

# 经济地质

74 卷 第一期

美国

~~02725~~  
ECONOMIC GEOLOGY

and

the Bulletin of the Society of Economic Geologists



1979

(一月——二月)

地 质 出 版 社

# 经济地质

美国

ECONOMIC GEOLOGY

and

the Bulletin of the Society of Economic Geologists

1979

(一月—二月)

地质出版社

## 致 读 者

美国《经济地质》中译本试刊（原刊第74卷第1期，1979年1—2月）同读者见面了。美国《经济地质》杂志是一个有七十余年历史，为国内外地质界所熟悉，在矿床学方面享有国际声誉的刊物。为了加速实现我国地质工作的现代化，使广大地质战线的同志们能经常了解和掌握国外在矿床学各个方面的最新成果、研究方向和学术动态，作为我国地质工作的借鉴，我们准备从一九八〇年起，逐期翻译出版美国《经济地质》杂志。

《经济地质》杂志主要由论文、科学通讯、讨论和书评等几大部分的若干文章组成。这次试刊，除有关讨论的一篇文章和书评部分未翻译外，其余均保持原版的内容和格式。今后我们也准备在翻译时对科学通讯、讨论和书评等部分适当有所选择。这期试刊本是我们着手这件翻译出版工作的一个尝试，目的是向读者提供一个样本。读者对它有什么意见和建议，请写信告诉我们。

《经济地质》杂志中译本，按原刊一年出版八期（半季刊）将通过新华书店发售。需要它的读者，请向新华书店预定，或向地质出版社邮购组购买（北京安德路47号地质印刷厂内）。

美国《经济地质》中译本编辑部

### 美国《经济地质》

中译本、半季一期

1979年1月—2月

74卷 第1期

统一书号：15038·新540 定价：1.00元

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$  印张：9.25 插页1个 字数：222,000

编辑者：美国《经济地质》中译本编辑部  
出版者：地质出版社  
(北京西四)

印刷者：地质印刷厂  
(北京安德路47号)

发行者：新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售

158-14

# 目 录

科罗拉多州西南部 San Juan 火山岩区矿床的成因—铅同位素证据 B. R. Doe, T. A. Steven, M. H. Delevaux, J. S. Stacey, P. W. Lipman, F. S. Fisher .....	(1)
南非Klerksdorp金矿田上 Witwatersrand 系与 Ventersdorp 系中金的形态及含银量 T. Utter.....	(23)
格陵兰西部早前寒武纪 Isua 上地壳带一个条带状含铁建造及玄武质凝灰岩中的层控铜硫化物 Peter W. Uitterdijk Appel .....	(35)
San Leone 磁铁矿夕卡岩矿床的岩石学 (撒丁岛西南部) J. Verkaeren 和 P. Bartholome .....	(43)
澳大利亚新南威尔士 Yeoval 附近与一多孔岩墙相伴的蚀变和矿化作用 Edward P. Ambler .....	(56)
前寒武纪 Ijil 群条带状含铁建造 (毛里塔尼亚 Reguibat 地盾 Kediat Ijil 地区) G. Bronner 和 J. J. Chauvel .....	(65)
墨西哥奇瓦瓦地区 Naica 矿中不同组成的含盐热液溶液 Robin J. Erwood, Stephen F. Kesler 和 Paul L. Cloke.....	(79)
沸腾环境中矿物沉淀的实验室研究 C. H. Sondergeld 和 D. L. Turcotte .....	(92)
从扫描电镜图像看正长岩和辉绿岩的铝土化 W. D. Keller.....	(98)
科学通讯	
不列颠哥伦比亚 Cariboo-Bell 斑岩铜—金矿床火山泥流角砾岩中经过搬运的蚀变围岩 D. G. Bailey 和 C. Jay Hodgson .....	(101)
智利 Disputada 钼矿中岩石的总同位素组成 Martin Halpern .....	(105)
北美大陆中部密苏里和堪萨斯宾夕法尼亚系黑色页岩中的闪锌矿富集体 Raymond M. Coveney, Jr.....	(107)
澳大利亚西部 Redross Fe-Ni 硫化物矿石的实验性加热和扩散影响 K. G. McQueen.....	(116)
密苏里州东南新铅带内密西西比河谷型矿床中方铅矿的铅和硫同位素组成 Dimitri A. Sverjensky, Danny M. Rye 和 Bruce R. Doe .....	(124)
讨 论	
上纽约州 Lockport 白云岩内如汽液包裹体研究所表明的, 萤石的生成温度, 兼论其热源——讨论 S. J. Haynes 和 M. A. Mostaghel .....	(129)
上纽约州 Lockport 白云岩内如汽液包裹体研究所表明的, 萤石的生成温度, 兼论其热源——对讨论的答复 Gary Kinsland.....	(134)

# 科罗拉多州西南部San Juan火山岩区 矿床的成因—铅同位素证据

B. R. Doe, T. A. Steven,  
M. H. Delevaux, J. S. Stacey,  
P. W. Lipman, P. S. Fisher

## 摘 要

在科罗拉多州西南部 San Juan 火山岩区, 新生代矿石及勘探区的铅同位素组成变化很大,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 17.72~21.13,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 15.50~15.81 而  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 37.21~38。对铅同位素数据的研究表明, 一旦铅矿物开始沉淀, 成矿流体与围岩间的铅同位素进一步交换作用就变得很弱。其证据是矿石铅同位素组成相对稳定, 不受矿化程度和围岩种类的影响。有些脉状矿床的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值超过了落矶山区域的中、新生代火成岩的极大值。这些同位素关系表明, 如果成矿溶液由雨水组成 (如轻稳定同位素研究所指出), 则这些溶液一定曾经渗入相当深的地方, 从而由前寒武系岩石及其衍生的沉积物中取得铅。有些矿脉产在新生代火成岩中, 说明成矿流体有过向上运动。因此, 铅同位素数据支持这些矿石由循环系统形成的假说, 正如最近对矿床的轻稳定同位素研究所表明的那样。

另外有些矿床 (Samnitville, Jasper, Red Mountain 区),  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值与大量蚀变围岩的铅同位素比值相近 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  近于 18.5)。这说明有些地方的铅可能由邻近的岩石中淋滤出, 或来自岩浆流体。

对铅同位素数据细加分析可以看出, 在 Platoro 破火山口杂岩, San Juan 中部杂岩及 Baughman Creek 中心, 岩石与方铅矿的铅看来主要来自年龄为 14~15 亿年及 17~18 亿年的原始物质。在 San Juan 火山岩区, 这两组年龄恰好是构成前寒武系基底的两组主要岩石的年龄。虽然西 San Juan 破火山口杂岩的数据相当分散, 但其中的铅显然来自年龄 17—18 亿年的岩石及其在显生代沉积物中的岩屑。在年龄 14~15 亿年的岩石影响最大的地方, 原始物质的 Th/U 比很小 (经计算约为 0.7), 而在年龄为 17~18 亿年的原始物质中, Th/U 比似为 2.3~3.3。最高的 Th/U 比值出现于西 San Juan 破火山口杂岩中。

## 前 言

为确定 San Juan 火山岩区 (科罗拉多州西南部, 图 1) 火山岩成因和许多重要矿区的金属来源, 对该区的岩石和矿石的铅同位素进行了研究。对火山岩铅同位素的研究结果已在别处报导 (Lipman 等 1978), 本文重点讨论矿石的铅同位素。对中 San Juan 山区 Creede 地区矿石的初步分析对本研究有所推动。而该地区的矿床原来以为是岩浆成因流体形成的, 结果却发现它们比落矶山的任何中、新生代火成岩样品都富含放射性成因铅。因此, 原先就认识到这些矿石含有大量的非岩浆铅, 它们可能来自各种下伏岩石 (Doe 等, 1968)。

现在, 大量补充数据证实了这一总的结论, 并且认为: San Juan 山区的矿石铅很大一部分是由可能为岩浆热所驱动的对流系统中深部循环的雨水携带出来, 其中可能含有, 也可能不含岩浆来源的金属组分

或阴离子 (岩浆热液矿石)。Taylor (1974) 最近对这一概念作了详细的评述; Bethke 等 (1973), Steven 和 Eaton (1975) 将这一概念应用于 Creede 地区的矿石, 而 Casaderra 和 Ohmoto (1977) 将其应用于 Eureka 地区的矿石。Forester 和 Taylor (1972) 就西 San Juan 的 Stony 岩株, Taylor (1974, p. 867) 就东 San Juan 的 Alamosa Creek 岩株证实了雨水与正在冷却的侵入体之间的相互作用 (图 5)。

San Juan 山区的矿石属于典型的复合脉, 含有不同量的金、银、铜、铅和锌的混合物。大多数矿脉形成于破火山环境, 沉淀于破火山口沉陷时产生的断裂之中。但也有些矿脉在有关破火山口进一步发展时沉淀, 其形成要晚得多, 与岩浆作用无关 (Steven 等 1974 a; Lipman 等 1970)。从科罗拉多州 Ouray 附近的晚白垩世火山中心的沉积岩中已开采了一些交代矿石, 在主矿脉之下的始新世 Telluride 砾岩组中也开采到一些交代矿石。这些主矿脉切穿了科罗拉多州

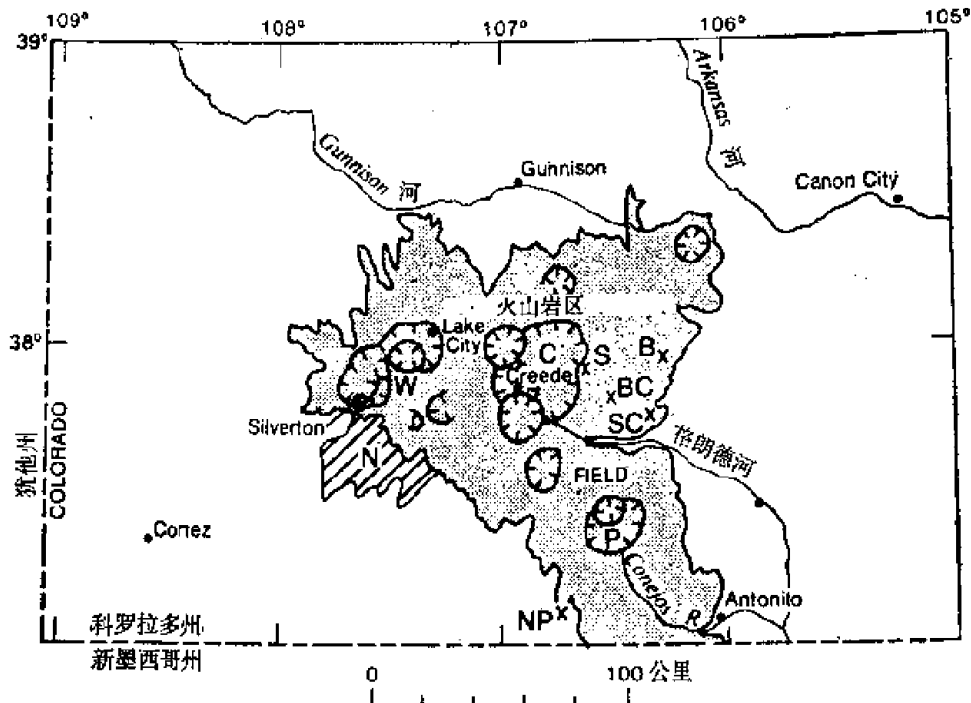


图 1 科罗拉多州东南部略图

表示 San Juan 火山岩田的轮廓, Needle 山区(N), Platoro(P), 中部(C)和西部(W)破火山口杂岩。采集了方铅矿样品的早期中性火山岩中心(X)有: Beidel 中心(B), Sky City 中心(S), Baaghman Creek 中心(BC), Summer Coon 中心(SC), 以及 Navaio Peak 中心(NP)

Telluride 东北部的中第三纪火山岩, 还知道一些“斑岩铜矿”型矿床, 但直到 1976 年仍未证实它们有经济价值。

迄今(到 1976 年) San Juan 山区的许多矿山已生产了价值约十亿美元的矿石(按开采时的金属价值)。其中大部分采自西 San Juan 地区, 火山岩区的中部和东部产出了不到两亿美元的矿石, 而其中四分之三采自岩区中心附近的 Creede 地区。

Lipman 等(1970)对 San Juan 山区(科罗拉多)的火山作用历史作了总的概括。Steven 和 Ratte(1960, 1965)以及 Steven(1968)对 San Juan 山区的中部和东南部的火山岩区的不同部分的经济地质作了讨论, 而 Burbank 和 Luedke(1968, 1969)对 San Juan 山区西部的经济地质作了讨论。这些文章包含有前人对该区进行研究的有关文献的广泛目录。有几篇报告对东南 San Juan 山区的 Platoro 破火山口杂岩(Lipman 和 Steven, 1970; Lipman, 1975 b), 中部的 Creede 地区(Steven 和 Eaton, 1975), 以及西部地区(Lipman 等 1973, 1976; Lipman, 1976 a, 1976 b; Steven 等, 1977)作了较新的讨论。

已有许多文章对用铅同位素作放射性示踪剂的理论和应用作了评论, 此处不再赘述。Russell 与 Far-

quhar(1960), Kanasewich(1968), Stacey 等(1968), Doe(1970), Russell(1972), Gale 和 Mussett(1973)和 Doe 与 Stacey(1974)对方法作了讨论。

与美国地质调查所进行的广泛的地质、地球物理和地球化学研究相配合, 对 San Juan 山区断续进行了 15 年的铅同位素研究。P. M. Bethke, P. B. Barton Jr 等人曾对 San Juan 中部 Creede 地区的矿物学、地球化学及矿石沉淀环境等作过详细研究, 与他们交流数据和进行讨论对于铅同位素研究特别有益。本刊曾有一系列文章报导 Creede 地区的工作(Steven 和 Eaton, 1975; Bethke 等, 1976; Barton 等, 1977 等)。严格说来, 这篇文章不应算做此系列文章的一部分, 因为它涉及整个 San Juan 区域, 但是可以认为它属于同类。

## 火山作用历史

科罗拉多州东南部的 San Juan 山区(图 1)主要由中、上第三纪的火山岩区构成。火山岩区覆盖在变形的前寒武系结晶岩和古生界、中生界及下第三系沉积岩的侵蚀面上(Lipman 等, 1970)。少数为局部火山岩区环绕的分散的火成中心侵位于晚白垩世和早第三纪(?) (据 Dickinson 等, 1968), 但在渐新世

早期主要火山活动发生之前已受到很深的侵蚀。

中第三纪火山活动期间最先喷发的基本上为安山质熔岩及角砾岩。它们由许多很分散的中央通道式火山及火山群所喷发，其火山碎屑堆积物形成一个广阔的岩区，覆盖着南部落矶山区的大部分地区 (Steven 和 Epis, 1968; Steven, 1975)。这些早期中性岩石至少构成了为 San Juan 现在的残余物所代表的岩区的三分之二，它们主要是在 3500 万年前—3000 万年前喷发的 (Lipman 等, 1970)。

大约由 3000 万年前开始，一个较大的岩基开始向上侵入浅部 (Plouffe 和 Pakiser, 1972)。由岩基上部分异较好的部分喷出的东西形成分布很广的石英粗安质和流纹质灰一流凝灰岩席的堆积 (Lipman 等 1970)。由于喷出大量的火山碎屑，这些凝灰岩的源区重复下陷，从而在 San Juan 东南部 (Platoro 破火山口杂岩)，Creede 附近 (中央破火山口杂岩) 及 Silverton 与 Lake City 之间 (西破火山口杂岩) 形成一些破火山口杂岩 (Caldera complexes) (Steven 和 Lipman, 1976)。同时，由分散的火山喷出的安山质熔岩及角砾岩充填到某些较早的破火山口之中；而与灰一流凝灰岩有关的粘性富硅质的熔岩挤进较晚的破火山口中或其附近。主要的灰一流喷发和破火山口沉陷大部发生在 3000 万年前到 2600 万年前。

在中新世早晚，即 2600 万年前到 2300 万年前，火山作用明显地由安山质的及其衍生的岩石变为玄武质及高硅碱性流纹岩的双模式组合为主 (Lipman 等 1970)。在第三纪的剩余期间发生周期性喷发，在老的中心火山岩及富硅质灰流凝灰岩席的组合之上，铺上了这种玄武质和流纹质岩石的薄层。2250 万年前，在西 Lake City 破火山口的一次喷发形成了一个属双模式组合的巨大流纹质灰一流凝灰岩席 (Lipman 等, 1973; Mehnert 等, 1973a)。

在有些早期中性火山岩核心中，有微弱的矿化发生，这种矿化的时代可能与这种火山活动期接近；比较重要的矿化则在灰一流喷发的晚期，发生于某些破火山口杂岩的周围，有几次矿化发生在双模式玄武岩一流纹岩喷发期间。破火山口周围的矿化似乎与渐新世灰一流凝灰岩喷发时局部的多次侵位的二长岩侵入体有关，并且与晚期双模式喷发时的富硅质侵入体有关 (Steven 等, 1974; Lipman 等 1976)。

### 可能在深部的岩石

San Juan 火山岩区下伏的潜火山地区主要由年龄为 17—18 亿年和 14—15 亿年的前寒武纪变质岩和火成岩混合组成，它们在许多地方为一个沉积岩帽所

覆盖，并且被一个较大的第三纪岩基所切割。这个岩基是与上覆的许多火山岩相对应的侵入产物。沿着火山岩堆积北边的一个寒武纪局部碱性铁镁质碳酸盐岩火成中心附近有许多含异常高含量钍和稀土元素的脉状矿床。在 San Juan 火山堆积东北边 50 公里处的 Wet 山区也有年龄大约相同的类似火成中心和脉 (Olson 等, 1977)。拉拉米期 (晚白垩世和早第三纪) 的侵入中心及某些同期的外围火山岩呈走向北东的带出露，由 La Plata 山区经 Rico 和 Ouray，沿着第三纪火山岩堆积的西沿和西北边沿，延伸到 Cimarron 地区 (Dickinson 等, 1968, P126—127)。在现为火山岩覆盖的大多数地区，都无法估计上述不同岩石组合或其中任一种岩石在一定深度的分布范围。

### 前寒武纪岩石

科罗拉多州西南部的寒武纪地区，由成分与年龄不同的变质岩与深成火成岩混合组成。大多数岩石要么属于 16.7—18 亿年的火成岩与变质岩杂岩体，要么属于 13.5—14.7 亿年的较年轻的花岗岩 (Silver 和 Barker, 1968; Bickford 等, 1969)。

在 San Juan 火山岩区西南边的 Needle 山区 (Barker, 1969)，石英质的 Vallecito 砾岩及主要为变火山岩的 Irving 组和 Twilight 片麻岩强烈地变形，变质为闪岩相，并且为年龄约 17.2 亿年的深成花岗岩体所侵入。较老的岩石局部地为 Uncompahgre 组的互层状石英岩和黑色黄铁矿板岩 (及变质较深的相当物) 所覆盖。在局部地方，这些板岩具异常高的放射性。所有这些前寒武系岩石均被年龄约 14.6 亿年的 Eolus 花岗岩及有关侵入岩所切割。

在 Needle 山区北边的西 San Juan 火山岩区，到处散布着高级变质岩 (与 Needle 山区年龄 16.7—18 亿年的 Uncompahgre 组石英岩和板岩类似) 及花岗岩 (类似于年龄 14.6 亿年的 Eolus 花岗岩) 的露头 (Steven 等, 1974b; Lipman 1976b)。沿着 San Juan 火山岩区北侧也广泛出露类似年龄的变质岩和花岗岩 (Hansen, 1971; Hedlund 和 Olson, 1973, 1974, 1975; Olson, 1974, 1976a, 1976b; Olson 和 Hedlund, 1973; Olson 和 Steven, 1975, 1976a, 1976b)。在东南 San Juan 山区唯一出露的前寒武系岩石是由 Antonito (科罗拉多) 往西 25—30 公里，在 Conejos 河下部峡谷中出现的一个几百米宽度的前寒武纪花岗岩露头 (Lipman, 1975a)。Barker 和 Friedman (1974) 曾报导过，在新墨西哥州北部 Tusas 山区，在 Conejos 河露头以南 40—80 公里的地方，高级变火山岩为花岗岩侵入体切割，变质岩及火成岩

的放射性年龄均在17—18亿年之间。可能存在某些年龄为14—15亿年的较年轻花岗岩体,但现在尚未发现(Fred Barker, 口头告知1974)。

### 寒武纪碱性及铁镁质岩石和有关岩脉

大约5.7亿年前, San Juan 山区北缘是寒武纪碱性和铁镁质岩浆作用的场所(Olson等, 1977)。如Olson等(1977)所总结的,最强烈的活动发生在Gunnison(科罗拉多州)南南西方向40公里的Powderhorn地区,那里侵入了一个面积达30平方公里的由铁镁质到长英质碱性岩石和碳酸盐岩的杂岩体(iron Hill 碱性杂岩体)。在杂岩岩周围30公里或者更远的地方, 沉淀着有关的含铯脉。由Powderhorn地区往西延伸超过50公里,在前寒纪岩石的断裂中侵入有拉斑玄武岩质的年龄稍轻的辉绿岩及辉长岩墙。

在Powderhorn地区以东135公里处的Wet山区,类似的岩石和岩脉(但年轻5000万年)形成三个杂岩体。在中间的地区已经发现局部有关的脉出露。

考虑到这些岩石和脉分布局限、体积很小,很难想象它们会成为San Juan山区中任何一个矿化区域之下的基底的重要组成部分。但另一方面,也不能忽视它们的存在。

### 古生代和中生代沉积岩

San Juan 火山岩区沿着晚古生代的Uncompahgre—San Luis高地的山脊分布,这里最早古生代沉积岩在中生代沉积之前大都剥蚀掉了。仅仅在火山岩区的西部,证实在火山岩之下有古生代沉积岩(Luedke和Burbank 1962; Steven等1974b)。现在在前寒武纪结晶岩与第三纪火山岩之间存在的沉积岩大多为侏罗系或白垩系。在第三纪早期,这些中生代岩石从拉拉米的Needle山区隆起大量被侵蚀掉;而在西San Juan山区,中第三纪火山岩大面积地直接覆盖在前寒武系岩石上。

由Needle山区到新墨西哥,在火山岩区之西南端,下伏有很厚的中生代沉积岩,但在火山岩区之北侧,相应岩石的厚度仅为0—600米。对这些区域之间,火山岩盖层之下沉积层的分布很难推断,虽然Steven和Friedman(1968)提出,在中San Juan山区的Creede地区必然下伏有沉积岩,它们为渐新世晚期Creede组中丰富的石灰华提供碳酸盐。

在San Juan山区东南部,在Platoro破火山口杂岩以西约5公里,有白垩系页岩(Steven等,

1974b; Lipman, 1974)。看来,至少在Platoro杂岩的西部,或许在整个地区之下,有沉积岩层。

### 晚白垩世和早第三纪火成中心

沿着San Juan山区的西部及西北部边缘分布着一个晚白垩世和早第三纪(拉拉米期)的火成中心带,带的走向北东,与科罗拉多矿化带的走向大体相同(Tweto 1975, P21—25)。这些中心包括Durango(科罗拉多)西北20公里处的La Plata山区(Eckel, 1949), Telluride(科罗拉多)西南30公里的Rico(McKnight, 1974),以及Ouray(科罗拉多)附近(Burbank, 1940; Luedke和Burbank, 1962)的岩盖、岩株、岩盘和岩墙。在别的地方,它们仅为孤立的岩颈、岩墙和岩盘。由被侵蚀的火山(它们曾经覆盖在这些中心之上)来的,经过再造的火山碎屑,构成San Juan山区南部始新统和上白垩统Aninas组的一个显著的岩相。Dickinson等(1968)曾将该带东北部的同期火山堆积残余物描述为Cimarron Ridge组,其年龄大致定为6600万年。如Burbank(1940)所提出,而为Steven等(1977)所重新强调的那样,Ouray附近的拉拉米期中心的东部在邻近的第三纪火山盖层之下延伸了一段距离,但多远还不清楚。

在沉积岩中呈脉状和交代体出现的贱金属和贵金属的主要矿床都与La Plata, Rico和Ouray的火山中心有关。

已经知道,在San Juan西北山区,拉拉米火成活动期间,侵位于已知火成中心的侵入岩及火山岩和有关矿床延伸到了某些中第三纪火山岩之下(Steven等, 1977)。其它地方,在火山盖层之下特别是邻近已知拉拉米火山中心的延伸线的地方也可能有完全隐伏的同样年龄的岩石和矿石。

### 第三纪侵入岩

有一个明显的低重力区,其边缘梯度很大,与中San Juan火山岩区相吻合。曾有人提出这个低重力区反映一个100—150公里宽的第三纪岩基(Plouff和Pakiser, 1972)。这个岩基明显地是在渐新世,当灰一流喷发及有关破火山口沉陷时,上升到浅部的(Steven, 1975; Steven和Lipman, 1976)。Platoro破火山口杂岩正好在低重力区东南端陡梯度带的外侧,即正好在假定的主要岩基之外侧。破火山口杂岩之下可能有一个附属的深成岩体,代表破火山口下陷时形成的岩浆室。中和西San Juan破火山口杂岩都在主要低重力区上,因此在假设的主要岩基之上。

表 1 与新生代中性火山岩有关矿床中的方铅矿

样品号	野外编号	质谱方法	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿区或勘探区名称
San Juan 山区东部 Crystal Hill 火成中心 岩筒矿化						
1	CH-14	MTHYL	17.725	15.502	37.366	沿着 Biedell Creek 地表
2	CH <sub>9</sub> B-E	PbS	17.99	15.50	37.31	Crystal Hill 矿山
3	CH <sub>10</sub> B	PbS	18.02	15.55	37.50	Crystal Hill 矿山之 Glory Hole
San Juan 山区东部 Skg City 火成中心						
4	SKC <sub>1</sub> B	TE	18.478	15.568	37.815	未名露头裂隙充填
San Juan 山区东部 Summer Coon 火成中心						
5	SC <sub>10</sub> B	TE	18.251	15.547	38.132	Windress 矿井废石堆
San Juan 山区东部 Baughman 区域 Embargo 地区						
6	WHP(86SD-2)	MTHYL	19.686	15.687	38.041	Weaver Hosselkas 勘探区
7	EM40	MTHYL	19.954	15.708	38.012	Leonard 坑
8	EM60	TE	21.134	15.806	38.366	Tornado 井

注：质谱分析一项中，TE 指三带源热发射，MTHYL 指四甲基铅电子轰击气体源发射，PbS 指 PbS-NH<sub>4</sub>OH 表面发射。所有比值均校正为绝对值。

表 2 San Juan 山区东南部与 Platoro 破火山口杂岩体有关矿床中之方铅矿

样品号	野外编号	质谱分析方法	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿区或勘探处名称
Summitville 地区，强烈蚀变岩石中之交代脉						
9	71L-55	TE	17.821	15.521	37.209	
10	64DS-1	MTHYL	17.810	15.523	37.213	Reynolds 坑道
11	64DS-2	PbS	17.79	15.46	37.00	Narrow Gauge
Jasper 地区，强蚀变岩石中之弱脉						
12	ST <sub>1</sub> S <sub>7</sub>	MTHYL	18.112	15.546	37.574	Miser 矿山
Crater 地区，脉状矿化						
13	KC 28	TE	18.925	15.625	37.853	未名露头

注：在质谱分析方法一栏中，TE 指三带源热发射，MTHYL 指四甲基铅电子轰击气体源发射，PbS 指 PbS-NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 表面发射。所有 W 值均校正为绝对值。

在说明这个岩体对上覆火山岩及有关矿床铅同位素组成的影响时，应当考虑到设想的岩体顶部的深度。Plouff 和 Pakiser (1972, P. B186—B187) 沿着一个南—北剖面，根据重力数据计算出这个深度为 2—8 公里，根据磁法数据算出为 3—7 公里。这些计算依据的是假设的密度反差 (density contrasts) 和磁化率，因此计算结果不代表唯一的解，但是岩基的顶部似乎较浅。这个顶部一定是相当不规则的，有许多伸入上覆火山岩的岩钟，构成整个火山岩区广泛出现的局部岩株。许多破火山口的再生核心必定是其它巨大岩钟的地表显示。

### 分析方法

采用了三种不同的方法测量各种方铅矿样品的铅同位素组成，它们是：PbS-NH<sub>4</sub>OH 表面发射法、四甲基铅电子轰击法和三带源热发射法。以 Caltech Shelf 铅、UBC-1 或 NBS 981 作付标准，将所有数据校正为绝对比值。标准的绝对比值参照国家标准局的数据 (Catanzaro 1967; Catanzaro 等, 1968)。这里报导的比值是两次或三次质谱分析的平均值。数据用放大的比例记录在质谱图形记录器上，然后手算。一个  $\sigma$  的实验误差为：

方 法	误 差 (比值的百分数)		
	$^{205}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
PbS $\text{NH}_4\text{OH}$	0.27	0.40	0.54
四甲基铅 <sup>1</sup>	0.1	0.1	0.1
三带源 <sup>2</sup>	0.05	0.05	0.05

注: 1—包括样品相互粘污引起的分析偏差。  
2—长期效应表明取26可能更合适。

用 York (1969)的方法作了线性拟合回归线, 误差为一个  $\sigma$ 。计算矿石样品时, 只用四甲基铅法和三带源法数据。在使用 Lipman 等 (1978) 的岩石数据时, 只用硅胶法获得的数据。利用回归线计算 Th/U 比值需要选定一个“年龄”, 但选择的年龄对 Th/U 比值影响很小, 因此任意地定为10亿年。虽然算出的回归线与目估的很接近, 但计算误差似乎过高。尽管如此, 此处仍保留这些误差, 因为它们彼此之间似有正比关系。

### 铅同位素数据

对主要取自矿床, 少数取自勘探区的方铅矿样品的铅同位素组成与三个广阔的地层层序的关系作了讨

论 (Lipman 等, 1970)。这三个地层层序是: 1) 早期中性熔岩及角砾岩, 2) 晚期灰一流凝灰岩席及有关破火山口, 3) 玄武一流纹质双模式组合的后期熔岩及侵入岩。方铅矿的同位素组成各处不同, 下面以东南 San Juan 山区的 Platoro 破火山口杂岩, 中 San Juan 破火山口杂岩以及西 San Juan 破火山口杂岩为例进行讨论。

San Juan 火山岩区方铅矿的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (铀铅) 比为 17.7—21.1,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (钍铅) 比为 37.2—38.5 (表1—4, 图2)。含铀铅最多的方铅矿产在年龄大于3000万年的早期中性火山中心, 而含钍铅最多的矿石与年龄小于3000万年的破火山口杂岩有关(图2)。放射性成因铅最少的方铅矿与新生代火成岩附近的铅

表 3 中 San Juan 山区, 与中 San Juan 破火山口杂岩有关矿床的方铅矿

样品号	野外编号	质谱方法	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿山或勘探区名称
Crescde 地 区						
14	GS682-62	TE	19.047	15.623	37.884	Amethyst 脉5水平
15	PBB159-59	PbS	19.03	15.59	37.77	Holy Moses 2 Winze Solomon-Holy Moses 脉
16	PBB83-59 (GS685-62)	PbS	19.01	15.56	37.68	Volunteer 南15英尺, 西北向 横坑OH脉
17	PBB0-51 (GS684-62)	MTHYL	19.038	15.638	37.886	8号上山附近近OH脉5水平
18	PBB1-59 (GS683-62)	PbS	19.05	15.64	37.94	Sybil Winze 之 OH 脉底部, 5水平
19	66SD-1	PbS	19.03	15.62	37.85	Bulldog 山之 Puzzel 脉
20	66SD-4	TE	18.847	15.617	37.942	Monon Hill 矿山 Silver Horde 坑道的交代矿石
20A	PHW-E-75	TE	18.816	15.612	37.967	Kreutzer-Sonata 矿山废石堆
21	66SD-5	PbS	18.86	15.63	37.96	Monon Hill 矿山下面的脉
Spar City 地 区						
22	65SD-1	TE		15.626	38.018	Emma 矿山废石堆
Bondholder 地 区						
23	66SD-3	TE		15.641	37.906	Cascade 勘探区

注: 在质谱法一栏中 TE 指三带源热发射, MTHYL 指四甲基铅电子轰击气体源, PbS 指 PbS-NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 表面发射。所有比值均校正为绝对值。

相似，但是处于铀铅端的方铅矿的比值比整个落矶山区任何中、新代火成岩的比值都要高得多（数据见 Doe, 1970）。

Doe(1968)曾报导过 San Juan 的方铅矿同位素数据，得出一条原始物质年龄约 15.9 亿年的二次 Pb/Pb 等时线。此年龄介于两种常见基岩年龄（17—18 亿年及 14—15 亿年）之间。用四甲基铅法和三带源

某些从年龄 17.5 亿年和 14.5 亿年地壳岩石中取得大量铅的第三纪火成岩，如 Lipman 等（1978）所提出的那样。

氢和氧同位素数据表明：成矿流体由雨水形成。因此，矿石常较有关火山岩更富放射性成因铅的现象意味着：在这些成矿流体（分布局限，浓度较大）上升到浅部并沉淀矿石之前，它们一定曾经达到很湿

续表

样品号	野外编号	质谱方法	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	矿山或勘探区
37	74FD-1	TE	18.616	15.582	38.198	Camp Bird 矿山
38	?	MTHYL	18.895	15.631	38.337	Revenue 矿山
39	?	TE	18.749	15.608	37.962	Portland 矿山
40	HMO-2	TF	18.449	15.580	38.060	与 Du more 矿山筒状矿床有关的脉产在第三纪火山岩之下的前寒武岩石中
41	HMO-1	TE	18.472	15.584	38.027	与 Michael Breen 脉状矿床有关之脉在前寒武纪地层之上约100—200英尺在第三纪岩石中
Red Mountain 地区, 筒状矿床						
42	HMO-4	TE	18.414	15.582	38.076	Carbonate king 矿山之筒状矿床
43	44DV66F	MTHYL	18.481	15.586	38.130	Lark 矿山之筒状矿床。
44	74FD-1	TE	18.495	15.571	38.140	National Belle 矿山之筒状矿床
45	44DV17	TE	18.524	15.590	38.178	St Paul 矿山之筒状矿床
各种砂卡岩矿床						
46	46DV39	TE	18.498	15.595	38.056	邻近 Sultan Mountain 岩株的 Marcella 矿山的砂卡岩矿床
与 Lake City 破火山口有关之脉状矿床						
47	72SLD-1	TE	19.078	15.643	38.533	Golden Fleece 矿山, 较低主水平之废石堆
48	72SLD-2	TE	19.079	15.643	38.532	Golden Fleece 矿山, 较高主水平废石堆
49	72LD-3	TE	18.404	15.583	38.101	Golden Wonder 矿山, 脉状矿床废石堆
50	72L96-7	TE	18.815	15.612	38.350	Alpine Gulch 之勘探区
51	72LD-2	TE	18.843	15.617	38.420	Capital City 地区 Czar 矿山
Ouray 附近 Laramide 矿化						
52	?	PbS	18.69	15.61	38.42	Laramide 岩株中 Bachelor 矿山
53	HMO-3	TE	18.676	15.601	38.372	灰岩中之 Pony Express 矿山

注: 在质谱方法一栏中 TE 指三带源热发射, MTHYL 指四甲基铅电子轰击气体源 PbS 指 PbS-NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 表面发射, 所有比值均校正为绝对值。

很弱。而铅一开始沉淀为矿床的一个主要矿物相, 就不再交换, 因为铅矿脉的铅同位素组成与围岩种类无关 (特别见表 4)。

San Juan 的岩石和矿石中的铅同位素组成有一些分散 (图 2)。为了区别分散的原因, 在图上划了几条任意的, 但在地质上合理的趋势线。在只涉及铀铅的图上划了两条斜率 0.1045 的平行趋势线, 相当于来自下伏的较老前寒武系地块中年龄为 17 亿年的来源物质所衍生的近代矿化。上面的线通过 San Juan 山区矿石和岩石中, 相对一定  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值最高的各样品点。下线平行于上线, 恰好使 San

Juan 山区的全部数据都落在两线之间。数据点在两平行线之间呈一个细长的条带分布 (图 2), 表明任意划定的边界有地质意义。因此两边界线限定的区间内的样品含有估计年龄为 17—18 亿年的原始物质中的组分。为方便起见, 我们将这样处理, 虽然其中也可能包含其它年龄的物质的数据。例如, 在这个区间中的虚线连结 San Juan 山区一个年龄 14—15 亿年的花岗岩的全岩和长石的分析数据, 所有在最近来自这一岩石的铅的数据都应沿着这条线分布。数据是 Lipman (1978) 得出的, 他算出等时线年龄为 14.6 亿年, 代表前寒武基底中两大已知地区中的年轻者。

亚利桑那州 Jerome-Prescott-Bagdad 地区, 新墨西哥 Pecos 地区, 科罗拉多 Peak Range 地区年龄为 17—18 亿年的块状硫化物的同位素组成证实了边界线为于 17—18 亿年岩石的地质合理性 (Stacey 等 1976 报告), 情况见图 2。这些矿床与其火山围岩明显是同

期火成活动 (17—18 亿年前) 的结果。因此矿石的铅同位素组成应接近于赋存岩石的原始组成, 由此对 San Juan 火山岩区下伏的最老的前寒武地区中某些物质的原始铅同位素组成可作出估计。

在铀铅图上 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  对  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ), 二次等

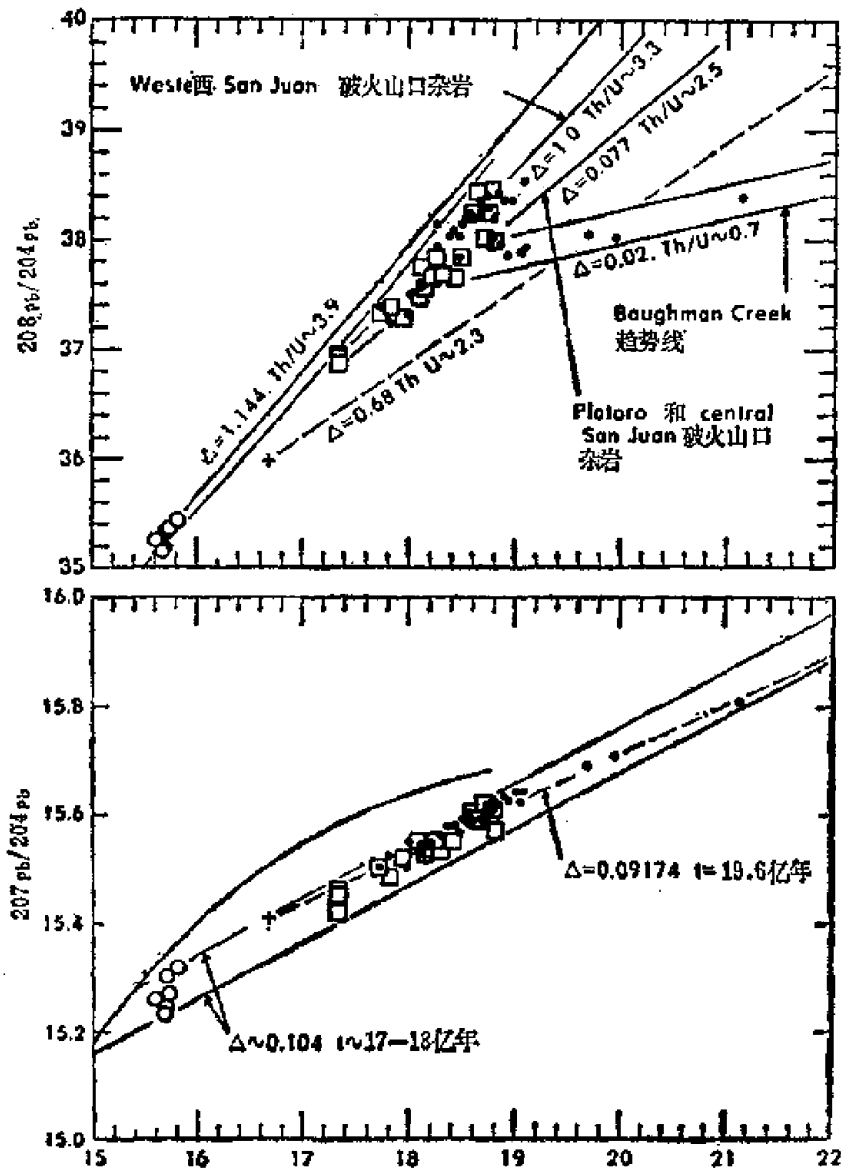


图 2  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  及  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  与  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  之关系图

(●) 表示所有方铅矿, (□) 表示新生代火成岩中氧化硅胶 (据 Lipman 等 1978), (+) 表示与年龄 14—15 亿年的 Eolus 花岗岩有关岩石的长石, (○) 表示亚利桑那与新墨西哥 (Stacey 等 1976) 以及科罗拉多 (Antweiler 等 1972) 年龄 17—18 亿年的块状硫化物之现代值。实曲线为 Stacey 和 Kramers (1975) 的铅同位素演化线。在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  与  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  关系图上 (铀铅图), 加标记的实线表示原始物质年龄为 17—18 亿年时予计的情况, 虚线表示与 Eolus 花岗岩有关的长石、全岩等时线 (全岩数据未标出)。在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  与  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  关系图上 (含铀铅图), 最大的 Th/u 比计算值为 3.9, 对应的实直线是年龄 17—18 亿年之块状硫化物和年龄近 18 亿年之爱达荷 Springs 组岩石的 HCl 溶出铅的连线 (数据按 Lipman 等 1978)。虚线相应的 Th/u 比近 2.3, 它代表年龄 14.5 亿年的与 Eolus 花岗岩相当之岩石。该虚线连接长石铅 (+) 和全岩数据 (全岩值图上未标)。西 San Juan 破火山口杂岩的新生代火成岩的 Th/u 比计算值为约 3.3; 中 San Juan, Platoro 破火山口杂岩及中新世和上新世 Hinsdale 组的 Th/u 比计算值约 2.5; 由 Baughman Creek 中心采的三个方铅矿数据计算的 Th/U 比约为 0.7, 相应线是所谓 “Baughman Creek 趋势线”

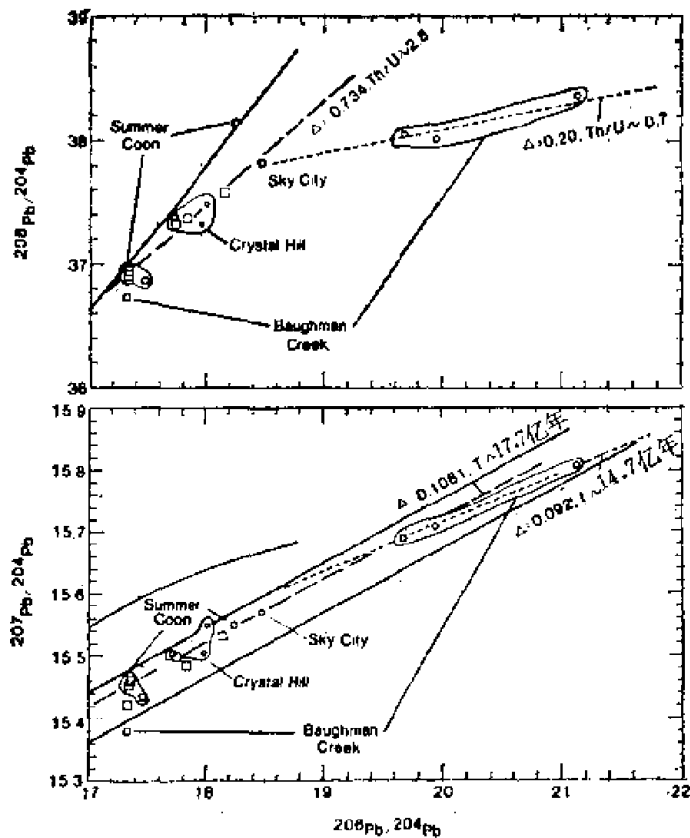


图 3 早期中性岩组合的矿石和火山岩之 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图

实曲线表示 Stacey 和 Kramers (1975) 的铅同位素演化线。在铀铅图上 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  对  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) 实线表示与 17—18 亿年之原始物质所对应的组成范围。短虚线为“Baughman Creek 趋势线”。长虚线是 York (1969) 对最好的数据求出的回归线；(□) 为火成岩中之氧化硅数据，(○) 为用三带源或四甲基铅法求得的方铅矿数据。较小的符号表示用 PbS— $\text{NH}_4\text{NO}_3$  法得到的精确度较低的数据，在计算中未使用。在包含钍铅的图上，对长虚线计算斜率和 Th/u 比时抛开了 Baughman Creek 和 Summer Coon 火成中心的方铅矿数据

(下转第 11 页)

图 4 San Juan 山区早期中性岩石组合及某些特定区域的岩石和矿石之 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图

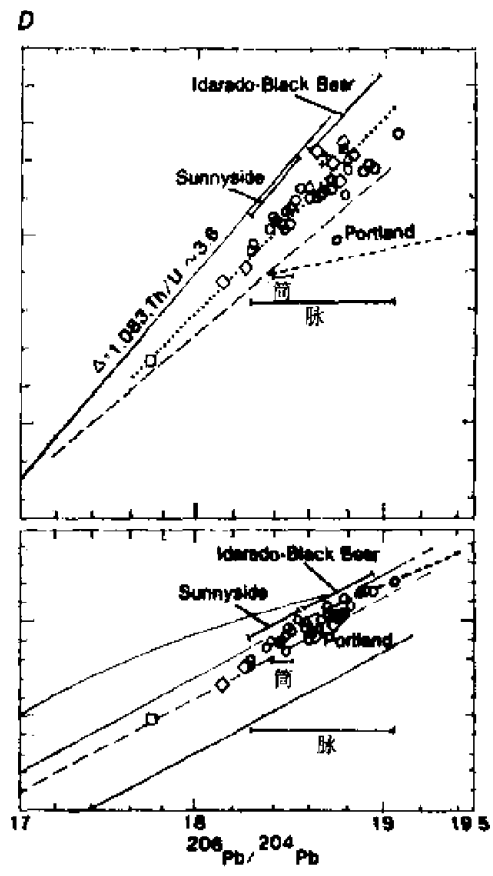
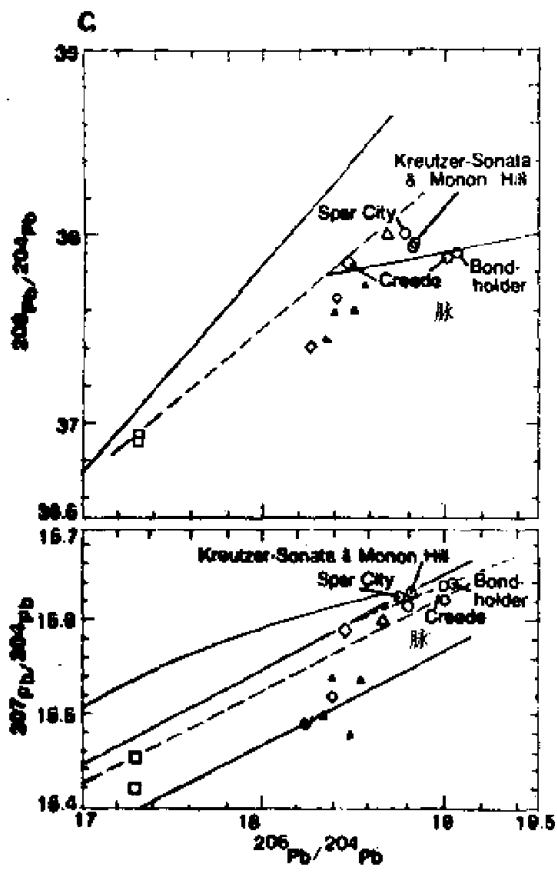
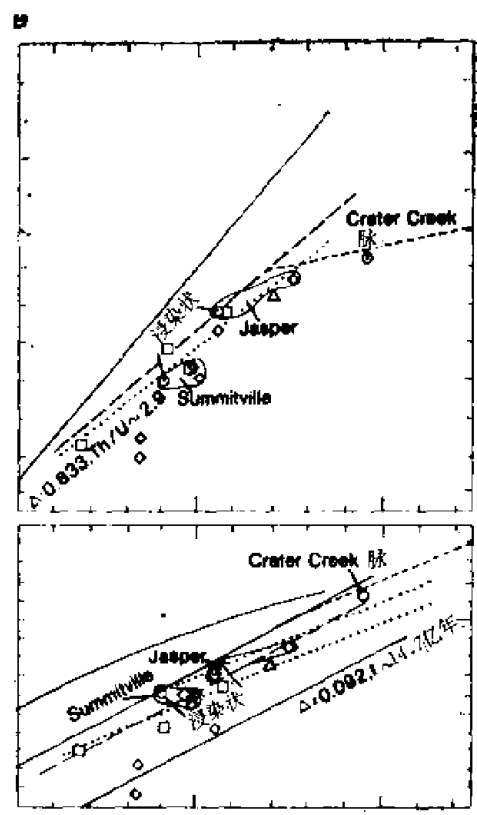
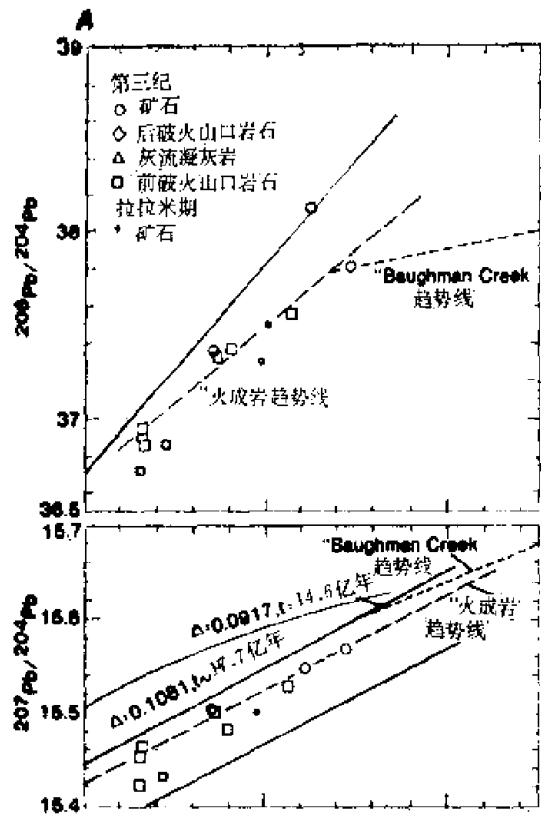
实曲线表示 Stacey 和 Kramers (1975) 之铅同位素演化线。实直线表示原始物质年龄为 17—18 亿年时于计的组成范围。长虚线是早期中性岩石的回归线。短虚线是“Baughman Creek 趋势线”。在铀铅图上 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  对  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )，点线平行于“Baughman Creek 趋势线”作图，但在含钍铅图上 ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  对  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )，点线代表高精度分析样品的趋势。大的符号表示三带源法、四甲基铅法或硅酸法分析的样品，小符号表示用 PbS— $\text{NH}_4\text{OH}$  法测得的精度较低之岩石数据；矿石只表示高精度的数据。

A. 早期中性岩组 (图 3)。

B. Platoro 破火山口杂岩。包括表 2 中 Summitville (样品 9, 10)、Jasper 地区 (样 12) 及 Crater Creek 脉地区 (样 13) 的方铅矿数据。还包括 Lipman 等 (1978) 的下列火成岩数据：东南 San Juan 山区早期中性岩组之前破火山口岩石 (样品 1—3)，渐新世 Treasure Mountain 凝灰岩 (样 9)，渐新世 Summitville 安山岩的后破火山口组合 (样 10, 11)，Park Creek 之流纹英安岩 (样 12)，South Mountain 之石英安粗岩 (样 13，大符号) 以及 Copsy Mountain 之流纹英安岩 (样 14)。

C. 中 San Juan 破火山口杂岩的脉。包括表 3 中 Creede (样 14—21)，Monon Hill (样 20—21)，Kreutzer-Sonata (样 21 A)，Spar City (样 22) 和 Bondholder (样 23) 等地的方铅矿数据。还包括 Lipman 等 (1978，表 2、表 3) 之下列火成岩数据：Summer Coon 中心早期中性岩组合之前破火山口岩石 (样 4、5)，渐新世 Fish Canyon 凝灰岩 (样 15, 16)，Carpeneer Ridge 凝灰岩 (样 17，大符号)，Mammoth Mountain 凝灰岩 (样 18, 19) 以及后破火山口之 Fisher 石英安粗岩 (样 20，大符号及样 21)。

D. 西 San Juan 破火山口杂岩。包括表 4 (样品 24—53) 的方铅矿数据。还包括 Lipman 等 (1978，表 3) 之下列火成岩数据 (按年龄变小的顺序)：前破火山口的 Cimmaron Ridge 流纹英安岩流—Sapinero Mesa 凝灰岩 (样 22)，Silverton 火山岩之 Burns 段 (样 23)，Silverton 火山岩之 Henson 段 (样 24)，Crystal Lake 凝灰岩 (样 25)，以上均为渐新世；后破火山口岩石—Sultan Mountain 岩株 (样 26)，National Belle 岩颈 (样 27)，Engineer Pass 岩颈 (样 28)，中新世 Sunshine Peak 凝灰岩 (样 29) 和后破火山口 Nellie Creek 岩颈 (样 31)。对有些有特殊经济或科学价值的矿床作了标记。



(上接第10页)

时线十分接近地通过许多数据点,包括三个最富放射成因铅的方铅矿数据点,这三个方铅矿都来自 Baughman Creek 的一个火成中心(表1,样品6—8)。因此在代表17—18亿年的原始物质的区间可以看到成矿溶液与14—15亿年的原始物质相互作用的证据。14—15亿年的原始物质影响不明显的那些情况将在后面讨论。因为在讨论中所采用的回归线实际是由 Baughman Creek 中心的样品推出,我们将14—15亿年原始物质的影响称之为“Baughman Creek 趋势线”。

在涉及钍铅的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上表示了三个范围。Baughman Creek 及其它几个地点的方铅矿形成一条很平缓的趋势线。曾有人认为这条平缓的趋势线表明:南达科他州 Black Hills 矿石的源岩中Th/U比有变化,而Th/Pb比较稳定(Rye等,1974)。看来这个地区的数据也应服从“Baughman Creek 趋势线”。其它两条趋势线基本上(不是绝对地)将西San Juan 破火山口杂岩的数据(斜率较大)和中、东部及东南部火山岩区的数据分开。趋势线可能反映不同来源的物质有不同Th/U比,也可能表明铀和它形成的铅比钍和钍铅更易溶解。不管原因如何,不同的趋势线有助于比较不同地区的数据。

### 早期中性成分岩石的火山中心

在主要的灰一流喷发及有关的破火山口沉陷开始之前喷出的中性火山岩(年龄3000—3500万年)至少占San Juan 火山岩区岩石的三分之二。在这种年龄的火山中心中,许多都显示热液活动的迹象,并有微弱的矿化;但至今只有几个中心产出一些矿石,且单个火山中心产出的矿石价值不过数百万美元。

矿化中心的样品全部来自 San Juan 火山岩田的东部(图1、3及4A),在那里年龄关系最为清楚,受晚期矿化阶段粘染的可能性较小。没有任何迹象表明这些中心的岩石与岩区其它地方的早期中性岩石有什么基本的差别,但也可能我们的数据有某种地理上的偏向。分析的样品铅同位素值分布很宽:铀铅( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.7-21.1$ )分布范围相当于 San Juan 火山岩区方铅矿的整个范围,而钍铅( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.3-38.4$ )也差不多代表了整个范围。在有充足数据的地方,矿石铅表现出清楚的局部变化,且与含矿岩石的铅同位素组成显然不同。在 Baughman Creek 中心的方铅矿较 San Juan 区域其它地方的方铅矿富含铀铅。它的钍铅也高,但在整个火山岩区中不是最高的。这些比值与构成 Baughman Creek 中心的侵入岩核心的岩株中岩石铅富含非放射性成分的情况恰成对照。

在 Baughman Creek 中心东南方14公里的 Summer Coon 火成中心附近也存在类似情况,但不那么明显。那里火山岩的铅也是非放射性成因的( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.3-17.4$ ),而中心的方铅矿含较多放射性成因铅( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.3$ )。但 Summer Coon 方铅矿的同位素组成与另一些早期中性岩类似。早期中性火山中心方铅矿的不同的数据也表明各中心之间矿石铅同位素组成变化很大。但是来自 Beidel 中心 Crystal Hill 角砾岩筒的不同矿化物质的三个样品(表1,样品1—3)在铀铅和钍铅比值上都 很相近(图3和4A)。这些组成也在早期中性岩岩石铅范围内。

各中心之间以及至少在一个中心(Baughman Creek)之内,矿石铅同位素组成变化很大。并在两个中心内矿石铅与岩石铅之间同位素组成不一致,所有这些都表明其来源的复杂性。在 Baughman Creek 和 Summer Coon 中心见到的矿石铅与含矿岩石的铅同位素的差别表明:方铅矿的铅既非来自火成中心的侵入岩核所代表的岩浆,也不来自同生的火山岩的淋滤。因为方铅矿较有关火成岩更富含放射性成因铅,我们认为矿石铅大部份来自富含放射性成因铅的深部前寒武系结晶岩。

看来已经表明,基本上至少有两个铅源。在包含钍铅的图上(图3),Baughman Creek 方铅矿数据与其岩石铅不在同一回归线上。因此在包括 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的图上对火成岩和方铅矿数据也将分别处理。在图上,火成岩数据落在原始物质为17—18亿年时预计的范围内,不过因用PbS—NH<sub>4</sub>OH法分析,误差较大,而有偏离。最小二乘回归线大致落在亚利桑那州和新墨西哥州块状硫化物矿床所指明的,年龄为17—18亿的原始物质所对应的范围中间(图2)。另一方面,Baughman Creek 的方铅矿有平缓的趋势线,铅主要来自14.5亿年的来源(图2,3),例如与 Eolus 花岗岩有关的花岗岩。

在钍铅图上(图3),岩石与矿石数据(样品1、4加上 Lipman 等[1978]之1—5,7)的主要趋势是一条斜率0.734(±0.04)的回归线,相应的Th/U比为2.5。由 Baughman Creek 中心的方铅矿算出的Th/U比为0.7,比全岩低得多。这可能表示在成矿过程中铀铅较钍铅易于溶出。铀铅数据表明易溶于的物质是与 Eolus 花岗岩有关的。

### Platoro 破火山口杂岩

Platoro 破火山口杂岩(表2,图5)由互相重叠的 Platoro 和 Summitville 破火山口组成。这些破火山口在3000—2900万年前,由于 Treasure Mountain 凝

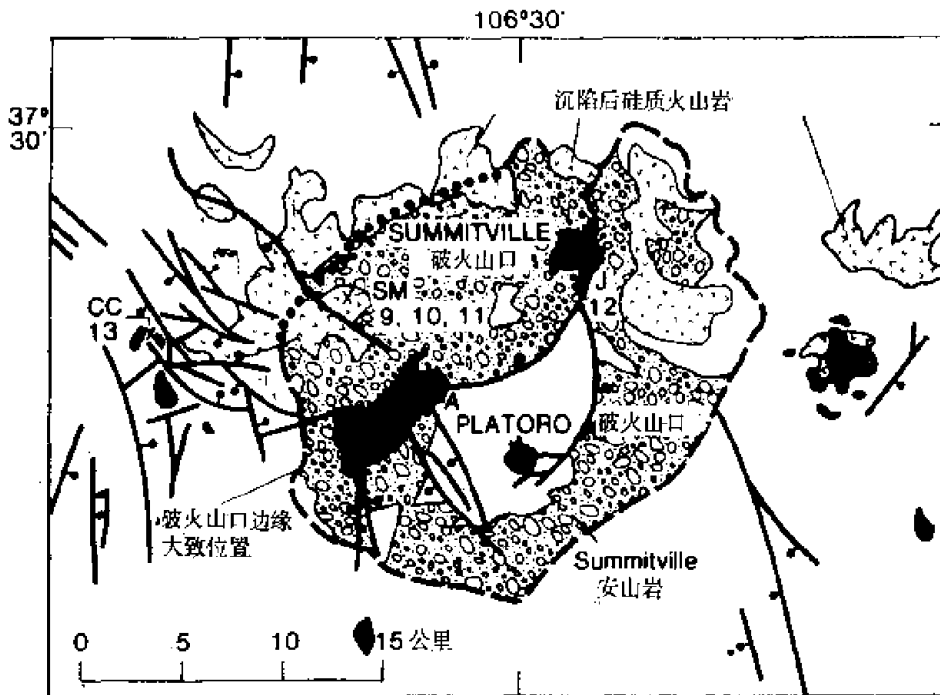


图 5 渐新世 Patoro 破火山口杂岩地质略图

表示了样品位置。数字指表 2 的样品号。SM = Summitville 矿区, J = Jasper 地区, CC = Crater Creek 区域, A = Alamosa Creek 岩株。粗实线表示断裂, 而短线及小圆点表示倾向。侵入作用黑色表示

灰岩多次灰一流喷发而下陷(Lipman, 1975b; Steven 和 Lipman, 1976, P4—6)。这些破火山口在东南San Juan 山区是首先形成的, 它们发育在 6—7 个火山组成的年龄较老的中性岩石层状火山群的范围。热液活动使火山口及附近岩石广泛蚀变, 并在局部地方沉淀出含金、银、铜、铅和锌的矿脉。有人认为可能存在浸染状的“斑岩型”矿床(Lipman 和 Steven, 1970; Neunerburg 等, 1976)。

热液活动大都发生在破火山口形成后数百万年或更晚, 并且伴随着持续的火成活动。这些火成活动受破火山口沉降时形成的构造的支配(图 5)。Summitville 地区位于破火山口环状构造与区域性NW向断裂带之交叉处; Jasper 地区在两个破火山口环状构造的一个交点上, 而Crater Creek 地区是沿着一个由破火山口杂岩往西延伸的地塹分布的。

Patoro 破火山口杂岩中的岩石与方铅矿的铅同位素组成变化很大, 但对精确结构进行的研究表明, 同位素变化比早期中性岩组的变化更复杂(图 4B)。例如, Treasure Mountain 凝灰岩(其喷发导至Patoro 破火山口下陷)的 La Jara Canyon 段灰一流凝灰岩( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 18.4;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 37.7) 就比附近的任何早期中性岩( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 17.3,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 36.9—37.6, 图 3) 更富放射成因铅。按 Lipman 等人的意见(1978), 较高的比值可能反映随着火山作用

的进行, 地壳上部岩石对火成岩同位素组成的影响加大。除了一个例外, 火成岩的数据均落在来源物质年龄为 17—18 亿年时对应的组成带内, 而且早期中性岩石组的回归线也很适于 Patoro 破火山口杂岩的岩石铅数据。Lipman 等(1978)指出: Patoro 破火山口杂岩岩石的回归线斜率为 0.088, 而早期中性岩的斜率为 0.10。他们认为年龄为 14—15 亿年的来源物质可能参与形成凝灰岩中铅的同位素组成。来源可能是与西 San Juan 山区 Needle 山区年龄 14.6 亿年的 Eolus 花岗岩有关的花岗岩。

Summitville 矿区的矿床(图 5; Steven 和 Ratte, 1960) 被 South Mountain 的后破火山口石英粗安岩火山穹丘中的巨大的蚀变晕所围绕。矿化作用与围岩的年龄均为 2300—2200 万年(Mehnert 等 1973 b), 似有密切的成因关系。由该区的石英—钠明矾石交代矿体(脉)中已生产出价值 1000 万美元的金、银和铜, 而且有人还提出可能存在有意义的“斑岩型”铜矿资源(Lipman 和 Steven, 1970, PC28)。在岩石中不常见的方铅矿(表 2, 样品 9—11) 的同位素组成与石英粗安岩的铅基本相同(方铅矿的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 17.8,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 37.2; 岩石的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 17.95,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 37.3)。考虑到  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值, 矿石铅的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值较高, 数据点在铀铅图上靠近原始物质年龄为 17—18 亿年时对应范围的上界。这