Y, Wilde S A, Wu J S, Shi Y R, Yin X Y and Zhou H Y. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Paleoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 149: 249-271.
- Xu H, Peng Q M and Palmer M R. 2004. Origin of tourmaline-rich rocks in a Paleoproterozoic terrane (N. E. China): Evidence for evaporate-derived boron[J]. *Geology in China*, 31(3): 240-253.
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20: 6-25.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A and Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issue revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177-202.