由图 3-10 可见，4 个金（锑）矿床的$\delta^{34}S$ 值呈现出明显的两个峰，一个为正值峰，峰值为 2～6‰，另一个为负值峰，峰值为-4～-2‰，每一个峰都具有显著的塔式分布效应。根据大量实验结果，当硫同位素达到平衡时，硫化物的$\delta^{34}S$ 值应该按黄铁矿＞闪锌矿＞黄铜矿＞方铅矿＞辉锑矿＞S^{2-}的顺序依次递减。对于五龙沟、大场和东大滩矿床由于所测硫化物为不同成矿阶段产物，因此不能判断硫同位素分馏是否达到平衡，对开荒北金矿，所测同一成矿阶段黄铁矿的$\delta^{34}S$（4.9‰）＞黄铜矿（4.8‰）＞方铅矿（3.0‰），看来其硫同位素分馏基本达到了平衡，利用黄铜矿-方铅矿矿物对硫同位素分馏方程计算出的形成温度为 330℃，略高于包裹体显微测温结果。由于硫同位素组成受温度、氧逸度、pH 值和离子强度等因素制约，因此从热液中沉淀出来的硫化物硫同位素组成并不等于成矿热液的总硫$\delta^{34}S_{\Sigma S}$，但我们可以根据矿物沉淀时的物理化学环境来估计成矿溶液的总硫组成。大量研究表明，在高氧逸度条件下（以出现重晶石或重晶石-赤铁矿-黄铁矿组合为标志），重晶石硫同位素大致接近于成矿热液的总硫值，即$\delta^{34}S_{重晶石} \approx \delta^{34}S_{\Sigma S}$；在低氧逸度环境下（以出现石墨和磁黄铁矿为标志），则$\delta^{34}S_{磁黄铁矿} \approx \delta^{34}S_{\Sigma S}$；介于两者之间的中等氧逸度条件下（出现黄铁矿＋方解石组合），黄铁矿的硫同位素组成可近似代表成矿热液的总硫值，即$\delta^{34}S_{黄铁矿} \approx \delta^{34}S_{\Sigma S}$。根据这 4 个矿床中黄铁绢英岩化为最主要的蚀变类型，未见有重晶石或磁黄铁矿等矿物，故可以黄铁矿的硫同位素组成代替成矿溶液的总硫值。如前所述，五龙沟金矿和开荒北金矿的$\delta^{34}S$ 平均值分别为 3.98‰和 4.4‰，比较接近于岩浆硫的$\delta^{34}S$ 值，但是变化范围相对较大，绝不是单纯的岩浆硫来源，很可能为大气降水从岩浆岩中萃取的岩浆硫和地幔硫的混合物。大场和东大滩两矿床的$\delta^{34}S$ 分别为-3.73‰和-2.3‰，均小于一般中温热液金矿床的硫值（3.5‰）和岩浆硫（4‰），且富轻硫，可能为再循环地幔硫和地层硫混合来源。

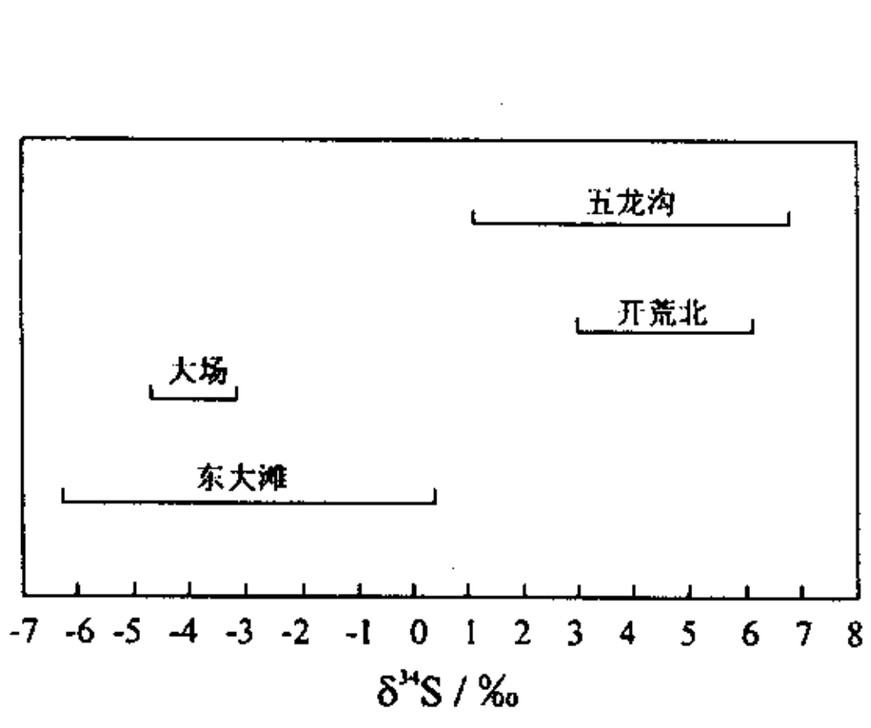


图 3-9　东昆仑地区矿床硫同位素组成对比图

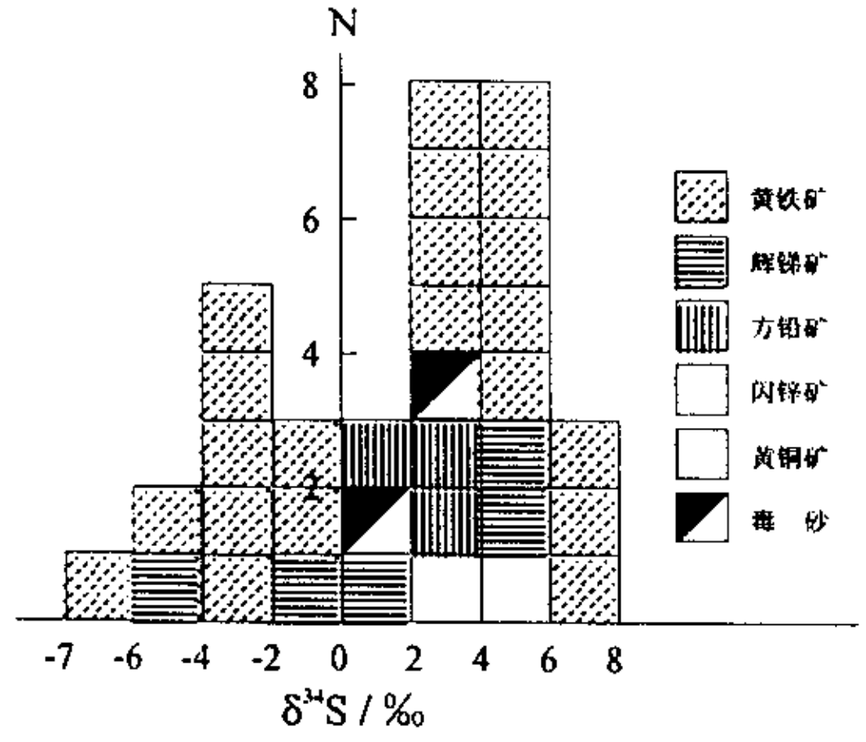


图 3-10　东昆仑地区金矿床硫同位素组成直方图

三、铅同位素地球化学

铅同位素作为一种有效的示踪剂，已被广泛应用于探讨源区特征、形成环境和物质来源等诸方面。以往在东昆仑地区仅进行过零星的铅同位素测试和研究，本次则对元古代老变质岩（包括黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩）、不同时期花岗岩、火山岩及金矿床等进行了系统的铅同位素研究，旨在探讨该区铅同位素的组成与演化特征。

（一）岩（矿）石铅同位素组成

所有样品的铅同位素分析结果列于表 3-14 中。从中可以看出：

金水口一万保沟地区的 4 件黑云斜长片麻岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 18.1406～19.08328 之间，离差 0.9427，均值 18.5046；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 15.3720～15.67524 之间，离差 0.3032，

均值 15.5749；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 37.4605～40.4678 之间，离差 3.0073，均值 38.8978。3 件斜长角闪岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 17.5728～18.62492，离差 1.0521，均值 17.9607；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.1636～15.63360，离差 0.47，均值 15.3940；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 37.3119～38.5896，离差 1.2777，均值 37.8434。

6 件不同时期产于不同位置的花岗岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 18.2602～20.54676 之间，离差 2.2866，均值 19.0087；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 15.5587～15.76618 之间，离差 0.2075，均值 15.6460；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值介于 38.0312～40.8909 之间，离差 2.8597，均值 39.1381。

表 3-14　东昆仑地区金矿床铅同位素分析结果

	样 号	岩 性	测试对象	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{208}Pb/^{206}Pb$	位置及时代
变质岩	J12-3	黑云斜长片麻岩	全 岩	19.08328	15.67524	40.4678	0.82141	2.1206	金水口（Pt_1）
	G2-9	黑云斜长片麻岩	全 岩	18.58830	15.66507	39.1058	0.84274	2.1038	西大滩（Pt_1）
	GS4	黑云斜长片麻岩	全 岩	18.1406	15.3720	37.4605	0.84738	2.0650	五龙沟（Pt_1）（据钱壮志等）
	GS11	黑云斜长片麻岩	全 岩	18.2063	15.5873	38.5572	0.85615	2.1178	
	GS5	斜长角闪岩	全 岩	17.6844	15.3849	37.6287	0.86997	2.1278	
	GS9	斜长角闪岩	全 岩	17.5728	15.1636	37.3119	0.86290	2.1233	
	J12-4	斜长角闪岩	全 岩	18.62492	15.63360	38.5896	0.83939	2.0719	金水口（Pt_1）
花岗岩	G6-3	二长花岗岩	全 岩	18.98442	15.67133	38.7862	0.82548	2.0431	万保沟（加里东）
	J12-6	黑云母二长花岗岩	全 岩	19.2833	15.68435	39.6656	0.81336	2.0570	金水口（华力西）
	G15-1	花岗闪长岩	全 岩	18.61944	15.6135	39.0461	0.83856	2.0971	格尔木采石场（印支期）
	G12-1	花岗岩	全 岩	18.35792	15.58207	38.4088	0.84879	2.0922	干沟水库北（印支期）
	G10-1	斑状花岗岩	全 岩	20.54676	15.76618	40.8909	0.76733	1.9901	干沟水库西（燕山期）
	GS8	斜长花岗岩	全 岩	18.2602	15.5587	38.0312	0.85206	2.0827	五龙沟（加里东）
五龙沟金 矿	WK91	方铅矿矿石	方铅矿	18.3634	15.6056	38.2968	0.84982	2.0855	据钱壮志等（2000）
	WK92	方铅矿矿石	方铅矿	18.3764	15.5897	38.5390	0.84835	2.0972	
开荒北金 矿	Bj-1	细斑点状板岩	全 岩	18.5350	15.6523	38.7101	0.84447	2.0885	
	Shzg-4	石英脉矿石	黄铁矿	18.4122	15.6278	38.4708	0.84877	2.0894	
	Kx-200	蚀变岩矿石	黄铁矿	18.4312	15.5776	38.3528	0.84518	2.0809	
	Dqg-1	黄铁矿化蚀变岩	黄铁矿	18.4526	15.6380	38.5278	0.84747	2.0879	
	Dqg-2	石英脉	方铅矿	18.42290	15.63862	38.5008	0.84887	2.0898	
东大滩锑金矿	Ddt-1	块状辉锑矿矿石	辉锑矿	18.5167	15.5990	38.5844	0.84243	2.0838	
	Ddt-16	辉锑矿-石英脉	辉锑矿	18.57464	15.57996	38.4574	0.83878	2.0704	
	Ddt-29	变砂岩金矿石	黄铁矿	18.5321	15.6196	38.6244	0.84284	2.0842	
	Ddt-44	千枚岩金锑矿石	黄铁矿	18.5513	15.5972	38.5552	0.84076	2.0783	
	Ddt-45	石英脉金锑矿石	毒 砂	18.4324	15.6068	38.4506	0.84670	2.0860	
大 场金锑矿	Dc-11	黄铁矿化蚀变岩	黄铁矿	18.3380	15.5671	38.2309	0.84890	2.0848	
	Dc-21	变砂岩	黄铁矿	18.37949	15.59210	38.3183	0.84834	2.0848	
	DCD-5	黄铁矿化泥质板岩	黄铁矿	18.3381	15.5555	38.1796	0.84826	2.0820	
	DCD-6	泥质板岩	黄铁矿	18.3544	15.5852	38.2782	0.84913	2.0855	

测试单位：国土资源部同位素地质开放实验室　张巧大，杨淳

4 个金矿床中，五龙沟金矿 2 个方铅矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值分别为 18.3634 和 18.3764，离差为 0.013，平均值为 18.3699；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.6056 和 15.5897，离差 0.0159，平均值 15.5977；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 38.2968 和 38.5390，离差 0.2422，平均值 38.4179。开荒北金矿 1 件围岩、3 件黄铁矿和 1 件方铅矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值变化范围为 18.4122～18.5350，离差为 0.1228，平均值为 18.4508；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.5776～15.6523，离差 0.0747，平均值 15.6269；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 38.3528～38.7101，离差 0.3573，平均值 38.5125。大场锑金矿 4 件黄铁矿样品的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值变化范围为 18.3380～18.37949，离差为 0.0415，平均值为 18.3525；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.5555～15.5921，离差 0.0366，平均值 15.5750；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 38.1796～

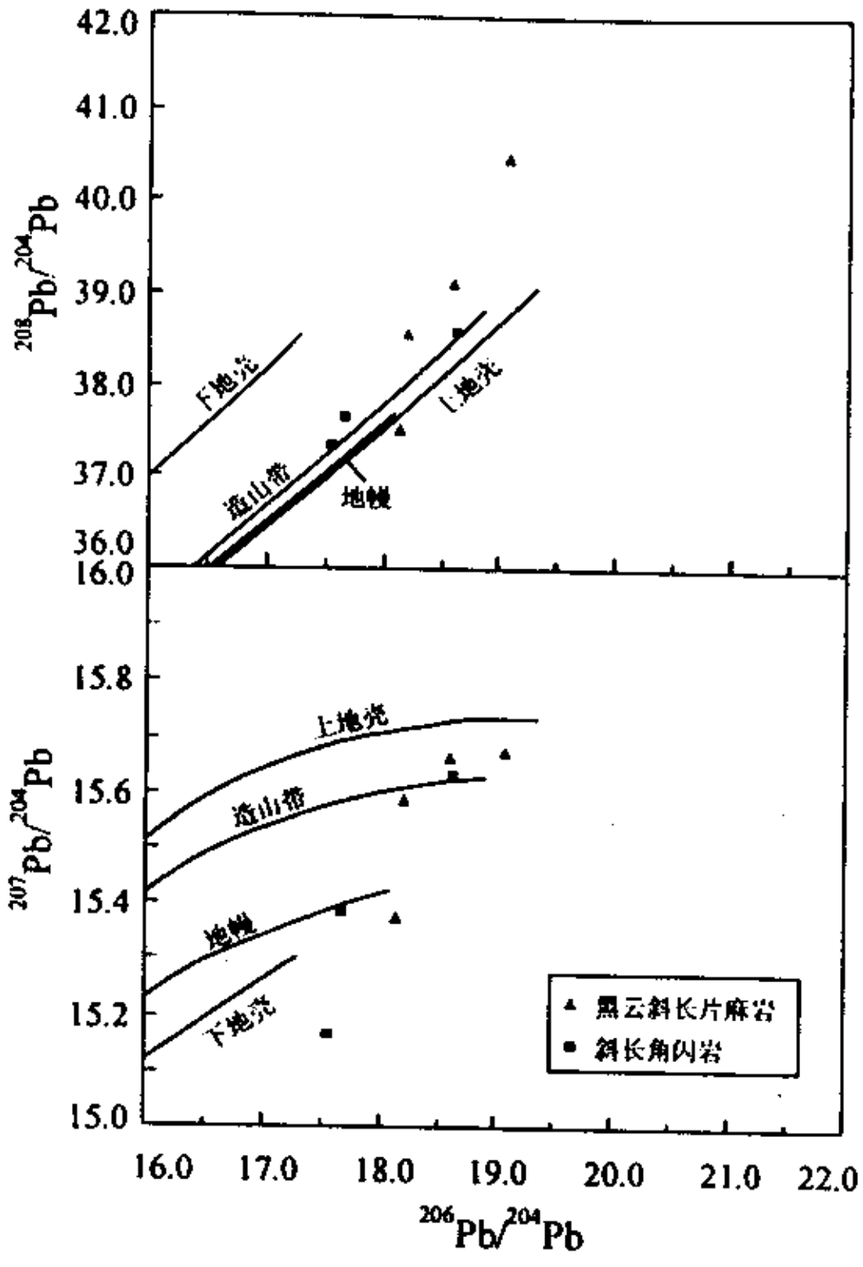


图 3-11　东昆仑地区元古代变质岩 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解

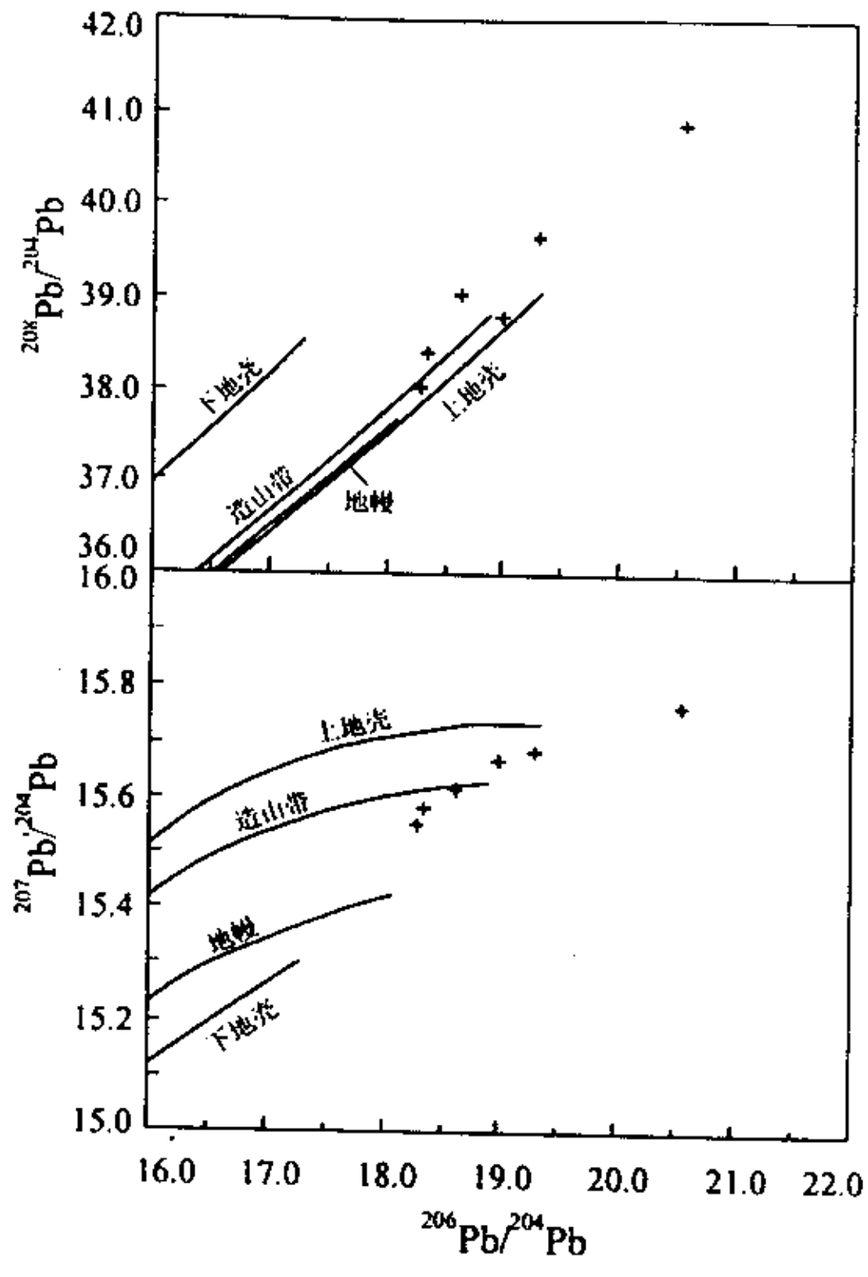


图 3-12　东昆仑地区花岗岩 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解

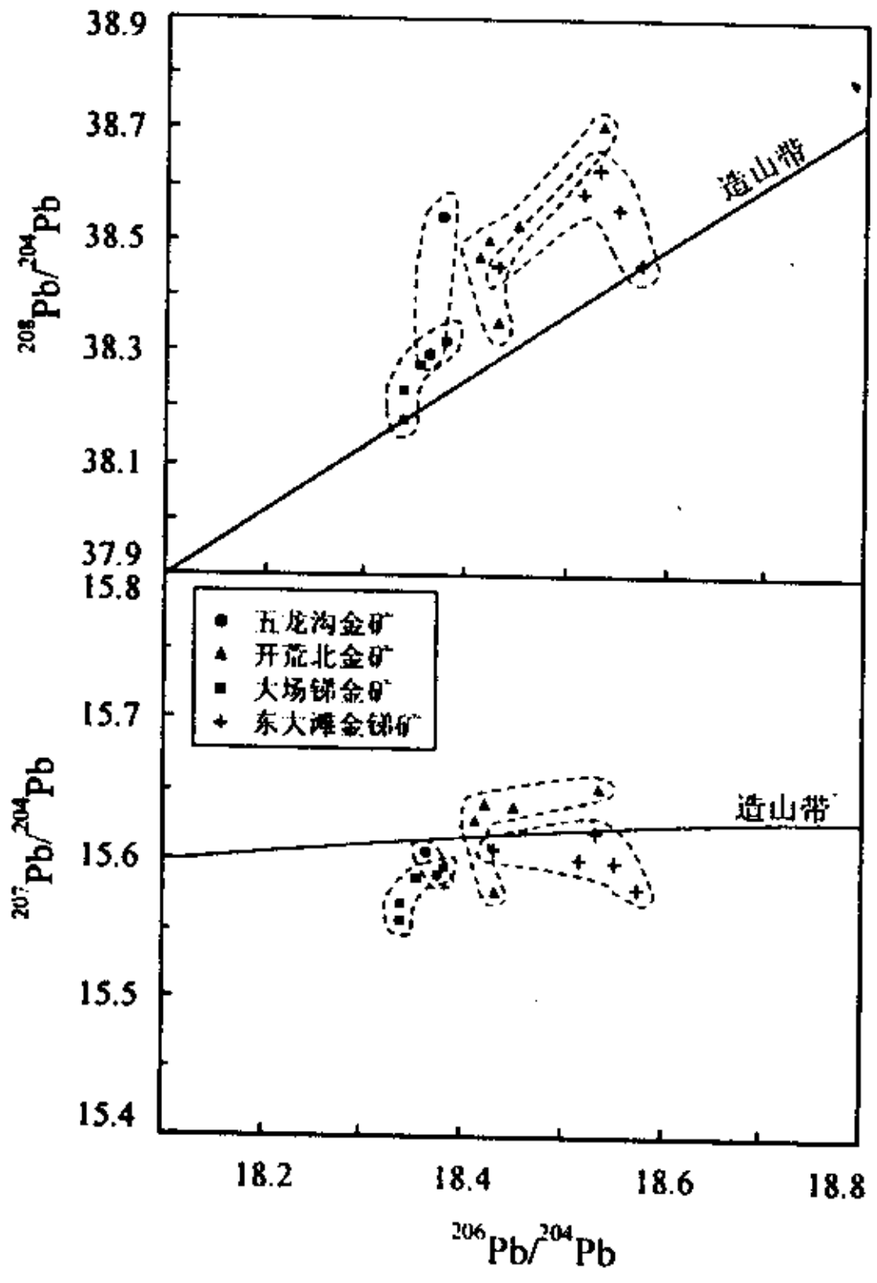


图 3-13　东昆仑地区金矿床 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解

38.3183，离差 0.1387，平均值 38.2518。东大滩金锑矿 2 件辉锑矿、2 件黄铁矿和 1 件毒砂的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值变化范围为 18.4324～18.57464，离差为 0.1422，平均值为 18.5214；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.57996～15.6196，离差 0.0396，平均值 15.6005；$^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 38.4506～38.6244，离差 0.1738，平均值 38.5344。另外，西藏大沟金矿点 1 个岩石样品的 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值分别为 18.65057、15.6711 和 38.9165。

（二）铅同位素数据讨论及其地质意义

由表 3-14 可知，东昆仑地区不同样品的铅同位素组成既存在一定差别又可进行类比，反映出它们所代表的源区特征、形成环境及物质来源等方面的信息。

代表东昆仑地区前寒武纪结晶基底的古老变质岩黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩的铅同位素组成变化较大，在 Zartman 等（1981）的构造图上，除 1 个数据点落在下地壳之下、2 个数据点位于地幔演化线和下地壳演化线之间外，其余均分布在上地壳和地幔演化线之间且集中于造山带演化线附近（图 3-11）。一些地质研究结果表明，其可能代表了新元古代古克拉通边缘或从古克拉通边缘分离出来的陆块之间的优地槽环境，而后又经历过多次构造活动，变质程度达中压角闪岩相。本区古老变质岩的铅同位素组成高于华北克拉通，一方面说明其裂解下来后发生过壳-幔混合作用，形成富集型地壳的基底物质，另一方面反映受到后来多期构造活动影响，U-Th-Pb 体系发生变化，造成放射性成因铅富集。

用于铅同位素分析的花岗岩时代从加里东、华力西、印支一直到燕山期，它们的铅同位素值都较高，$^{206}Pb/^{204}Pb>18.2602$、$^{207}Pb/^{204}Pb>15.5587$、$^{208}Pb/^{204}Pb>38.0312$，在铅同位素构造图解上位于地幔演化线和上地壳演化线之间，并有从造山带向上地壳演化的趋势（图 3-12），它们可能为区内陆内俯冲、陆陆碰撞等造山作用过程中由壳源物质经过部分熔融和结晶分异作用形成的。

4 个金（锑）矿床的铅同位素分析结果表明，铅同位素组成分布集中且比值较高，五龙沟金矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 分别大于 18.3634、15.5897 和 38.2968；开荒北金矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 分别大于 18.4122、15.5776 和 38.3528；大场金锑矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 分别大于 18.3380、15.5555 和 38.1796；东大滩锑金矿的 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 分别大于 18.4324、15.57996 和 38.4506，显然为典型的放射性成因铅。在 Zartman 等的构造图解中（图 3-13），投点均集中分布于造山带演化线附近，其中，五龙沟金矿 2 个方铅矿的投点与大场金矿的 4 个黄铁矿铅同位素投点相似，皆位于造山带演化线的下方偏左；开荒北金矿床除 1 个数据点位于造山带演化线下方外，其余 4 个数据点均投在造山带演化线上方的位置，东大滩金锑矿 5 件硫化物样品的铅同位素投点皆位于造山带演化线之下且靠近造山带演化线集中分布，与开荒北金矿一样具有更高的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值，因此投点较另外 2 个矿床靠右。所测矿床围岩与矿石的铅同位素组成十分接近，反映它们有相同的铅源。流体包裹体和氢、氧同位素研究表明，这些矿床成矿流体为典型的大气降水来源，具有中低温成矿之特点。多期次复合造山过程使地层岩石强烈变形，产生一系列大型剪切带，这些矿床的矿体即产于大型剪切带内的褶皱和断裂构造中，强烈破碎的围岩，十分容易被大气降水淋滤改造，因此，大气降水来源的热液不断淋滤围岩岩石，在此过程中放射性成因铅首先进入到溶液，从而导致放射性成因铅的逐渐积累，造成铅同位素组成明显偏高。矿床铅主要来自围岩，与硫、碳等同位素所揭示的结果相一致。

总之，东昆仑地区造山带基底岩石、花岗岩及各类矿石富含放射性成因铅，在铅-铅图解上，数据点落在零等时线的左侧和右侧，一方面反映了它们属典型异常铅，或为两种或两种以上铅源的混合，另一方面说明了矿石铅对基底岩石的继承性特征，同时在成岩成矿过程中混有外来铅或是成岩成矿后有放射性成因铅的积累。利用 Doe & Stacey（1974）的铅同位素演化模式进行岩、矿石模式年龄计算，所得年龄值或为负值或与岩、矿石的实际

地质时代相差甚远，同时获得的μ值也与正常铅的范围不符，它们皆不具有实际地质意义。在 Zartman 等（1981）的构造图上，大多数数据点位于地幔演化线与上地壳演化线范围内，集中在造山带演化线的附近，说明该区所处的为典型造山带环境，与实际地质构造背景相一致。另外，按照张理刚等（1995）对我国铅同位素省的划分，该区铅同位素组成与扬子区较为相似。

第四节　成矿时代

同位素地质年代学是研究矿床形成时代的最有效方法之一。东昆仑地区金矿床自发现以来，一些学者主要集中在工作程度较高的五龙沟金矿床成矿年代的研究上，包括不同的方法，如绢云母 K-Ar 法、全岩 Rb-Sr 法及磷灰石和锆石的裂变径迹法等。此次我们则对五龙沟、开荒北、大场及东大滩金（锑）矿床运用高精度的绢云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 法进行了年龄测定，由于时间原因，开荒北金矿和东大滩锑金矿的测年结果尚未出来，本节主要是在前人的研究基础上，利用已有测试结果并与一些地质证据相结合来探讨矿床的形成时代及演化。

一、地质依据

由于该地区金矿床严格受构造控制，金矿化与不同时期和演化阶段的构造作用密切相关，因此，可根据控矿构造的相互关系来大概判断成矿时代。另外，利用矿床产出的围岩地层时代及不同地质体之间的穿插关系也可为我们提供较好的相对成矿时代证据。

在五龙沟矿区，容矿岩石加里东期二长花岗岩和元古代金水口群片麻岩以及其外围的小庙群变沉积岩皆被卷入到 NW 向剪切带中，而在打柴沟金矿点，NW 向剪切带又被晚华力西期花岗岩所隔，另在打柴沟中，见一碱长花岗岩脉穿切打柴沟 NW 向剪切带中的早期面理，而后该岩脉又发生了左行旋转，测得其 K-Ar 法年龄为 234.7±5.1Ma。另外，陆松年（2000）对 NW 向大型剪切带不同地段的水热蚀变矿物进行了年龄测定，其中 2 个白云母的 Ar-Ar 年龄分别为 240±4.12Ma 和 439.3±7.1Ma，2 个黑云母的 Ar-Ar 年龄分别为 216.5±4Ma 和 221.5±4.2Ma，1 个角闪石的 Ar-Ar 年龄为 399.4±7.8Ma，综合上述可见，这些大型剪切带至少经历了晚加里东期（399.4～439.3Ma）和晚华力西—印支期（216.5～240Ma）两次构造活动，野外观察发现，与之相伴在早期有较弱的金矿化，而晚华力西—印支期构造活动是主成矿构造，直接控制着矿体的产出，反映了可能存在两期矿化作用，而主成矿作用应发生在印支期。

位于昆南断裂带北侧的开荒北金矿，其成矿主岩为低绿片岩相变质的中三叠统闹仓坚沟组前陆盆地碎屑岩，而大场金锑矿和东大滩锑金矿皆产于巴颜喀拉构造带一套浅变质的下三叠统巴颜喀拉山下亚群复理石沉积岩系中。显而易见，开荒北金矿床的形成时代不应早于中三叠世，大场和东大滩矿床的成矿年龄不应早于早三叠世，从而初步限定了这些矿床的成矿时代。

二、放射性同位素测年

如前所述，黄铁绢英岩化是本地区金矿床最特征的热液蚀变，因此水热蚀变产物绢云母便是进行 ^{39}Ar-^{40}Ar 年龄测定的主要对象。样品的处理程序是：将样品粉碎至≥180 目后，首先进行重选，剔除大部分重矿物，然后称出相应重量的轻矿物样品粉末，送作 K-Ar 分析，其余的样品粉末，再进一步在水体中反复沉淀，最后将提取液烘干，并经鉴定确认后获得绢云母单矿物样品，送实验室作 Ar-Ar 法测年。样品由中国地质科学院地质研究所同位素地质年代学实验室陈文测试，测定仪器为英国生产的 VGMM-1200B 惰性气体质谱计。

对五龙沟金矿床采自Ⅲ-1 号矿体的强烈黄铁绢英岩化糜棱岩型金矿石（含 Au 8g/t）测得的 ^{39}Ar-^{40}Ar 坪年龄为 236.5±0.5Ma，$^{39}Ar/^{36}Ar$-$^{40}Ar/^{36}Ar$ 等时线年龄为 238.57±3.46Ma（表 3-15，图 3-14）；大场金矿床的测年样品为Ⅲ-7 号矿体黄铁绢英岩化蚀变碎裂岩金锑矿体，