

(七)

同位素·包裹体

地质出版社

矿产专辑

(七)

同位素·包裹体

地质出版社

内 容 提 要

本专辑20篇文章系译自美国经济地质(77—79卷),其中18篇文章分别应用铅、碳、氢、氧、硫同位素及包裹体同位素,从不同的角度探讨了成矿物质来源、成矿时代、热液演化和矿床成因;根据同位素组成区分矿床类型,划分不同相和期次的矿化;评价矿床形成过程中可能参与的各种富集机制;解释金属原地活化和搬运及沉淀的环境;根据同位素平衡,测定矿物的生成温度及其围岩的蚀变温度;以及分析同位素资料在矿床勘探过程中用于矿床性质的评价和找矿等问题。一篇文章探讨了伊利石结晶度、有机质反射率在矿床勘探方面的应用。还有一篇文章是应用流体包裹体资料分析成矿热液温度、压力和成分的变化;以及热液卤水形成过程中与硅酸盐和矿石矿物的关系。

应用同位素资料解决矿床研究中的上述问题,对我国来说,除在解决成矿物质来源方面的应用较为普及外,其它方面则还属刚刚开始。为使广大的矿床地质工作者、同位素地质工作者及勘探地质工作者对国外同位素资料在矿床研究中的应用有所了解,以及对同位素数据的分析、解译,我们编辑了这本专辑,以适应广大地质工作者的需要。

矿 产 专 辑

(七)

同位素·包裹体

责任编辑:李上男

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 22¹/₄ 字数: 528,000

1986年8月北京第一版·1986年8月北京第一次印刷

印数: 1—1,152册 定价: 5.25元

统一书号: 13038·新237

目 录

南阿帕拉契亚山皮德蒙特和蓝岭矿床中方铅矿的铅同位素模式.....	1
铅同位素研究在卡罗来纳板岩带块状硫化物及脉状矿床中的应用.....	18
Balmat矿床铅同位素组成及其成因意义	30
成矿省和再活化作用的研究.....	42
加拿大科迪勒拉页岩中的铅锌矿床平均铅同位素增长曲线.....	55
沙特阿拉伯地盾中块状硫化矿床的铅同位素数据.....	74
瑞典加里东期含硫化物脉的铅同位素组成.....	79
比利时海利脉状铅锌矿床及其围岩的铅同位素研究——成因模式的建立.....	94
瑞典加里东造山带上部推覆杂岩体中层控硫化矿床的铅同位素分馏系列.....	100
铅同位素研究对昆士兰州芒特艾萨铜矿的成因的意义.....	117
加利福尼亚西沙斯塔铜锌矿区的氧、氢和硫同位素地球化学.....	160
魁北克省Noranda县阿穆莱特矿山一些岩石和氧同位素的关系, 以及它们对 太古代块状硫化矿床成因的影响.....	172
不列颠哥伦比亚省金伯利的苏利万块状硫化矿床的氧同位素地球化学.....	186
阿拉斯加De Long山燧石的稳定氧同位素及雏晶粒径分析——海底喷气矿床 的一种勘察方法.....	200
新西兰 Glenorchy白钨矿成矿溶液的起源与演化的氧同位素证据.....	206
魁北克Gaspé矿山矿石的硫同位素组成——把矿液中硫酸盐-硫化物同位素不 平衡应用到其它斑岩型矿床的一个实例.....	224
苏格兰达拉德变质岩地区 Aberfeldy 重晶石、锌、铅矿床和较小的硫化物矿 化的硫同位素研究.....	252
南朝鲜Weolag钨钼矿床的碳、氢、氧、硫同位素和流体包裹体研究——变 质作用及成矿过程中的流体演化.....	291
伊利石结晶度、有机物反射率和同位素技术在矿床勘探方面的应用 ——加拿大魁北克加斯佩西南地区地质研究.....	319
新南威尔士新英格兰锡矿化花岗岩成矿作用的流体包裹体研究.....	334

南阿帕拉契亚山皮德蒙特和蓝岭矿床中 方铅矿的铅同位素模式

A.P. Le Huray

摘 要

南阿帕拉契亚山脉块状硫化物矿床具有与其地质环境相对应的两组截然不同的铅同位素比值。皮德蒙特块状硫化物主要与寒武纪的火山岩共生。由于源岩受到U/Pb富集作用的影响, 从而使其铅年龄值过于年轻。皮德蒙特块状硫化矿床, 自弗吉尼亚州的矿物矿区 (Mineral) 到亚拉巴马州的石山 (Stone Hill) 矿床铅同位素的放射成因数值有逐渐减少的趋势, 这种现象很可能反映了从东北到西南方向内硅铝质的火山作用是逐渐减少的。通过这些数据的回归可得出一条与大约3.7Ga的二次等时线上年龄值相对应的斜率。这条斜线是打算来代表数量不等的上地壳铅 (朝西南方向逐渐减少) 与U/Pb相对亏损的源岩中的铅混合, 虽然该源岩已经受了连续的, 或者短期的相当于Pb的U富集作用。在金斯 (Kings) 山带矿石的方铅矿也出现了同样趋势, 进一步证明存在这类源岩。

蓝岭地区的块状硫化物产在上前寒武系变质沉积岩系中, 其铅含量是非常的少。鸭城 (Ducktown) 和戈森利德 (Gossan Lead) 方铅矿中铅同位素比值, 与年龄相同的其它矿床可能的铅含量相比, ^{206}Pb 高度富集。异常的放射成因组分大概是源于以碎屑沉积岩为主的含矿岩系中的铅。鸭城方铅矿的 ^{206}Pb 放射成因组分, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围狭窄说明在成矿过程中很老的陆壳岩并未参加。

北卡罗来纳州Hamme钨矿区矿脉内的方铅矿形成了类似于造山期后 (大约300Ma) 花岗岩深成体中钾长石的铅的密集数据群。弗吉尼亚州含金黄铁矿带的矿化脉中的方铅矿的放射成因的铅同位素比值散布很宽, 且与弗吉尼亚中部皮德蒙特的块状硫化物矿床无关。

序 言

本文所发表的方铅矿的铅同位素分析数据代表了南阿帕拉契亚山从弗吉尼亚到亚拉巴马的蓝岭和皮德蒙特区发现的各类型矿床中某些样品的测定结果。先前发表的这一地带的分析结果, 大多不具代表性, 仅发表过三个精确的测定结果, 这三个样分别采自弗吉尼亚矿物矿床, 北卡罗来纳的 Hamme 钨矿床, 以及佐治亚的 Dahlonga 矿床 (Doe和Zartman, 1979)。关于卡罗来纳州中部板岩带矿床的铅同位素的详细研究报告请见本卷另一篇文章 (Kish和Feiss, 1982)。

产在阿帕拉契亚山结晶岩内的许多块状硫化物矿床可划分为蓝岭 (或鸭城) 型矿床 (Ross, 1935), 及皮德蒙特 (或银山) 型矿床 (Brown, 1976), 鸭城型矿石的特征是由磁黄铁矿和/或黄铁矿组成, 并含少量的, 但有时具经济价值的铜、锌和磁铁矿。这些矿体中最大和最著名的矿床是田纳西州的鸭城矿床。蓝岭矿床一般是产于上前寒武系变质沉

积岩和变质火山岩中的角闪岩相内。围岩和矿石间的关系通常不很清楚，例如在北卡罗来纳州的Ore Knob，这些位于剪切带内的矿体是偏离围岩走向的小分枝（Kinkel, 1967）。这种类型的小矿体也见于皮德蒙特地区。

银山型矿床（Brown, 1976）赋存于皮德蒙特的上寒武系到下古生界的变质火山岩和变质沉积岩中。一般比鸭城型矿床更富含锌、铅、银和铜，而与围岩为整合关系。浅变质的卡罗来纳板岩带，某些矿石保留有软沉积变形的证据。

南阿帕拉契亚山岩层也是不属于上述任一类型矿床的含矿岩系。其中包括 Hamme 钨矿脉和金斯山带重晶石矿床，以及许多含金黄铁矿脉。

一般地质背景

南阿帕拉契亚山结晶岩分成蓝岭和皮德蒙特地质区。蓝岭（图1）为一异地复背斜，主要由非整合的覆于格林维尔期（1.0~1.3Ga）花岗岩和片麻岩之上的巨厚的上寒武系

和下古生界变质火山岩和碎屑沉积岩所组成。所有岩层都向北西方向逆冲到山谷和山脊区非变质的古生代沉积岩之上。蓝岭大部分地区是以 Bre-vard 断层带东南部为界。

蓝岭的块状硫化物矿体赋存于盆地格林维尔核部两翼的上寒武系变质沉积岩和变质火山岩中（Gair 和 Slack, 1980）。在西部，鸭城矿区和几个较小的矿床，包括北卡罗来纳的丰塔纳矿区赋存在 Ocoee 超群的大 Smoky 群中（Hadley, 1970）。大 Smoky 群是由变质的，互层状的杂砂岩、石英岩和片岩组成。鸭城附近出露的几个小的、整合的火成角闪岩是该岩系中唯一能识别的火成活动的证据（Magee, 1968; Hadley, 1970）。

Rankin 等认为（1973）大 Smoky 群至少有一部分与 Ashe 组有关，在蓝岭复背斜东翼主要为变质杂砂岩，含硫化物和石墨的千枚岩岩系。作为

弗吉尼亚州西南部大戈森利德矿区以及其他块状硫化物矿体的主岩——Ashe 组，含有大量的据 Rankin（1970）和 Rankin 等（1973）认定为镁铁质火山岩的角闪岩。

蓝岭的块状硫化物矿体的沉积作用据认为与地堑式盆地，——尤其是 Ocoee 和 Ashe 盆地的沉积作用是同期的。这两个盆地是在晚前寒武纪裂谷和 Iapetus（原始的大西洋）洋的张开阶段所形成的（Rankin, 1975; Gair 和 Slack, 1980）。

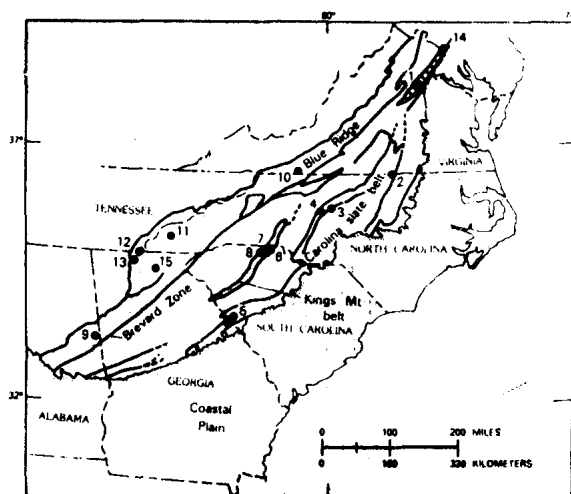


图 1 表示文中所讨论的南阿帕拉契亚山矿床位置索引图

- 1—弗吉尼亚州矿物矿区；2—北卡罗来纳州 Hamme 钨矿区；3—北卡罗来纳州吉德矿区；4—北卡罗来纳州金山矿区；5—佐治亚州和南卡罗来纳州的 林肯顿—McCormick 矿区；6—南卡罗来纳州金斯克里克重晶石矿；7—南卡罗来纳州卡麦隆矿；8—南卡罗来纳州卡斯尔远景区；9—亚拉巴马州石山矿；10—弗吉尼亚州戈森铅矿；11—北卡罗来纳州丰塔纳矿区；12—田纳西州鸭城矿区；13—佐治亚州佩恩远景区；14—弗吉尼亚州含金黄铁矿带；15—佐治亚州达伦尼达矿区

表 1 已测定铅同位素组成的矿床的位置、地质关系和硫化矿物

	硫化矿物	地质关系	参考文献
弗吉尼亚州中部皮德蒙特; 1. 弗吉尼亚州路易萨县, 矿物矿区 14. 弗吉尼亚州含金黄铁矿带	py, sp, gn, cpy, mg, Au, py, gn. 等	在寒武系(?)角闪岩相Chopawamsic 组中成块层状透镜体 弗吉尼亚州中部皮德蒙特的矿化石英脉	Pavlidis 等, 1982 Pavlidis 等, 1982
卡罗来纳板岩带; 2. 北卡罗来纳州万斯县, Hamme 钨矿区; Queen 钨矿带 3. 北卡罗来纳, 戴维森县, 吉德矿区; 银山矿 银谷矿 4. 北卡罗来纳Rowand 和Cabarrus 县, 金山矿区; 联合铜矿 银竖井 5. 南卡罗来纳和佐治亚, 林 肯顿-McCormick矿区; 佐治亚威尔克斯县 Magruder 矿 南卡罗来纳McCormick县 Dorn 矿; 金斯山带 6. 南卡罗来纳, 切罗基县, 金斯·克里克重晶石矿 7. 卡斯尔远景区 8. 南卡罗来纳, Caffney, 卡麦隆矿	分离的颗粒; py, sp, cpy 等 sp, gn, py, cpy, Au和Ag sp, gn, py, cpy, Au和Ag py, cpy, gn, sp, cc, bn, Au py, cpy, gn, sp, cc, bn, Au py, cpy, sp, gn, Au 重晶石, 少量硫化物 py, gn gn, 菱铁矿	万斯县钠长石花岗闪长岩和 下古生界(?)板岩和千枚岩 接触带上的石英—钨锰矿脉 寒武系吉德组中层状的 细粒块状矿石和石英层和矿 脉中的硫化物 粗粒矿石, 比银山矿含有更 多的 银黝铜矿, gn, Po和 Ag, 及含有稀少的cpy 金山—银山断层带内中寒武 统(?)的绿泥石绢云母千枚 岩中的矿脉和块状硫化物 同上 寒武系小河组长英质火山岩 中的浸染状硫化物, 局部为 块状硫化物透镜体 同上 卡罗来纳重晶石带的浸染矿 石, 许多重晶石透镜体之一 变英闪岩内石英脉中的黄铁 矿和方铅矿大晶体绿泥石绢 云母基质中的硫化物和菱铁 矿	Gair, 1977; Casadevall 和 Rye, 1980; Foose 等, 1980 Carpenter, 1976 Indorf, 1981 Carpenter, 1976 Indorf, 1981 Carpenter, 1976 Carpenter, 1976 Carpenter 和 Allard, 1980 Carpenter 和 Allard, 1980 Sharp 和 Hornig, 1981 Butler, 1966

续表

	硫化矿物	地质关系	参考文献
亚拉巴马州北部皮德蒙特 9. 亚拉巴马克利伯恩和伦道夫县, 石山矿	po, cpy, sp, gn, py, Ag	上前寒武系(?)Poe山群的库萨 Block 角闪岩层底部附近的块状角硫化物	Espenshade, 1963; Whittington, 1980
蓝岭区			
10. 弗吉尼亚卡罗尔和格雷森县, 戈森利德矿区	po, 少量的sp, cpy, gmmg	上前寒武系Ashe组内磁黄铁矿矿石的透镜状矿体和脉状块体	Henry 等, 1979; stone 和 stose 1957
11. 北卡罗来纳斯温县, 丰塔纳矿区, Adams 矿	po, cpy, Cu 矿物, 少量的sp, gn	上前寒武系大Smoky群中块状矿石的整合透镜体	Espenshade, 1963
12. 田纳西州波克县, 鸭城矿区	po, py, cpy, Cu 矿物, 少量的sp	上前寒武系大Smoky群中八个块状透镜体	Magee, 1968
13. 佐治亚州范因县, 佩恩远景区	cpy, sp, gn	鸭城走向延伸方向上的浸染状硫化物	

附注: 矿区或矿山名称编号见图 1 上的位置。

矿物缩写字: bn—斑铜矿; cc—方解石; cpy—黄铜矿; gn—方铅矿; mg—磁铁矿; po—磁黄铁矿; py—黄铁矿; sp—闪锌矿

据Rb/Sr全岩 (Fullagar和Bottino, 1970), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 值 (Dallmeyer, 1975a) 以及地质条件制约 (Butler, 1972) 所得出的结果是蓝岭变质作用的顶峰时间为 480和430Ma前。在鸭城地区退化变质作用的影响很明显, 且占主导地位 (Magee, 1968)。蓝岭主要的逆冲事件和最后侵位都发生在晚古生代。

皮德蒙特地质区是一个复杂的区域, 通常可将其中部地区划分为高级变质的内皮德蒙特带, 夏洛特带和Kiokee带; 以及通常为低级变质的Chauga, 金斯山带和卡罗来纳板岩带。弗吉尼亚中部皮德蒙特到东北部, 和北亚拉巴马州皮德蒙特到西南部与南皮德蒙特中部的关系不能肯定。有价值的层控硫化物矿化局限于弗吉尼亚州中部皮德蒙特的火山深成岩带和卡罗来纳州板岩带 (Gair和Slack, 1979, 1980)。由矿化石英脉构成的弗吉尼亚州含金黄铁矿带 (见Pavlides等, 1982) 和弗吉尼亚 (铜) 矿区 (Carpenter, 1976), 也分别产于弗吉尼亚州中部和卡罗来纳州板岩带。

在弗吉尼亚, 层控块状硫化物矿床赋存于可能为寒武纪的Chopawamsic组中 (见Pavlides等, 1982)。Chopawamsic组是由互层状石英质, 中性以及镁铁质变质火山岩和变质沉积岩组成 (Southwick等, 1971), 分布范围自华盛顿特区南部大约50km处向西南延伸175km。据Gair等 (1980) 报道, 该火山岩套具有拉斑玄武岩的岛弧火山活动的地球化学特征, 虽然也出现了钙碱性组合。他们还指出弗吉尼亚中部皮德蒙特的火山深成岩带与卡罗来纳板岩带没有直接的关系。

卡罗来纳板岩带通常为一系列从上前寒武系到下古生界的细粒火山岩和互层状沉积岩, 且已遭受低级绿片岩相变质作用。分布范围从弗吉尼亚州中南部延伸到佐治亚州 (图1)。

这个板岩带常被认为一个古老的岛弧(例: Rankin, 1975)。可是, 由Long (1979) 近年来所作的研究, 根据磁异常和重力异常模式却认为是一个大陆裂谷带。

在卡罗来纳板岩带的中部地区有钙碱性火山岩(Conley和Bain, 1965; Butler和Ragland, 1969)。在佐治亚州的西南端和南卡罗来纳州, Whitney等(1978)发现了比较典型的原始火山岩系列的拉斑玄武岩组合。层控硫化物矿床与两者都有关系。

金斯山带是一个特殊的地层学的疑难区, 该区有变质石英岩, 砾岩, 大理岩以及变质火山岩和深成岩。对此人们已有各种的解释, 如认为是包含较年轻岩层的向斜(Overstreet和Bell, 1965; Hatcher, 1972), 有人认为是碎裂带(Griffin, 1971), 有人认为是一个大的, 向北倾伏的背斜(Horton和Butler, 1977, 1981)。目前尚未发现具有价值的硫化物矿化, 但是, 各种类型的矿床都值得注意(Horton和Butler, 1977, 1981)。

在皮德蒙特的其他地带和地区, 在这次研究中只对亚拉巴马州北部皮德蒙特的库萨Block, 库萨Block的上部角闪岩相岩石主要是变质泥岩和少量角闪岩(Tull, 1978)。石山铜矿赋存于Poe Bridge山群的角闪岩层内, Tull把Poe Bridge山群描述为“一个由粗粒的, 含石墨、长石质云母片岩, 片麻岩, 石英岩和角闪岩互层组成的特殊岩系”(Tull, 1978, 445页)。库萨Block的岩石时代不明, 据其与蓝岭地区晚前寒武纪变质沉积岩岩相的相似, 认为也属于晚前寒武纪(Tull, 1978)。其层位与阿帕拉契亚山其他单元的层位关系却是有疑问的。

对已作过方铅矿分析的矿床的简单描述见表1。

分 析 程 序

方铅矿在 HNO_3 和 HClO_4 中溶解之后, 铅呈氧化物被镀在大约2V的铂阳极上。用Ludwig和Silver (1977) 提出的修改程序溶解钾长石。铅同位素比值是由丹佛的美国地质调查所的实验室和塔拉哈西的佛罗里达州立大学用国家标准局的Neir型12英寸 60° 质谱仪进行测定。已发表的分析值是每种溶液都采用表面发射(氧化硅凝胶)技术, 至少两次完全操作的平均值, 分析精度高于0.1%。所有分析值均以国家标准局SRM 981普通铅标准校正。

结 果 和 讨 论

皮德蒙特块状硫化物矿床

取自皮德蒙特地区块状硫化物矿床的方铅矿的铅同位素组成列于表2中, 也在图2中表示。

共分析了皮德蒙特五个块状硫化物矿区的方铅矿样品的铅同位素组成。这五个矿区为: 弗吉尼亚州的矿物矿区; 北卡罗来纳州的吉德和金山矿区; 佐治亚州和南卡罗来纳州的林肯顿—McCormick矿区; 亚拉巴马州的石山铜矿区等。这些矿区的大多数矿床相当于皮德蒙特(或银山)型矿床。

这五个矿区矿体中的铅明显的和新布伦瑞克的巴瑟斯特的铅极为相似(图2; Stacey等, 1969)。巴瑟斯特矿石赋存于中奥陶统变质火山岩和变质沉积岩层中(Ruittenberg,

1976)。矿物矿区位于寒武纪(?) 类似的岩层内(Pavlidis等, 1982)。在矿物和巴瑟斯特矿区中矿石的铅同位素特征在Doe和Zartman(1979)的铅构造就位模式图上接近于平均造山带曲线, 且位于其上。这种类型的矿床通常大部分是火山岛弧环境中的海底喷气块状硫化物矿体, 过去的模式把块状硫化物矿体的铅同位素看成是单阶段的或整合铅(下一篇文章中将讨论铅同位素数据的理论和应用, Kanasewich, 1968; Doe, 1970; Doe和Stacey, 1974)。矿物区和巴瑟斯特区矿石铅的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值高, 说明上陆壳物质的加入比平均值要大, 这个高 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值使得 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上数据都投点到平均生长曲线之上(图2)。Doe和Zartman(1979)认为这个特征说明了硅铝质弧的火山作用。

Doe和Stacey(1974)发现世界上很多的大矿床的铅同位素与铅演化模式曲线一致。他们还指出, 在同一矿区内与主要生产矿山的铅比值类似的矿床最有可能成为经济价值大的矿床。巴瑟斯特和矿物矿区肯定不属同一矿区, 甚至也不是同一时代的, 但是它们可能证实了Doe和Zartman(1979)的发现, 即作为皮德蒙特南部最有远景地区之一的矿物矿区, 在矿石的组成和含矿围岩, 及其铅同位素特征方面都与巴瑟斯特矿区相似。

矿物矿区块状矿石中的方铅矿铅通常具有火山成因的块状硫化物方铅矿铅的均匀性(表2)。可是在Julia矿体浸染状方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围宽, 同时比块状矿床含有更多的放射成因组分, 而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值保持均匀。这可能是在变质再活化作用时, 浸染状矿石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值较高, 说明另有放射成因的 ^{206}Pb 加入。

在Cofer, Allab Cooper和Sulphur矿体中方铅矿铅比在Julia和Arminius透镜体中方铅矿铅的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的放射成因的稍大, 但不显著。

矿物矿区所在的弗吉尼亚州中部的火山深成岩带, 及其西南部的卡罗来纳板岩带之间似乎是没有直接关系(Gair等, 1980)。卡罗来纳板岩带岩层是晚前寒武纪到奥陶纪(?) 的浅变质火山岩和沉积岩, 自弗吉尼亚州中南部延伸到佐治亚州的东北部。在北卡罗来纳中央带, 吉德和金山矿区含有的铅比矿物矿区放射成因的铅更少。尽管邻近吉德和金山矿区的矿物(表1)及同位素特征(表2)与之稍有显著区别, 这两个矿区中吉德矿带的铅放射成因的较少。

吉德和金山矿区的铅同位素特征的更详细的说明可见在Kish和Feiss(1982)的文章, 所以, 这里只需作简短的讨论。

在吉德矿区内, 银谷矿床比规模较大的银山矿的放射成因的铅少。吉德矿区横跨银山断层, 以金山—银山断层带为东部边界(图1)。金山—银山断层带正是浅变质的卡罗来纳中部板岩带和西北部深变质的夏洛特带之间的边界。断层带内局部地段的岩石强烈破碎。银山矿床位于断层带内, 但仍保留了原生层和软沉积物变形的迹象(Indorf, 1981)。

金山矿区矿床全部位于断层带内。Kish和Feiss(1982)发现在金山矿区内脉型矿床比有关块状硫化物矿体中的放射成因的铅同位素比值稍多。可是, 在这次研究中, 所分析的石英脉方铅矿铅比联合铜矿床块状矿石的放射成因的铅更少(表2, 样品PS-10211)。

这两个矿区的铅, 与弗吉尼亚州矿物矿区的铅一样, 非常接近于造山地带的平均组成, 但说明只有较少的上陆壳物质成分加入。北卡罗来纳州这两个矿区的铅同位素组成证明它们是由不同的热液系统和源岩物质的混合而成的。

吉德矿区含矿岩系铅的平均模式年龄和已知年龄的差大约与矿物矿区相同。而金山方铅矿的模式年龄稍稍年轻些(表2)。

表 2 皮德蒙特块状硫化物矿床中方铅矿铅的同位素比值, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 模式
年龄和计算出的U/Pb(μ)比值

位置和样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	模式年龄 (Ma)	μ
弗吉尼亚州, 矿物矿区 块状矿石中的方铅矿					
Arminius 矿体					
U58A-620	18.208	15.642	38.121	398	10.2
76BD2①	18.205	15.643	38.121	422	10.2
Cofer 矿体					
PS-02001	18.219	15.642	38.126	390	10.2
PS-02002	18.219	15.641	38.116	388	10.2
PS-02003	18.221	15.652	38.146	408	10.2
Cofer②	18.226	15.653	38.181	407	10.2
Allah Cooper 矿体					
PS-03001	18.248	15.651	38.155	387	10.2
Julia 矿体					
101J-860	18.206	15.638	38.106	393	10.2
Sulphur 矿体					
27S-542	18.218	15.637	38.109	381	10.2
浸染状方铅矿					
Julia 矿体					
cv-80-86-1611	18.261	15.642	38.129	359	10.2
cv-80-86-1729	18.294	15.645	38.149	340	10.3
cv-80-86-1961	18.222	15.638	38.123	380	10.2
北卡罗来纳州, 吉德矿区 块状矿石中方铅矿					
银山矿					
PS-10101	18.135	15.622	37.888	413	10.1
PS-10102	18.133	15.611	37.863	393	10.1
银谷矿					
PS-10302	18.107	15.615	37.867	420	10.0
浸染状方铅矿					
银山矿					
PS-10107	18.138	15.616	37.874	398	10.1
银谷矿					
PS-10301	18.114	15.601	37.843	387	10.0
北卡罗来纳州, 金山矿区 块状矿石中的方铅矿					
联合铜矿					
PS-10204	18.222	15.622	37.915	348	10.2
银竖井					
PS-10601	18.207	15.622	37.904	359	10.2
浸染状方铅矿					
联合铜矿					
PS-10207	18.216	15.618	37.908	345	10.2
PS-10211	18.151	15.607	37.876	393	10.1

续表

位置和样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	模式年龄 (Ma)	μ
佐治亚和南卡罗来纳, 林肯顿— McCormick 矿区					
Dorn 矿 (块状矿石)					
PS-20101	18.025	15.562	37.629	375	9.89
Magruder 矿 (浸染状矿石)					
PS-30101	18.077	15.581	37.696	374	9.97
亚拉巴马州, 石山矿					
块状矿石中的方铅矿					
MO-3	17.919	15.525	37.644	380	9.74
MO-9	17.942	15.532	37.670	377	9.77

模式年龄和 μ 值是据 Stacy 和 Kramers (1975) 3.7Ga 分异事件计算的。对所有矿床的 μ 值计算, 假定矿化年龄为500Ma。见附录 I 样品描述。

①Doe 和 Zartman, 1979。

②经美国地质调查所 B. R. Doe 的同意, M. H. Delevaux 用三带分析。

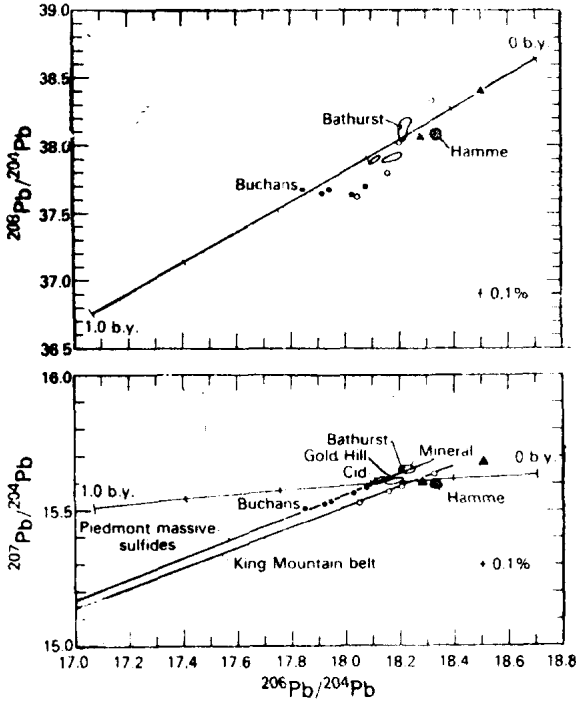


图 2 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图表示皮德蒙特块状硫化物矿床和金斯山带方铅矿的数据。为了对比, 还列入新布伦瑞克的巴瑟斯特, 和纽芬兰的巴肯斯的数据点。(见正文, 为了讨论)。生长曲线是Stacey 和 Kramers (1975) 提出的。回归线只包括皮德蒙特块状硫化物和金斯山带数据。它们的斜率分别是 $0.3987 \pm 0.0575 (2\sigma)$ 和 $0.3669 \pm 0.0667 (2\sigma)$ 。还表示了Hamme矿区和弗吉尼亚含金黄铁矿带数据

●—佐治亚和南卡罗来纳, 林肯顿—McCormick 矿区, 和亚拉巴马, 石山矿, ○—金斯山带方铅矿; ▲—弗吉尼亚, 含金黄铁矿带

卡罗来纳板岩带上所测定的铅同位素组成最低值见于佐治亚州西南端和南卡罗来纳矿带上的林肯顿-McCormick 矿区矿床。该铅同位素组成与造山地带的平均数值接近,但比至今已讨论过的其他矿床内的上陆壳组成都少。

Carpenter等(在印刷中)提出了在林肯顿矿区附近的侵入杂岩及其周围赋存有块状硫化物的长英质火山岩的铷-锶全岩年龄为 $554 \pm 20\text{Ma}$ 。这个年龄值与Hill和Butler(1969;由Wright和Seiders, 1980再次计算)对北卡罗来纳板岩带中Uwharrie组测出的 $554 \pm 50\text{Ma}$ 的Rb/Sr年龄值完全一致。Uwharrie组位于吉德矿区所赋存的吉德组之下。这两个矿区的锆石年龄值也非常一致(Wright和Seiders, 1980; Carpenter等, 在印刷中)上部吉德组的 Flat Swamp Member的锆石年龄比Uwharrie组(A.L.Odom, pers. commun)的稍为年轻些。因此,与北卡罗来纳州矿石放射成因的铅同位素组成相比,林肯顿-McCormick 方铅矿的放射成因的铅同位素组成较少,大概是更多地反映了源岩物质的不同U/Pb (μ) 值,而较少地反映它们年龄的差异。

按照Doe和Zartman (1979)的铅构造就位模式,造山带铅演化的平均值是在造山带环境中,具有各自不同的铅同位素组成的上地壳沉积物、基底岩石和地幔物质的混合结果。在一个充分混合系统中,如果铅是来自一个均化的孤立系统(即单阶段演化),则其铅组成接近所有已知组成的平均值。在这些板岩带西南部的火山喷气矿床中,铅的放射成因的减少可能与岛弧发育中,或者至少在成矿热液作用中,大陆物质组分较少加入相对应。

本次研究范围内,在亚拉巴马州北部皮德蒙特石山铜矿床内富铅锌的透镜状矿体中方铅矿的放射成因的铅同位素组成最小。把这样的矿石和围岩的时代定为晚前寒武纪(?)年代并不奇怪(Whittington, 1980)。可是,所提出的年龄与铅模式年龄差别很大,这反映了对前寒武纪矿石而言,其铅同位素中放射成因的铅太多了。

由于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值太高,而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值低便产生了问题。即与拉斑玄武岩有亲缘关系的角闪岩和热液蚀变岩包围了含硫化物的长英质岩层(Whittington, 1980)。通过镁铁物质的热液循环,其铅同位素组成应有所反映,即表现为 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值低。层位位于赋存有矿床的火山岩系之下的巨厚的片岩地层据认为是上前寒武系的碎屑沉积物(Tull, 1978)。这种沉积物的U/Pb值高。由于沉积岩层中的铅大量加入,使矿化热液铅源中放射成因的铅比值高,当被一个镁铁质火山岩的组分改造后,就能产生出已测定出的比值。因为自 ^{235}U 衰变而成的 ^{207}Pb 量在晚前寒武纪时是低的,因此从放射成因组分高的铅源所得到的 ^{207}Pb 量必定最低。因此,当与其他源的铅混合时,稀释效应最低。这个模式比造山弧中火山喷气的来源更适合于海底热泉(多半在裂谷带中),且与库萨Block中火山岩的相对缺乏也是一致的(Tull, 1978)。它类似于Mauger (1972)对鸭城矿床成因的观点。石山与鸭城矿床的矿物成分及地质背景的相似程度大于与银山型块状硫化物的相似性。

把石山数据与纽芬兰中部志留纪(?)的巴肯斯矿床的比值进行对比,结果很清楚(图2)。据认为,巴肯斯数据代表以海洋地幔铅成分为主(Doe和Zartman, 1979)。通过对比说明,虽然石山为镁铁质火山岩所包围,但由于晚前寒武纪(?)的方铅矿比志留纪的矿石所含放射成因的铅较多,该矿床仍含有大量的非大洋铅。

所分析的块状硫化物矿床样品中,方铅矿是一种有意义的组分。在含有相当多铅的矿床的同位素比值中,变质作用并不是总能辨别出来的,特别是沉积作用与变质作用时间间隔较小时(如弗吉尼亚州和板岩带矿床相隔 $100 \sim 200\text{Ma}$),更是难以辨别的。因此,至今

已讨论过的矿床中观察到的大量的年轻模式年龄，大概不是由于变质作用的影响，而是由于放射成因的铅加入，而提供放射成因铅的上陆壳物质自硅铝质弧的东北—西南方向逐渐减少。

正如图2所表明的，由皮德蒙特块状硫化物矿床所得到的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为一斜率为0.3987的直线，采用了Stacey和Kramers的参数 (1975)，并假定矿化年龄为500Ma，在二次等时线上截取了较低值为 $3.7 \pm 0.250\text{Ga}$ (2σ)。如果这些点包括了不同年龄的矿床，根据定义，则认为这条线实际上不是一条等时线。这有两种可能性。这条线可能是偶然的等时线，或者是它可能反映皮德蒙特矿床之间的一种真实关系。

若认为石山矿床的时代是晚前寒武纪，则其方铅矿的铅同位素组成极高。在这种情况下，这条线大概是偶然的。即使铅同位素组成已经受到变质作用的影响，这条线同样也能应用。可是，最令人感兴趣的是所分析的纽芬兰的巴肯斯的方铅矿 (Doe和Zartman, 1979) 虽未用回归法计算，却也落在这条线上。(图2)。

假如这条线能反映各种矿床铅源之间的真实关系，那么，把石山矿床看作是晚前寒武纪则难以接受。表2列出了已测出的铝同位素组成的源岩物质的U/Pb比值。U/Pb值是按Stacey和Kramers (1975) 的3.7Ga分异事件计算的，并假定所有皮德蒙特块状硫化物最小的矿化年龄为500Ma。U/Pb比值从东北 (弗吉尼亚州矿物矿区) 到西南方 (亚拉巴马州石山矿) 逐渐减少。这种型式的一种可能解释是均一的平均铅同位素组成以及低U/Pb值的区域性铅源，例如，亏损的下地壳或地幔与数量不等的U/Pb平均值较高的陆壳物质的混合。在成矿时期，铅源的铅同位素比值可能投点到皮德蒙特块状硫化物方铅矿的铅趋势线上。当非放射成因源区的铅受到造山期数量不等的上地壳铅混合的混染就可能产生所观察到的型式。方铅矿的铅同位素比值从东北到西南方逐渐减少表明参加成矿系统的上地壳铅逐渐减少。

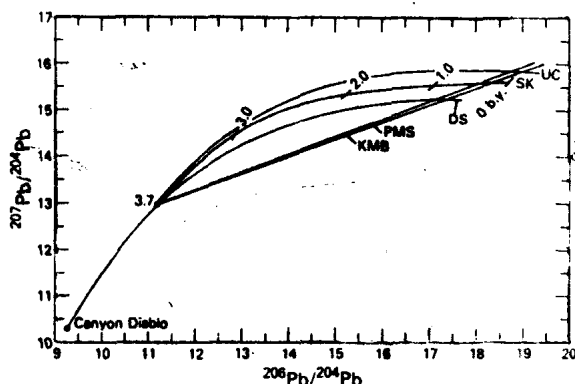


图3 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图表明了自3.7Ga前分异作用以来，U/Pb值连续增加的亏损源 (DS) 中铅的演化。平均地壳生长曲线以SK表示。Stacey和Kramers (1975) 演化曲线UC是U/Pb富集的上地壳物质的平均生长曲线，来自亏损源 (DS) 的铅可能已经与富集U/Pb的上地壳物质混合，并产生了皮德蒙特块状硫化物 (PMS) 和金斯山带 (KMB) 的方铅矿铅同位素组成的趋势线

皮德蒙特块状硫化物矿床已分析的所有方铅矿所得出的铅模式年龄相对于已知或推测的成矿年龄而言是过于年轻了。为使所有模式的铅年龄都成为年轻的，必须通过一次，或多次事件使所有源岩的铀都相对铅而增加。在假想的U/Pb亏损的源区中，可能已经经历一次或多次不连续的铀增加，铅减少的过程，或者是一个连续的U/Pb增加过程，类似于Cumming和Richards (1975) 所提出的把地球当作整体而参加成矿作用的模式。Tatsumoto (1978) 认为在地幔中由于分异作用而使U/Pb比值稳定地增加。

图3概略地表明在U/Pb亏损源内 (DS) 自从3.7Ga以来，连续增加U/Pb的铅的演化。图3中曲线UC代表了参加硫化物矿床的上陆壳物质中铅的平均演化曲线。上陆壳物质的铀必定已经相对铅而富集。

从500Ma的最小年龄计算出的U/Pb值(表2)反映了为达到现有铅同位素组成而必须具备富集作用。Stacey和Kramers(1975)的平均铅演化曲线(图3中SK)从3.7Ga前迄今U/Pb=9.74。同样的数值对产生自3.7~0.5Ga前U和Pb一直是封闭的体系内最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值也是不可避免的(亚拉巴马州石山)。 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值低表明在它早期历史的主要阶段,源岩的U/bP比值基本上小于9.74,那时正以较大速度自 ^{235}U 衰变中生成 ^{207}Pb 。

在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图(图2)上,矿物矿区和卡罗来纳板岩带的块状硫化物构成了连贯的趋势。和 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 图中一样, ^{208}Pb 朝西南方向也是减少。可是石山不遵循这种趋势。这说明在石山中的铅源与弗吉尼亚州和板岩带矿石的源岩的Th/U比值不同。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 自东北到西南方向的总的减少趋势说明亏损铅源的Th/U比值低。

在地壳岩石中未观察到同位素的大范围的均化现象。目前积累的证据说明在地幔中不论是大范围的,还是小范围的,都是不均匀的(见Dawson等,1980;Dupre和Allegre,1980)。自年轻的大洋火山的铅同位素数据大都具线性特征,说明不均匀性是非随机的(Tatsumoto,1978)。通过部分熔化或热液循环阶段采集大体积的同一物质的平均效应可能达到同位素明显的均化,虽然地壳组分的混合(上、下陆壳和地幔)也能生成Doe和Zartman(1979)的铅构造就位模式的平均铅演化曲线。

在南皮德蒙特的各个时代的深成岩中均以比较原始的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值占优势(Fullagar,1971;Fullagar和Butler,1979),以及卡罗来纳板岩和夏洛特带上造山期后花岗岩内 ^{18}O 亏损(Wenner,1981)也说明存在一个面积广大且长期亏损的源区。

Vitrac等(1981)发现在北大西洋盆地周围海西期花岗质深成岩岩体中钾长石中的铅,具有斜率相当于3.8Ga的二次等时线的平均趋势线。

尽管关于所得相同结果的金斯山带矿床的二次等时线的回归文献不多,由于第二次出现,便使南阿帕拉契亚山3.7Ga等时线的真实性有所提高。

金斯山带矿床

根据350Ma锡锂辉石伟晶岩的侵入可确定南、北卡罗来纳州金斯山带的变质沉积岩和变质火山岩的年龄下限(Kish,1977)。从卡斯尔有远景脉内方铅矿的铅同位素组成可知,即使选取最小的年龄值,金斯克里克重晶石矿床和喀麦隆矿(表3)放射成因的铅也太多了,这可能反映变质作用对硫化物矿体的影响极少。这三个方铅矿虽比值不同,却得出了同样的模式年龄,大约为290Ma。而每一比值都反映了铅源物质的U/Pb值不同。当把平均模式年龄当作矿化年龄时(图2),通过这些数据点所画出一条线和Kish和Feiss(1982)关于Crowder山分析结果一致,该直线的斜度与二次等时线上的 $3.78 \pm 0.3\text{Ga}$ (2σ)的年龄一致。虽然卡斯尔远景区(石英中的黄铁矿和方铅矿)和喀麦隆(绿泥石片岩中的菱铁矿和方铅矿)是后生脉型矿床,但重晶石矿床可能是火山成因的(Sharp和Horning,1981)。金斯克里克的方铅矿和亚拉巴马石山的方铅矿一样, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值都比较亏损。尽管长英质火山作用与这些矿床共生,而且特有的石英岩和大理岩构成金斯山带大部分地层,这种亏损使其具有明显的非大陆特征(Horton和Butler,1977,1981)。

关于皮德蒙特块状硫化物所提出的上述模式也适用于金斯山带方铅矿:U/Pb亏损源与高U/Pb的土地壳物质相混合。这条线的位移可代表真实的时代差别,它也可以反映金

表 3 金斯山带矿石中方铅矿的铅同位素比值, $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$ 模式年龄, 和计算出的 $\text{U}/\text{Pb}(\mu)$ 比值

位置和样品号	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	模式年龄 (Ma)	μ
金斯克里克重晶石矿 PS-20802	18.044	15.527	37.618	288	9.69
卡斯尔远景区 YE-25A	18.203	15.584	38.020	285	9.91
喀麦隆矿 PS-21101	18.322	15.630	38.324	289	10.1

模式年龄和 μ 是按 Stacey 和 Kramers (1975) 提出的 3.7Ga 分异事件计算的。 μ 是假定矿化年龄为 400Ma 计算的。见附录中样品描述。

表 4 铅同位素比值和 $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$ 模式年龄
(北卡罗来纳的 Hamme 钨矿区; 弗吉尼亚的黄铁矿带; 和南卡罗来纳的帕格兰德和利伯蒂山深成岩的钾长石)

位置和样品号	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	模式年龄 (Ma)
北卡罗来纳州 Hamme 钨矿区: Queen 钨矿脉 PS-10701 TC-1736-3 HW-104U① HW-54U② HW-215U②	18.336 18.347 18.337 18.324 18.347	15.583 15.593 15.600 15.610 15.607	38.024 38.055 38.071 38.093 38.082	182 194 217 247 224
造山晚期花岗岩质深成岩体中的钾长石: 南卡罗来纳州帕格兰德 LG-201 南卡罗来纳州利伯蒂山 LG-101 LG-103	18.330 18.358 18.353	15.605 15.622 15.621	38.080 38.169 38.147	233 247 248
弗吉尼亚州含金黄铁矿带: 矿物山 USMNH 10832 怀特霍尔矿 USMNH 79032	18.503 18.279	15.679 15.605	38.397 38.058	255 376

① Doe 和 Zartman, 1979。

② 经美国地质调查所 B. R. Doe 的同意; M. H. Delevaux 用三带分析。

斯山带铅源中相对于铅的铀较大的富集。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图 (图 2) 上, 金斯山带数据保持了线性特征。

金斯山带变火成岩全岩的 $\text{U}-\text{Th}-\text{Pb}$ 数据证实了它是自 U/Pb 亏损源演化而来的 (Le-Huray, 未发表数据)。它们也表明金斯克里克重晶石矿中方铅矿的铅同位素特征并未由于变质作用影响而发生显著的变化。变质作用对脉和克劳德山方铅矿中铅的影响所产生的直线斜率与皮德蒙特块状硫化物的直线斜率是如此相似, 说明二者是完全一致的。据认为

脉状矿床中铅主要是来自 U/Pb 亏损源区生成的岩浆。由较多的大陆岩石铅不同程度的混染对数据的分布有所影响。

皮德蒙特其他硫化矿床

Hamme 钨矿区：Casadevall 和 Rye (1980)，Foose 等 (1980) 和 Gair (1977) 认为北卡罗来纳州 Hamme 钨矿区的石英—钨锰矿脉是变质前形成的。在 Queen 钨脉中浸染的方铅矿的铅同位素比值紧密地分布，与 Stacey 和 Kramers (1975) 生长曲线一致，但产生的模式年龄过于年轻（平均年龄为 215Ma），这是由于侵位的时代（晚前寒武纪—寒武纪）和区域变质作用（中古生代）的影响。

由于矿脉中硫化物为变质成因，这些比值可能是放射成因的。但是 Casadevall 和 Rye (1980) 发表了包括方铅矿在内的多种硫化物是变质前形成的证据。足以实现已观察到的铅同位素凝聚的均匀化作用使铅同位素具有继承的数值，可能需要重结晶而达到原始结构已经不复存在的程度。前面提到的作者也报道了硫同位素系统保留了在所有各种规模时它的热液—火成特征，氧保留了它的大气特征，而通过变质事件，碳仍保留了它的沉积有机物的性质。在这些一个系统中铅同位素系统地进行混合是不大可能的，特别在干燥变质条件下明显占优势地进行混合更是不太可能。

表 4 列举了 Hamme 钨矿区方铅矿铅同位素分析的结果。也列出了南卡罗来纳州利伯蒂山和帕格兰德深成岩体内钾长石中铅的三个新分析值。在阿帕拉契亚山南皮德蒙特所谓 300Ma 的这些和其他矿区深成岩体中的铅 (Vitrac 等, 1981; Kish 和 Feiss, 1982) 与 Hamme 方铅矿的范围（只有一处是例外）极为一致。虽然阿勒格尼期（海西期）变形作用并未向西影响到 Hamme 区，但在南皮德蒙特越来越得到承认 (Snook 等, 1980; Farrar 等, 1981)。因为，一般都认为成矿作用发生在变质作用前，而矿脉与晚前寒武纪—早古生代(?) 万斯县深成岩体的侵位密切相关 (Foose 等, 1980; Gair, 1977)，这可能是因为 Hamme 方铅矿和海西期花岗岩内钾长石的铅同位素组成是偶然的，或者正如初期 Rb—Sr 全岩分析值所表明的，深成岩体和矿脉是年轻的，且已受到阿勒格尼期变质作用的影响。

弗吉尼亚含金黄铁矿带：表 4 也包括了弗吉尼亚含金黄铁矿带的两个矿化脉中方铅矿的铅同位素比值。

含矿石英脉带从马里兰延伸到弗吉尼亚州费尔法克斯县，正好是华盛顿特区西北部，白金汉县南部，局部平行 Chopawamsic 组岩层的走向 (Pavlides 等, 1982)。矿物矿区和安德森威尔块状硫化物矿区位于含金黄铁矿带的中心。

分析铅同位素组成的两个方铅矿采自该带中部附近的 Spotsylvania 县的怀特霍尔矿及费尔法克斯县矿物山。该矿的正确位置不知道。

两地方铅矿的铅同位素比值很不一样（表 4，图 2），且似乎与矿物矿区矿铅无关。由于含金黄铁矿带具交切性质 (Pavlides 等, 1982)，以方铅矿中的铅为放射成因，说明这些矿脉比层控硫化物年轻且可能是变质成因。

蓝岭块状硫化物

赋存于上前寒武系变质沉积岩石的鸭城，丰塔纳和戈森矿区，至少与 Crossnore 深成火山群的侵位是部分同时期的；据报 Crossnore 深成火山群的 U/Pb 锆石年龄近于 800Ma