图 3-7 和图 3-8 分别为五龙沟金矿和开荒北金矿在不同温度条件下大气降水与围岩交换过程中的氢、氧同位素演化曲线图。图中的小圆点分别代表在一定温度和某一实际水岩比值条件下利用上述公式计算得出的演化大气降水氢、氧同位素组成，根据矿床包裹体测温结果，计算温度分别选择 200℃、250℃、300℃和 350℃四个温度点，实际 W/R 比值从 0.01 变化到 5。从图中可以看出，在相同温度条件下，当 W/R 比值较小时（0.01～0.5），$\delta^{18}O_{H_2O}$ 基本保持稳定不变，而随着 W/R 比值略微地增加或减小，δD 值减小或增大的幅度很大；当 W/R 比值较大时（0.5～5），随着 W/R 比值的变化，δD 值的变化范围较小，而 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 则变化很大。在五龙沟金矿床，不同成矿阶段成矿流体的氢、氧同位素值在图中的投点与相应温度的大气降水演化曲线比较吻合，成矿早期温度较高，约 300℃，主成矿期投点靠近 250℃大气降水演化曲线，从成矿早期到晚期，有效 *W/R* 比值逐渐增大，从小于 0.5 到 1。由此可见，成矿流体氢、氧同位素组成很好地反映了大气降水与围岩经不同 *W/R* 比值交换后的特征，于是可以认为该矿床主要为演化的大气降水成因，其较低的流体盐度（0.88～7.02*wt*%NaCl）和较大的成矿（主成矿期为华力西期）与围岩（早元古代）时差也与之相一致。对于开荒北金矿，早期流体氢、氧同位素投点位于岩浆水范围之内，主成矿期多金属硫化物石英脉中的包裹体氢、氧同位素组成位于变质水与大气降水演化线之间。在大气降水与主岩交换中的氢、氧同位素演化图上，它们分别处于 300℃和 350℃演化线之间以及 250℃演化线的附近，高于相应的显微测温结果，总体上早期的 W/R 比值较小，随着成矿流体的演化 W/R 比值不断增大，反映随着成矿作用的进行，大气降水逐渐占据主导地位。矿区内出露一套中三叠统闹仓坚沟组变质细碎屑岩地层，未发现有任何岩浆活动，也从另一个角度印证了大气降水成因的正确性。另外，野外地质观察和成矿流体氢、氧同位素分析测试结果表明，位于北巴颜喀拉造山带三叠系复理石沉积岩系中的大场金锑矿床和东大滩锑金矿床也主要为大气降水成因。

（三）成矿流体的性质、来源与演化

综合前述，东昆仑地区金矿床成矿流体总体为一套中低温（118～378 ℃）、低盐度（0.35～9.54 *wt*%NaCl）的 H_2O-CO_2-NaCl-$CH_4\pm N_2$ 体系。成矿前热液主要来源于变质水和地层建造水，成矿期以来大气降水不断混入并占主导地位。区域上的俯冲和碰撞作用，产生强烈的构造变形和变质作用，形成了一些边界断裂和一系列的大型剪切带，变质作用使地层岩石脱水、脱挥发份产生变质流体，在俯冲或碰撞产生的地热增温驱动下，沿深断裂或大型剪切带迁移，并不断与围岩反应，从中萃取成矿物质，同时也因地层中碳酸盐类矿物溶解使 CO_2 含量逐渐升高，从而逐步形成较高温度的成矿流体。随着区域地壳不断隆升，这些富含成矿物质的流体进入到浅部断裂-裂隙系统中并沿其向上运移，加之大气降水的大量混入，引起温压等物理化学条件发生剧烈变化，含矿富 CO_2 流体产生不混溶作用，从而使大量 CO_2、H_2S 等挥发性组分逸出，残余的流体含有大量金锑等成矿物质。之后，由于压力的持续下降，大气降水的大量加入，造成温度迅速下降，金锑等成矿物质在成矿流体中的溶解度越来越小，于是迅速发生沉淀。成矿流体交代剪切带及其围岩，形成蚀变岩、石英脉，进而形成金（锑）等矿床。

二、硫同位素

硫同位素是探讨矿床矿化类型、矿床成因及成矿物质来源的有效途径之一。此次分别对东昆仑地区 4 个典型金（锑）矿床（包括五龙沟、开荒北、大场和东大滩）的硫化物硫同位素组成进行了测定和研究，旨在了解这些矿床的 $\delta^{34}S$ 组成分布特征，探讨硫的来源和矿床形成环境。

各矿床蚀变岩金矿石、石英脉金矿石、辉锑矿矿石及矿化岩石的硫化物硫同位素组成见表 3-13。除五龙沟金矿的硫同位素引自胡正国等（1997）外，其余 3 个矿床（开荒北、大场、东大滩）的硫同位素均为本次测定结果。从表 3-13 和图 3-9 中可以看出，4 个矿床

的硫同位素组成既有相似性（均为正/负向偏离于零的不大数值），又有较为明显的不同之处。五龙沟金矿床硫化物的$\delta^{34}S$ 为 1.1～6.9‰，众值集中于 2～5‰之间，平均 3.98‰，离差为 5.8‰，均为正值，其中黄铁矿的$\delta^{34}S$ 均值为 4.59‰（n=9），方铅矿的$\delta^{34}S$ 均值为 2.47‰（n=2），辉锑矿的$\delta^{34}S$ 均值为 3.75‰（n=3），1 个毒砂的$\delta^{34}S$ 为 3.9‰，1 个闪锌矿的$\delta^{34}S$ 为 2.4‰；开荒北金矿硫化物的$\delta^{34}S$ 介于 3.0～6.1‰之间，平均值为 4.40‰，离差 3.1 ‰，也均为正值，其中 3 件黄铁矿的$\delta^{34}S$ 均值为 4.73‰，1 件黄铜矿和 1 件方铅矿的$\delta^{34}S$ 分别为 4.8‰和 3.0‰；大场金锑矿 4 件黄铁矿的$\delta^{34}S$ 值为-4.7～-3.2 ‰，平均-3.73‰，离差-1.5‰，均为负值且变化范围较小；东大滩锑金矿床硫化物的$\delta^{34}S$ 为-6.3～+0.4‰，平均为-2.3‰，离差 6.7‰，除 1 件样品为接近于零的正值外，其余均为负值，但变化范围相对较大。其中 5 件黄铁矿的$\delta^{34}S$ 均值为-2.66‰，2 件辉锑矿的$\delta^{34}S$ 均值为-2.75‰，1 件毒砂的$\delta^{34}S$ 为 0.4‰。

表 3-13　东昆仑地区金矿床岩（矿）石硫化物硫同位素分析结果

矿床	样号	产　　状	测试对象	$\delta^{34}S$/‰	资料来源
五龙沟金矿	WK30	IIIPD3-2 金矿石	黄铁矿	4.5	胡正国等（1997）
	WK727475	III-2 矿体金矿石	黄铁矿	3.3	
	WK93	东支沟多金属矿矿石	黄铁矿	2.7	
	WK86	东支沟口闪长玢岩	黄铁矿	4.7	
	WK28	III-3 矿体金矿石	黄铁矿	4.5	
	WK51	I 矿带隐爆角砾岩	黄铁矿	6.9	
	WK3233	III-3 矿体金矿石	黄铁矿	5.3	
	WK63	VII矿带隐爆角砾岩	黄铁矿	6.8	
	WK94	东支沟多金属矿矿石	黄铁矿	2.7	
	WK92	东支沟多金属矿矿石	方铅矿	1.1	
	WK54	I 矿带方铅矿矿石	方铅矿	3.8	
	WK90	东支沟多金属矿矿石	毒　砂	3.9	
	WK84	IIIPD3-3 辉锑矿脉	辉锑矿	4.1	
	WK58	VII矿带辉锑矿脉	辉锑矿	5.9	
	WK14	III-1 矿体辉锑矿脉	辉锑矿	1.3	
	WK89	东支沟多金属矿矿石	闪锌矿	2.4	
开荒北金矿	Shzg-4	石英脉金矿石	黄铁矿	6.1	
	Kx-200	蚀变岩金矿石	黄铁矿	3.2	
	dqg-1	黄铁矿化蚀变岩	黄铁矿	4.9	
	dqg-2	石英脉	黄铜矿	4.8	
	dqg-2	石英脉	方铅矿	3.0	
大场金矿	Dc-11	黄铁矿化蚀变岩	黄铁矿	-3.2	
	Dc-21	变砂岩	黄铁矿	-3.3	
	DCD-5	碎裂岩金矿石	黄铁矿	-4.7	
	DCD-6	泥质板岩	黄铁矿	-3.7	
东大滩锑金矿	Ddt-1	II 矿带辉锑矿矿石	辉锑矿	-1.3	
	Ddt-16	I 矿带辉锑矿矿石	辉锑矿	-4.2	
	Ddt-29	III矿带黄铁矿化变砂岩	黄铁矿	-3.0	
	Ddt-44	II 矿带千枚岩金锑矿石	黄铁矿	-0.9	
	Ddt-45	II 矿带石英脉金锑矿石	毒　砂	0.4	
	B238	IV矿带辉锑矿矿石	黄铁矿	-6.3	
	B244	II 矿带千枚岩金锑矿石	黄铁矿	-1.1	
	B245	II 矿带石英脉金锑矿石	黄铁矿	-2.0	

测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所　白瑞梅

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。

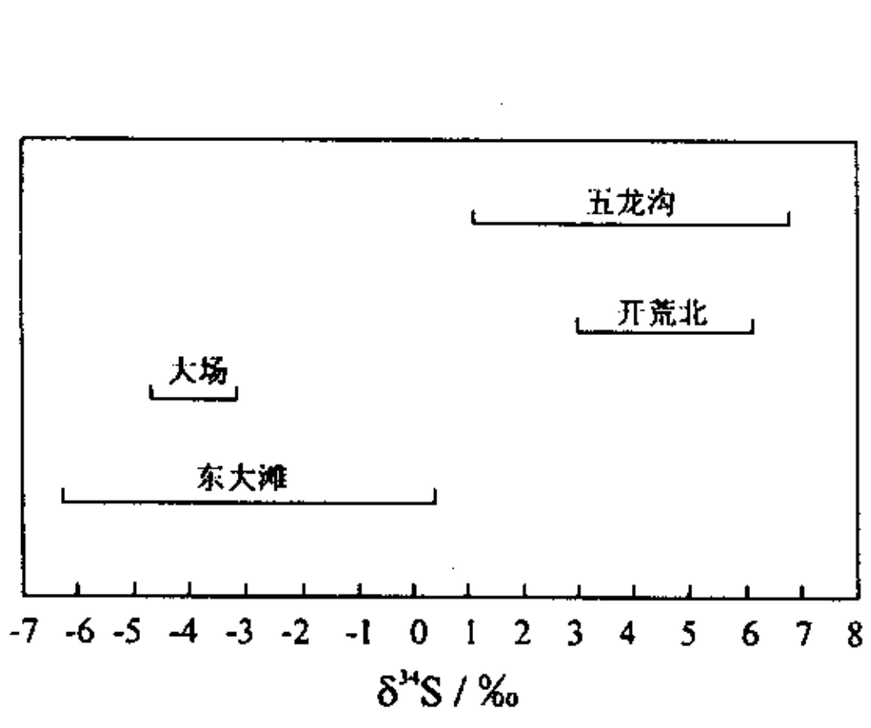


图 3-9　东昆仑地区矿床硫同位素组成对比图

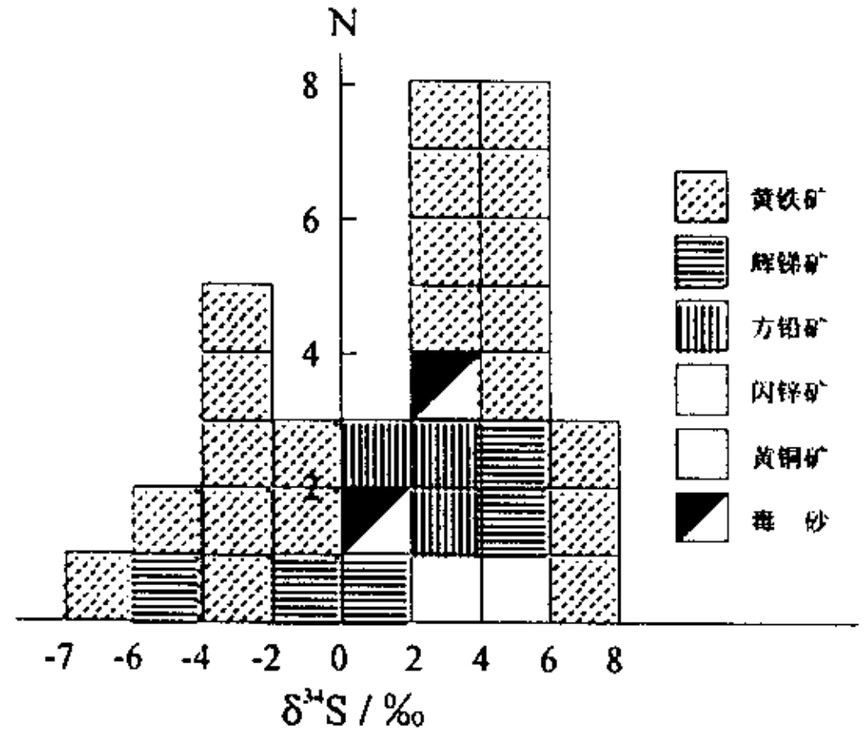


图 3-10　东昆仑地区金矿床硫同位素组成直方图

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，