

辽东裂谷带铅锌金银矿集区Pb同位素地球化学*

陈江峰** 喻钢 薛春纪 钱卉 贺剑峰 邢直 张巽

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 长安大学地质系, 西安 710054)

摘要 报道了辽东元古代裂谷带中青城子矿区的喜鹊沟铅锌矿床、榛子沟锌铅矿床和高家堡子银矿床以及其西部地区的北瓦沟锌矿床中硫化物和热液碳酸盐矿物和大理岩共 33 个样品的Pb同位素组成。青城子矿区大石桥组大理岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.24\sim 30.63$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.59\sim 17.05$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.43\sim 38.63$ 。其Pb-Pb年龄为 $1822 \pm 92\text{Ma}$, 解释为其变质年龄。青城子矿田矿石(硫化物和热液碳酸盐矿物)Pb同位素组成变化范围很小, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.66\sim 17.96$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.60\sim 15.74$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.94\sim 38.60$ 。北瓦沟矿石Pb同位素组成与青城子矿田的显著不同, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.68\sim 15.81$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.34\sim 15.45$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=35.30\sim 35.68$ 。所研究矿床的Pb均来源于上地壳。青城子矿田矿石Pb是年轻的上地壳Pb。其模式Th/U值为 4.40~4.74, 和大理岩Pb的(1.68~4.36)不同, 指示矿石Pb并不来源于大理岩。北瓦沟矿床的Pb在古元古代即从其源区提取出来, 并形成矿床。显著不同的Pb同位素组成是因为两者成矿时代的差别, 意味着成矿物质来源的不同, 甚至矿床成因的不同。

关键词 Pb同位素 成矿物质来源 矿床成因 辽东裂谷带

作为一个大型矿集区,辽东裂谷内有众多大型铅、锌、金、硼、菱镁矿和滑石等矿床,并具有悠久开采历史。最近又找到小佟家堡子大型Au矿床和高家堡子大型Ag矿床。前人已对这些矿床做过大量的矿床学研究,但对成矿时代和成矿物质来源还有争议[1-3]。成矿时代和成矿物质来源研究对深入认识成矿过程和明确找矿方向具有重要意义。

铅同位素组成是一种非常有用的地球化学示踪体系,用其不仅能指示地壳演化[4],而且可以指示矿床成因与成矿物质来源[5-8]。前人已对青城子矿区和北瓦沟矿床的矿石矿物、围岩大理岩和花岗岩进行了很多铅同位素研究[2, 9-15]。但诚如丁悌平等[15]所指出的,上世纪 60 和 70 年代的多数数据的精度较差,因此新一轮Pb同位素研究是十分必要的。

2003-07-15 收稿, 2004-01-05 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 01999043201)和中国科学院合肥地区联合分析测试基金资助

** E-mail: cjf@ustc.edu.cn

1) 魏民. 青城子矿田金、银矿床基本特征及成因探讨. 辽吉地区地质与成矿研讨会(沈阳)论文集, 2001, 137~145

2) 刘国平, 邓延昌, 周广学. 青城子矿田主要矿床类型. 找矿及有关问题讨论. 辽吉地区地质与成矿研讨会(沈阳)论文集, 2001, 19~23

本文报道青城子矿田的喜鹊沟铅锌矿床、榛子沟铅锌矿床、高家堡子银矿床以及北瓦沟铅锌矿床的 Pb 同位素组成。据此讨论青城子矿田中大石桥组大理岩的变质年龄和不同矿床矿石 Pb 的同位素地球化学特征, 并进一步探讨可能的成矿物质来源。

1 地质背景

辽东裂谷(图 1)是在华北太古代克拉通基础上发展起来的。其中沉积了巨厚的辽河群, 其下部(于家堡子组和浪子山组)为火山岩-碎屑岩建造, 中部(大石桥组)为碳酸盐岩建造, 上部(盖县组)为碎屑岩-火山碎屑岩建造。这些裂谷沉积经受了角闪岩相到绿片岩相变质。

古元古代中晚期, 即裂谷演化晚期, 地壳重熔形成钠质花岗岩, 分布在水泉、连山关、石家岭、大顶子等地。大顶子岩体是钠质黑云母斜长花岗岩, 片麻状构造, 侵位时代 1740~1621 Ma(K-Ar法)^[2], 伴随明显的逆冲推覆构造活动。此期间的构造-岩浆作用是地层内成矿元素活化迁移的热动力条件。

中生代时区域构造-岩浆活动强烈。在青城子矿田侵入岩多见, 以中酸性岩体(株)为主, 北侧有新岭岩体和姚家沟岩株, 南侧有双顶沟岩体。据航磁重力资料推断, 该区域为一岩浆岩田, 矿集区被花岗岩体兜底^[2]。新岭黑云母花岗岩体的侵位(K-Ar法)年龄是 227~218 Ma, 双顶沟黑云母花岗岩形成的(K-Ar法)年龄是(231 ± 5)Ma, 姚家沟花岗岩斑岩与之同源同时代^[2]。矿田内还可见 211~130 Ma(K-Ar法)^[17]的煌斑岩脉。中生代岩浆活动是矿床形成的又一次热动力条件。强烈的多期岩浆活动造成了有利于多种矿床形成的地质条件, 从而使辽东地区成为一个金属矿床集中区。

喜鹊沟、榛子沟和高家堡子矿床集中于凤城的青城子矿田, 位于辽东裂谷带中部(图 1)。对青城子矿田的铅锌矿床已有很多研究^[2, 3, 15]。

喜鹊沟铅锌矿床是典型的似脉状矿床, 矿体受切割大石桥组地层的北北东向、北西向和北东向陡倾断裂控制, 于断裂中形成充填交代矿体。矿石矿物以方铅矿为主, 次为闪锌矿, 伴生黄铁矿、黄铜矿、毒

砂、磁黄铁矿、黝铜矿、黝锡矿、白铁矿以及微量的金银矿、辉银矿、自然银和深红银矿等。围岩蚀变有硅化、碳酸盐化和绢云母化等。除Pb和Zn外, 还伴生有工业价值的Ag^[1]。

榛子沟铅锌矿床是典型的层状矿床, 矿体严格受地层控制, 矿体顺层产出于大石桥组大理岩中或斜长角闪岩、黑云母片岩与含石墨(条带)大理岩接触处靠近大理岩一侧, 无明显的蚀变交代现象, 可见矿层与含矿层同步褶皱。矿石组成简单, 主要为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿, 微量矿物有毒砂、白铁矿和辉银矿等。非金属矿物与含矿地层有明显的相似性, 主要为白云石和方解石。与喜鹊沟矿床相似, 除Pb和Zn外, 还伴生Ag^[1]。

高家堡子银矿床产出在青城子矿田外围的Au和Ag带中。高家堡子银矿床是典型的浅成热液交代矿床。银矿体主要赋存在大石桥组上部的层间剥离断裂带中, 矿体为层状、似层状。银矿体按矿化元素组合可以分为铅锌银矿体和独立银矿体。前者呈块状结构, 与铅锌矿床的矿石相似, 以黄铁矿、闪锌矿(深色)、方铅矿为主, 次为黄铜矿、毒砂、银黝铜矿、自然银、深红银矿和硫锑银铅矿等。独立银矿石通常为石英网脉状大理岩, 大理岩碎裂后被石英、白云石胶结。硫化物含量不高, 主要有深红银矿、自然银、银黝铜矿、螺状硫银矿、脆银矿、黄铁矿、闪锌矿(浅色)、方铅矿和硫锑银铅矿等。矿石中白云石和石英的流体包裹体均一化温度为 140~180 °C, 表明高家堡子银矿为低温矿床^[1]。

北瓦沟铅锌矿床位于辽东裂谷带的西部(图 1)。北瓦沟矿床的围岩为大石桥组大理岩, 矿化发育于条带状大理岩中, 条带有碳质、透闪石+白云石+石英、透辉石+橄榄石和硅质等。矿石呈条带状、角砾状和脉状, 以角砾状矿石为主。角砾状矿石呈层状、似层状和透镜状产出于条带状大理岩中, 由金属硫化物胶结大理岩及其中条带的角砾而形成。主要矿石矿物为闪锌矿, 共生金属矿物为方铅矿、黄铁矿和少量黄铜矿。脉石矿物为热液方解石和菱镁矿。橄榄石和透辉石的蛇纹石化发育^[2]。

1) 见 404 页脚注 1)

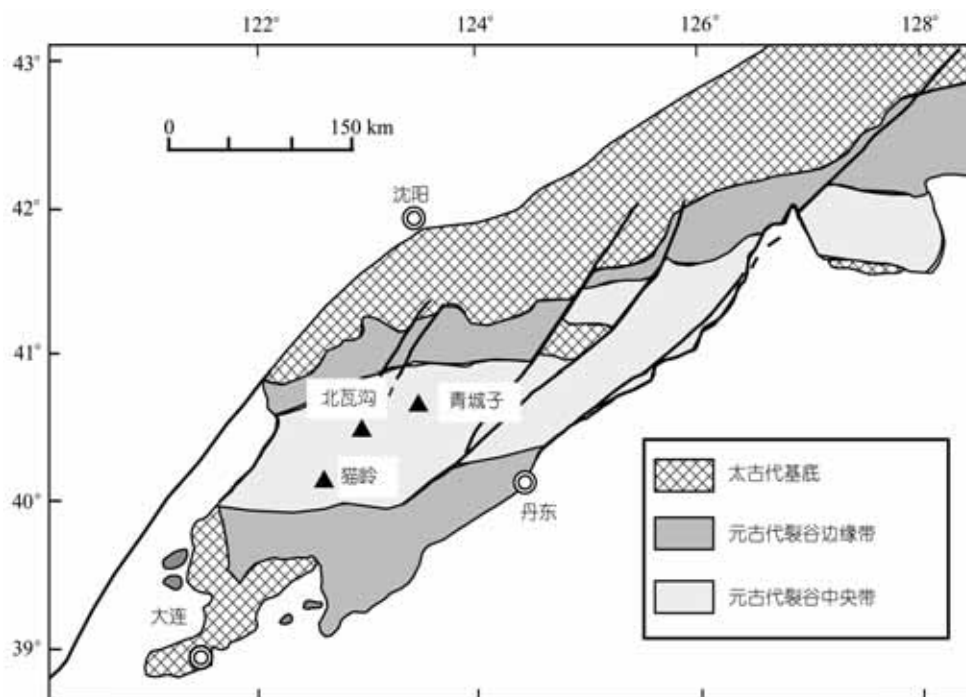


图 1 辽东古元古代裂谷带矿床位置示意图(据文献[16]改编)

猫岭金矿床位于北瓦沟矿床附近, 因其Pb同位素组成与北瓦沟相似, 本文将其一并讨论. 猫岭金矿床产于盖县组的硅化带中, 矿体局限于北东向的剪切带与次级断层和褶皱交会部位, 以硅化、石英细脉带以及硫化物和金的矿化为特征. 矿体由金含量圈定. 石英细脉和片岩经历了同步褶皱变形, 矿化与最早期(古元古代)变形有关. 矿石含石英、绢云母、金云母、毒砂、磁黄铁矿、自然金和银金矿. 金和银金矿赋存于毒砂和磁黄铁矿的裂隙中¹⁾.

青城子矿区小佟家堡子金矿床蚀变绢云母的Ar-Ar年龄为 167 Ma^[17]. 因为绢云母的粒度很细, 其Ar-Ar封闭温度可能比较低, 上述测定结果很可能只是冷却年龄. 薛春纪等^[18]用全岩和流体包裹体的Rb-Sr法测定了小佟家堡子金矿床的形成时代为约 233 ± 31 Ma, 高家堡子银矿床的为约 234 ± 14 Ma. 虽然误差较大, 但成矿时代为中生代是可以确定的. 迄今为止, 尚未得到榛子沟和喜鹊沟等矿床的成矿年龄. 北瓦沟矿床的年龄尚缺乏可靠的制约. 最近Chen

等^[19]报道了猫岭金矿床中毒砂的Re-Os等时线年龄为 2120 ± 60 Ma, 这与猫岭矿化与第 1 期面理(约 2500~1800 Ma形成)关系密切的野外观察一致(邱小平, 私人通讯).

2 Pb 同位素分析方法和结果

铅同位素分析在中国科学技术大学化学地球动力学实验室完成. 将矿石和岩石样品破碎后过筛, 在双目镜下挑选出新鲜岩石颗粒和单矿物, 单矿物纯度 >98%. 硫化物样品用 0.15 mol/L HCl 和高纯水清洗, 碳酸盐样品用高纯水清洗, 然后在玛瑙研钵中研磨到 74 μm 以下. 样品在聚四氟乙烯PFA管形瓶中分解, 硫化物样品用 HCl+HNO₃ 分解, 碳酸盐样品用 HCl 分解, 分解完全后蒸发到近干并转化为 0.15 mol/L HCl + 0.65 mol/L HBr 介质. 在阴离子Bio-Rad AG 1 \times 8 交换柱上分离, 用 1.0 mol/L HNO₃ 淋洗Pb, 然后将溶液加热至干. 闪锌矿样品在淋洗Pb前先用大量 0.15 mol/L HBr 溶液淋洗Zn. 所有试剂都经过两次双瓶亚

1) Yang G, Yu G, Chen J F, et al. Re-Os and Pb isotope systematics in shear-zone hosted gold mineralization: Maoling gold deposit, Liaoning Province, northeastern China. *Ore Geol Rev*, in press

沸蒸馏。

Pb 同位素比值在 MAT 262 多接受器的热电离质谱计上测定, 样品涂在 Re 带上, 以硅胶作为发射剂。测定采用静态模式。用标准样 SRM 981 控制质谱计中的质量分馏, 所报道数据已对每质量单位 0.096%

的分馏进行了校正。

分析结果见表 1。青城子矿区大石桥组大理岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.24\sim 30.63$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.59\sim 17.05$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.43\sim 38.63$ 。青城子矿田各矿床中硫化物和热液碳酸盐矿物的 Pb 同位素组成变化范围为

表 1 青城子矿田和邻近矿床的 Pb 同位素组成^{a)}

矿床	样品号	样品	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
喜鹊沟	291 灰	大理岩	19.489	15.806	37.430
	291 黄	大理岩	22.150	16.086	38.367
	292 灰	大理岩	23.724	16.281	37.928
	292 黄	大理岩	22.635	16.193	38.107
	295	近矿大理岩	18.241	15.589	37.679
	296	大理岩	18.589	15.709	38.627
高家堡子	302	大理岩	30.633	17.047	37.571
喜鹊沟	294 铁	黄铁矿	17.928	15.691	38.419
	294 铅	方铅矿	17.921	15.672	38.338
榛子沟	ZZG5	闪锌矿	17.815	15.615	38.175
	ZZG6	闪锌矿	17.843	15.664	38.345
	ZZG7	闪锌矿	17.802	15.717	38.595
	ZZG8	闪锌矿	17.798	15.604	38.145
	ZZG9	闪锌矿	17.817	15.610	38.152
	ZZG10	闪锌矿	17.891	15.710	38.486
	ZZG14	闪锌矿	17.955	15.717	38.467
	ZZG19	方铅矿	17.821	15.611	38.187
	高家堡子	298 铁	黄铁矿	17.657	15.625
298 铅		方铅矿	17.803	15.742	38.223
299 铁		黄铁矿	17.767	15.701	38.186
299 铅		方铅矿	17.811	15.662	38.174
299		热液方解石	17.804	15.599	37.943
300 铁		黄铁矿	17.746	15.629	37.949
300		热液方解石	17.777	15.644	38.075
301		热液方解石	17.836	15.695	38.261
306 铁		黄铁矿	17.944	15.715	38.395
北瓦沟	314 铁	黄铁矿	15.792	15.450	35.652
	314	热液方解石	15.807	15.445	35.638
	315	热液方解石	15.804	15.449	35.679
	316 铁	黄铁矿	15.679	15.340	35.299
	316 铅	方铅矿	15.696	15.367	35.379
	316 锌	闪锌矿	15.695	15.361	35.356
	316	热液方解石	15.742	15.417	35.528
	猫岭	325 毒	毒砂	16.191	15.489
327 毒		毒砂	15.818	15.444	35.500
329 毒		毒砂	16.056	15.438	35.714
334 毒		毒砂	16.428	15.497	36.026

a) Pb 同位素组成质谱测定内精度好于 0.04%。猫岭数据引自 405 页脚注 1)

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.66\sim 17.96$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.60\sim 15.74$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.94\sim 38.60$. 北瓦沟矿床的硫化物和热液碳酸盐矿物的Pb同位素组成与青城子矿床的显著不同, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.68\sim 15.81$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.34\sim 15.45$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 35.30\sim 35.68$. 表 1 还列出了猫岭金矿床中毒砂的Pb同位素组成以资比较, 其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.82\sim 16.43$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.44\sim 15.50$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 35.50\sim 36.11$ ¹⁾.

3 讨论

3.1 大石桥组大理岩的 Pb-Pb 年龄

国际国内实例已证明, Pb-Pb等时线方法可以有效地测定碳酸盐岩和大理岩的年龄^[20-23]. 采自喜鹊沟和高家堡子两矿床的 7 个大理岩样品的铅同位素比值在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图 2)构成较好的线性关系. 用ISOPLLOT^[24]计算, 得到Pb-Pb等时线年龄为 1873 ± 140 Ma(MSWD = 6.7). 很明显, 数据点的分散主要是由样品 01LN295 引起的, 而该样品恰好是一个近矿大理岩(表 1), 其Pb同位素组成可能在成矿过程中发生过变化. 剔除这个样品后, 等时线线性得到改善, 6 点 Pb-Pb 等时线年龄为 1822 ± 92 Ma(MSWD = 1.9; 图 2). 这条等时线包括采自两个矿区(喜鹊沟和高家堡子)的样品, 但如果只用采自喜鹊沟矿床的 5 个样品, 其Pb-Pb等时线年龄为 1860 ± 250 Ma(MSWD = 2.5), 与两矿区的联合等时线年龄无实质性不同, 只是因为Pb同位素组成变化范围小而误差较大而已. 以上全部计算均为模型 2 计算结果, 表明在青城子矿区范围内辽河群大理岩的初始 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值基本均一, 但仍存在一定变化^[24]. 尽管误差较大, 1822 ± 92 Ma这一年龄代表Pb同位素均一化时代, 可以解释为大石桥组大理岩的变质年龄.

丁梯平等^[15]测定过青城子矿区的 3 个大理岩和 1 个斜长角闪岩样品的Pb同位素组成, 作者在文字中给出这 4 点的Pb-Pb等时线年龄为 2210 Ma, 但没有给出误差, 也没有给出等时线图. 事实上其数据非常分散, 用ISOPLLOT^[24]重算后得到Pb-Pb等时线年龄为

2250 ± 1100 Ma(MSWD = 4.9). 其原因可能是把大理岩和斜长角闪岩混在一起的缘故, 大理岩和斜长角闪岩也许具有不同年龄或不同源且在变质作用时并没有达到Pb同位素均一化. 相反, 将丁梯平等^[15]的 3 个大理岩数据和本文的 6 个数据一起用ISOPLLOT处理, 得到 1850 ± 82 Ma(MSWD = 3.2). 可见, 不同实验室的测定结果非常接近. 联合不同实验室数据得到的“等时线”的数据点较分散, MSWD 较大. 由于Pb同位素在质谱计中的分馏较难控制, 不同实验室测定的数据略有偏差是很容易理解的.

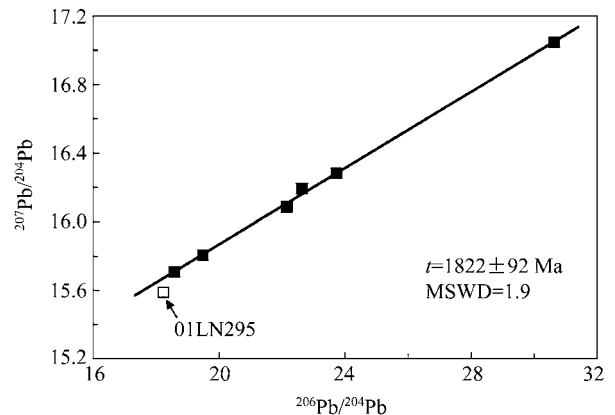


图 2 青城子矿区大石桥组大理岩的 Pb-Pb 等时线

在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 3(b)), 青城子大理岩样品点相当分散, 表现为 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围较小 ($37.43\sim 38.63$) 而 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化很大 ($18.24\sim 30.63$), 表明体系中各样品的Th/U比很不相同. 这种现象在其他地区大理岩的Pb-Pb定年研究中也较常见到^[23].

3.2 矿石 Pb 地球化学特征

青城子矿田喜鹊沟、榛子沟和高家堡子矿床的硫化物矿物和热液碳酸盐矿物的Pb(统称矿石Pb)的同位素组成变化范围与北瓦沟和猫岭两矿床矿石Pb的显著不同. 对于这种差别可以有两种不同解释, 即用“块体效应”或Pb同位素组成的区域变异解释^[4, 23], 或者用不同演化历史解释^[25].

1) 见 406 页脚注 1)

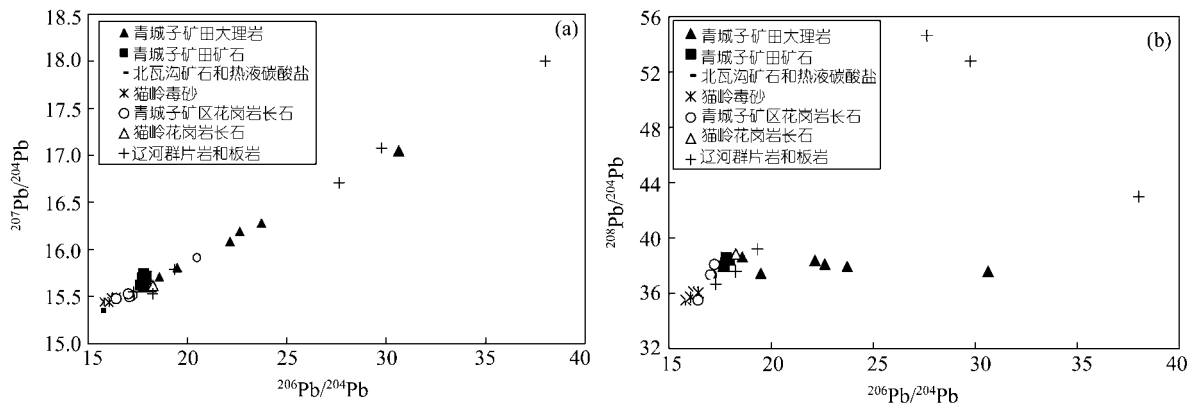


图3 辽东裂谷带矿床矿石 Pb、青城子矿田大理岩 Pb 和辽河群片岩和板岩 Pb 同位素组成之间的关系
辽河群片岩和板岩的数据引自文献[10]

不同地区岩石的Pb同位素组成具有区域性变化的结论主要是根据中国的中生代花岗岩长石Pb、矿石Pb(大部分为中生代)和/或新生代玄武岩Pb建立的[4, 20, 23]。的确, 中生代的青城子矿田各矿床的Pb同位素组成 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.66\sim 17.96$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.60\sim 15.74$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.94\sim 38.60$)与其所在的晋中-冀南-鲁西-辽南(即A-2)省[4]中生代花岗岩长石Pb的同位素组成一致($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.47\sim 18.64$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.40\sim 15.69$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.34\sim 38.99$)。但紧邻其北的阴山-五台-燕辽(A1-2)省的中生代长石Pb的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.94\sim 18.00$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.27\sim 15.58$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.94\sim 38.74$, 中生代矿石Pb的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.48\sim 17.78$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.28\sim 15.53$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.73\sim 38.00$ [4], 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值与青城子的一致或接近, 但青城子矿石Pb的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 显著高于A1-2 省的。包括辽宁北部的冀北-辽北(A1-1)亚省的中生代花岗岩长石Pb和矿石Pb的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.73\sim 17.01$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=14.99\sim 15.36$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=35.56\sim 36.94$ [4], 与青城子矿石Pb显著不同(表2)。因此, 用“块体效应”, 即Pb同位素组成的区域性变异可以解释不同地区中生代的花岗岩长石Pb和矿石Pb之间的关系。

但是在不同地区内, 不同时代岩石的Pb同位素组成之间的关系是各不相同的。例如, 在大别造山带, 中生代花岗岩长石Pb的同位素组成与围岩(新元古代)片麻岩的相当一致[4, 26]。相反, 在冀北-辽北地区,

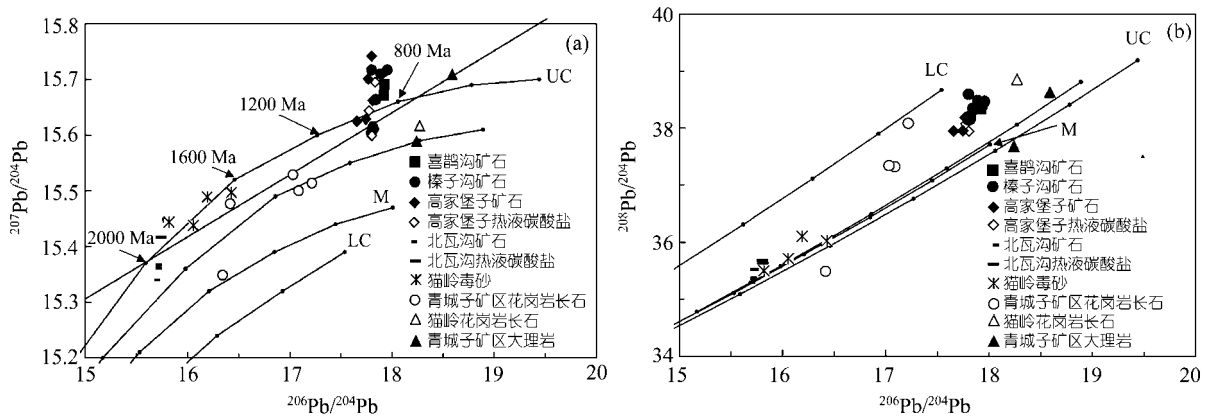
即A1-1 Pb同位素省[4], 中生代花岗岩长石和矿石Pb的同位素组成与变质岩长石Pb(代表变质岩形成时的同位素组成)同位素组成 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=14.05\sim 15.13$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=14.75\sim 15.07$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=33.79\sim 34.98$)[4]完全不同。青城子矿区和北瓦沟-猫岭地区同处于辽东裂谷带的中央(图1), 两地区之间并没有重要的地质界线(如较大断裂)通过, 因此两地区矿石Pb同位素组成的差别不能用“块体效应”解释。我们认为矿床形成年代的差别是它们Pb同位素组成不同的主要原因。

尽管Zartman等[25]的铅构造模式是比较粗略的平均演化值, 但仍可作为对比的基础加深我们对研究实例的Pb同位素组成特征、矿石和岩石物质来源以及成因的认识[23]。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素演化图上(图4(a)), 所有辽东元古代裂谷带内各矿床的数据点都落在上地壳演化线或其附近。但青城子矿田各矿床的与模式上地壳演化线交于约 800~1000 Ma年处。而北瓦沟矿床的Pb同位素组成与上地壳演化线交于约 1900 Ma年处, 猫岭矿床的在上地壳演化线上分布于约 1600~1900 Ma年的范围内。虽然铅模式年龄本身不具有严格的年龄意义, 但上述关系表明所研究矿床的Pb是在 $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 值较高的上地壳环境中演化的, 北瓦沟和猫岭矿床的Pb自元古代就从其源区分离出来而停止演化, 相对比较“古老”, 青城子矿田各矿床的Pb较晚, 很可能是显生宙才从其源区分离出来, 相对比较“年轻”。这一结论与矿床年龄相吻合 [17~19]。青城子矿田三个矿床

表 2 青城子矿田矿石 Pb 与辽宁其他地区中生代长石 Pb 和矿石 Pb 同位素组成的比较

Pb地球化学省 ^{a)}	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
青城子矿田	17.66~17.96	15.60~15.74	37.94~38.60
晋中-冀南-鲁西-辽南(A2 省)花岗岩长石	17.47~18.64	15.40~15.69	37.34~38.99
阴山-五台-燕辽(A1-2 省)花岗岩长石	16.94~18.00	15.27~15.58	36.94~38.74
阴山-五台-燕辽(A1-2 省)矿石	16.48~17.78	15.28~15.53	36.73~38.00
冀北-辽北(A1-1 省)花岗岩长石	15.82~17.01	14.99~15.36	35.56~36.94
冀北-辽北(A1-1 省)矿石	15.73~16.65	15.11~15.31	35.63~36.80
冀北-辽北(A1-1 省)变质岩长石	14.05~15.13	14.75~15.07	33.79~34.98

a) 关于 Pb 同位素地球化学省划分见文献[4]

图 4 青城子矿田和邻近矿床矿石 Pb 同位素组成与 Pb 同位素演化模式^[25]的关系

的 Pb 同位素组成在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图(图 4(a))中构成一近似垂直的排列, 可解释为 μ 值略有不同的上地壳 Pb 之间的混合关系。

在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 4(b)), 北瓦沟和猫岭矿床的 Pb 仍落在上地壳演化线上, 与在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 4(a))所见一样, 北瓦沟矿床的 Pb 与上地壳演化线交于约 1900 Ma 年处, 猫岭矿床的分布于约 1600~1900 Ma 年范围内, 表现出较早从其上地壳源区分离出来而停止演化的特点。但青城子矿田各矿床的 Pb 不落在上地壳演化线上, 而落在上地壳和下地壳演化线之间。由于在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素关系图(图 4(a))上, 青城子 Pb 显然与下地壳无关, 我们倾向于认为青城子 Pb 的演化环境相对于 Zartman 等^[25]的上地壳模型富 Th。事实上, 源区模式 Th/U 比计算结果确实是青城子矿田的较高, 为 4.40~4.74; 北瓦沟和猫岭矿床的较低, 为 4.04~4.26。

3.3 成矿物质来源

由于青城子矿石 Pb 的同位素组成在

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中位于以北瓦沟矿石 Pb 为代表的元古代沉积变质 Pb 和辽河群地层中的高放射成因 Pb 之间, 丁悌平等^[15]把青城子矿石 Pb 解释为上述两种 Pb 混合的结果。单从 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系表面上看, 本文提供的大理岩数据(图 3(a))支持这样的解释。但是在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 3(b)), 所研究的辽东裂谷带矿床矿石 Pb 点构成具有正斜率的排列, 计算的模式 Th/U 比相似, 为 4.04~4.74。相反, 青城子大理岩样品点相当分散, 略呈负相关关系, 模式 Th/U 比变化大, 为 1.68~4.36。青城子大理岩 Pb, 青城子矿石 Pb 和北瓦沟(猫岭) Pb 不构成线性排列, 因此, 青城子矿石 Pb 不可能是北瓦沟-猫岭矿石 Pb 与大理岩 Pb 混合的结果。然而, 无论在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 还是在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中, 辽河群片岩和板岩^[10]的 Pb 同位素组成(有一个样品例外)、青城子矿石 Pb 和北瓦沟-猫岭矿石 Pb 大体构成线性关系。因此, 把青城子矿石 Pb 解释为北瓦沟-猫岭矿石 Pb 与辽河群片岩和板岩 Pb 混合的结果^[15]是有可能的。在对辽河群片岩和板岩的全岩样品进行了 U,

Th和Pb的含量分析并对自成矿时代以来的放射成因Pb进行校正以后, 将可以得到更明确的结论. 又由于青城子矿田内花岗岩长石Pb同位素比值显著低于矿石Pb的, 因此花岗岩Pb对于矿石Pb(和其他成矿物质)的贡献很小. 但其形成时代相近^[2, 17, 18], 所以花岗岩为成矿提供热源是可能的^[15].

北瓦沟和猫岭矿石 Pb 的同位素组成也与中生代猫岭花岗岩体中长石 Pb 的显著不同, 显然, 成矿物质不是由花岗岩提供的. 相反, 在上地壳演化并较早从源区分离出来, 使我们相信其 Pb 直接来自地壳, Pb(和其他成矿物质)在元古代被提取.

致谢 衷心感谢辽宁地勘局杨占兴、辽宁地质五队何畏、青城子矿业公司李承贵、凤银公司马文举、王喜洋诸先生在野外工作中给予的帮助, 中国地质科学院陈毓川先生的指导和帮助、吉林有色地质矿床研究所王义文先生、中国地质科学院邱小平博士、杨占兴和何畏先生的宝贵建议. 感谢审稿人的中肯意见, 使本文在修改过程中得到提高.

参 考 文 献

- 张秋生. 中国早前寒武纪地质及成矿作用. 长春: 吉林人民出版社, 1984. 1~536
- 方如恒, 何特松, 傅德彬. 辽东-吉南早元古代裂谷有色金属矿床. 见: 芮宗瑶, 施林道, 方如恒, 编著. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1994. 54~109
- 王魁元, 赵彦明, 曹秀兰. 华北陆块北缘元古宙典型铅锌矿地质. 北京: 地质出版社, 1994. 1~190
- 张理刚. 东亚岩石圈块体地质, 上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 1995. 1~252
- Bouse R M, Ruiz J, Tilley S R, et al. Lead isotope compositions of Late Cretaceous and Early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona: Implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits. *Econ Geol*, 1999, 94: 211~244
- Chu X L, Huo W G, Zhang X. Sulfur, carbon and lead isotope studies of the Dajing polymetallic deposit in Linxi county, Inner Mongolia, China—Implications for metallogenic elements from hypomagmatic source. *Resource Geol*, 2001, 51 (4): 333~344
- 刘 伟, 李新俊, 邓 军. 东天山金窝子石英脉金矿床成矿流体和成矿物质来源. *中国科学, D辑*, 2002, 32(增刊): 105~119 [\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)
- 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. *中国科学, D辑*, 32(增刊): 11~20 [\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)
- 陈毓蔚, 毛存孝, 朱炳泉. 我国中生代金属矿床铅同位素组成特征及其成因探讨. *地球化学*, 1980, 9(3): 215~229
- 陈毓蔚, 鍾富道, 刘菊英, 等. 我国北方前寒武纪岩石铅同位素年龄测定——兼论中国前寒武纪地质年表. *地球化学*, 1981, 10(3): 215~229
- 刘智海. 青城子矿区及外围铅锌矿床铅同位素地质初步研究. *辽宁地质学报*, 1982, (1): 122~129
- 邓功全. 辽东中部辽河群层控铅锌矿床类型及其主要控矿因素. *辽宁地质学报*, 1983, (1): 53~70
- 王义文. 辽吉地区前寒武纪层控矿床硫、铅同位素特征及矿床成因. *吉林地质*, 1982, (2): 1~15.
- 蒋少涌. 辽宁青城子铅锌矿床的铅同位素组成及其地质特征. *北京大学学报(自然科学版)*, 1987, (4): 112~119
- 丁梯平, 蒋少涌. 华北元古宙铅锌成矿带稳定同位素研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1992. 36~60
- 王文清, 曲亚军. 辽东古元古宙金矿地质特征及成矿模式. *辽宁地质*, 2000, 17(3): 161~172
- 刘国平, 艾永富. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨. *矿床地质*, 2002, 21(1): 53~57
- 薛春纪, 陈毓川, 路远发, 等. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. *矿床地质*, 2003, 22(2): 177~184
- Chen J F, Yang G, Yu G, et al. Re-Os dating of arsenopyrites from the Maoling gold deposit, northeast China. *Goldschmidt Conference, Japan*, 2003, A59
- Jahn B M, Cuvelier H. Pb-Pb and U-Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment. *Chem Geol*, 1994, 115: 125~151 [\[DOI\]](#)
- Jahn B M, Simonson B M. Carbonate Pb-Pb ages of the Wittenom formation and Carawine dolomite, Hamersley basin, western Australia (with implications for their correlation with the Transvaal dolomite of South Africa). *Precambrian Res*, 1995, 72: 247~261 [\[DOI\]](#)
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. U-Pb dating of marble associated with eclogite from the Dabie Mountains, East China. *Chinese J Geochem*, 1997, 16(3): 193~201
- 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 1998. 125~174
- Ludwig K R. Isoplot- A plotting and regression program for radiogenic-isoplot date, version 2.92, USGS Open-file Report, 1997, 1~47
- Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135~162 [\[DOI\]](#)
- 张宏飞, 高山, 张本仁, 等. 大别山地壳结构的 Pb 同位素地球化学示踪. *地球化学*, 2001, 30(4): 395~401