

青海尖顶山锶矿床地质特征及成因分析

陈秉芳¹, 林文山¹, 白建海¹, 赵海霞¹, 李建亮², 任华¹, 白宗海¹, 付军¹

(1. 青海省地质调查院, 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012;

2. 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810001)

摘要:尖顶山天青石矿床位于柴达木盆地西北缘, 矿体主要产于上新统狮子沟组上段含碳钙质泥岩及灰岩中, 呈层状、似层状、透镜状, 矿石以原生天青石矿石为主, 品位较高, 连续性好。含矿砂岩 ΣREE 值较低, 平均为 42.73×10^{-6} , LREE/HREE 平均为 6.48; δEu 平均为 0.94, δCe 平均为 0.98; La/Yb-REE 图中含矿岩石投点于沉积岩区, 显示成矿物源具有多来源性特征; 天青石矿的形成可能与深层地下卤水及盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给紧密相关, 表明该矿床成因可能具有陆源碎屑化学沉积型特征。

关键词:尖顶山; 天青石; 稀土元素; 成矿物源; 矿床成因

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)04-0184-10

Geological Characteristics and Genetic Analysis of the Jiandingshan Strontium Deposit in Western Qaidam Basin

CHEN Bingfang¹, LIN Wenshan¹, BAI Jianhai¹, ZHAO Haixia¹,
LI Jianliang², REN Hua¹, BAI Zonghai¹, FU Jun¹

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China;

2. Qinghai Province Third Geological and Mineral Exploration Institute, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: The Jiandingshan celestite deposit is located in the northwestern margin of the Qaidam Basin. The orebodies are mainly situated with layered, layered, lenticular shapes in calcareous mudstone containing carbon and limestone from the upper member of Pliocene Shizigou group. Orebody is mainly composed of native celestite, with high grade and good spatial continuity. Ore-bearing sandstone has lower ΣREE value with an average value of 42.73×10^{-6} , its LREE/HREE ratio is 6.48, and δEu (0.94) and δCe (0.98) slightly negative anomaly. La/Yb-REE Plots denote that the ore-forming materials were derived from multiple sources with a main contribution from sedimentary rocks. The fluids for celestine formation might be derived from underground brine and peripheral continental basin. In summary, it's believed that this deposit may be had the characteristics of terrestrial detrital chemical deposition.

Keywords: Jiandingshan; celestine; REE elements; mineralization mineral; genesis

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 青海省科技计划项目“柴达木盆地北缘铌钽多金属矿成矿作用及找矿方向研究”(2016-ZJ-716), “东昆仑东段银多金属成矿规律研究与靶区优选”(2016-ZJ-719), “柴北缘战略性新兴矿产找矿突破及关键技术示范”(2018-SF-109)

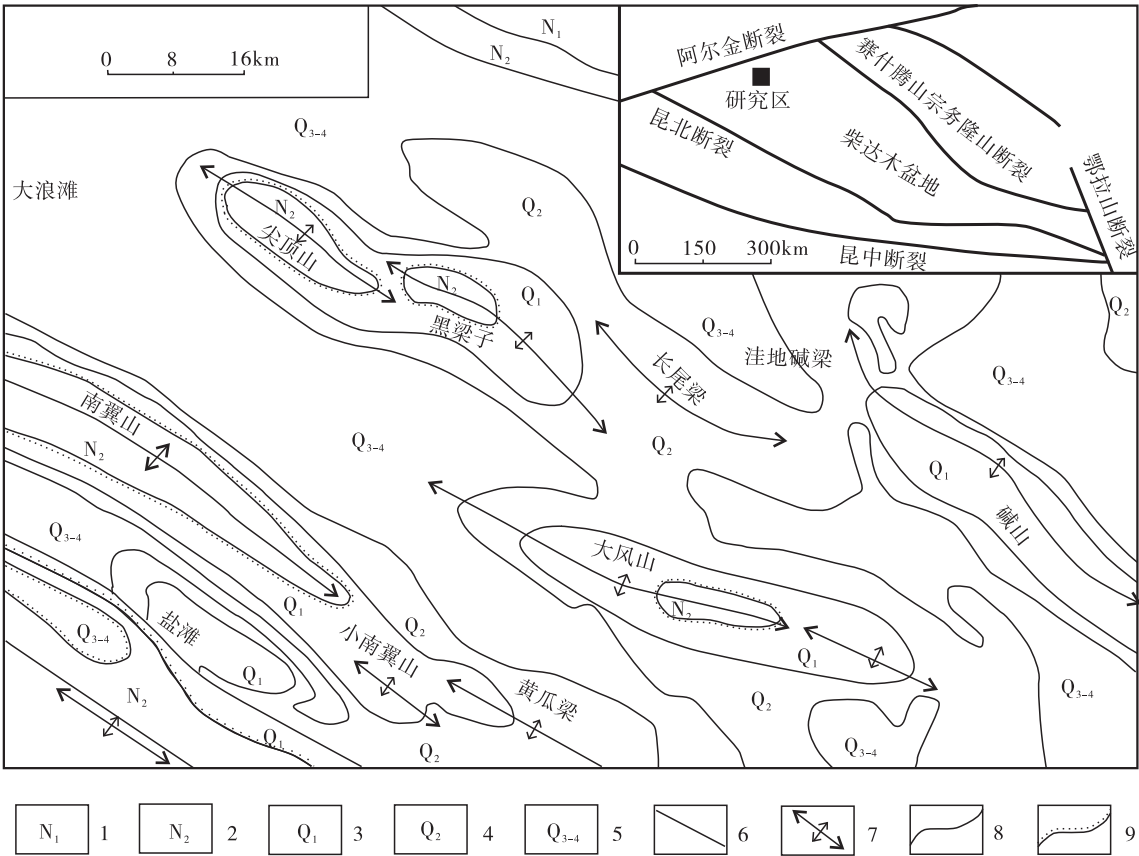
作者简介: 陈秉芳(1972-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质矿产工作。E-mail: 2573840983@qq.com

柴达木盆地西北部为青海省富含天青石矿床的矿集区,已探明天青石资源量极为丰富,除大风山、尖顶山天青石矿床外,另有碱山、油泉子等 10 余处中小型矿床或矿化点。而对柴达木盆地西北缘的天青石矿床成矿物源的认识历来存在分歧,葛文胜(2001)认为柴达木盆地西部富锑流体受强烈挤压产生水平运移,与前第三系孔隙度较大的围岩发生化学及渗滤交代作用,使富锑成矿离子浓度升高达到过饱和而在构造适宜部位沉淀成矿。深大断裂是深部岩浆卤水将富硼、锂及稀碱金属元素从深部带到地表的主要通道,深部卤水也是形成盐湖的重要物质来源(高世扬,2007)。肖荣阁(1994)认为富锑流体大量运移通过断裂通道形成热泉涌出,成矿流体的物理化学性质发生急剧变化,流体的相平衡状态被破坏,富锑流体发生卸载沉淀。柴达木盆地内已发现多处现代富锑成矿卤水,如察尔汗盐湖北侧深循环水含 Sr 较高,溢出地表后形成天青石(杨谦,1993)。笔者根据尖顶山地区

地质特征及天青石矿体、容矿围岩的稀土元素地球化学特征分析,对尖顶山地区天青石矿床成矿物质来源及成因进行了研究,将对尖顶山天青石矿床及外围找矿勘探提供基础依据。

1 区域地质概况

尖顶山天青石矿床位于青海省柴达木盆地西北缘,大地构造位置属中朝构造域的西南缘祁连加里东造山带和柴达木地块之间。柴达木盆地基底主要存在 2 组大断裂:一组呈北西西至近东西向延伸。如:控制盆地南边界的昆北断裂,控制盆地北边界的柴北缘赛什腾山-宗务隆山断裂,祁连山南缘断裂(赛南断裂)等;另一组为北东向、近南北向断裂,主要有鄂拉山断裂、塔尔丁-鱼卡断裂和格尔木-锡铁山断裂,以及盆地西缘控制性的阿尔金山南缘断裂(图 1)。这些基底深大断裂规模大,延伸远,断穿地



1. 中新统;2. 上新统;3. 早更新统;4. 中更新统;5. 晚更新统一全新统;6. 断层;7. 背斜轴迹;8. 地质界线;9. 角度不整合界线

图 1 尖顶山地区地质略图(据青海油田 1:50 万地质图修编)

Fig. 1 Geological map of Jianning mountain area

层多,深切基底,在盆地形成与演化过程中呈继承性活动,成为分割构造单元、决定赋矿地层分布、控制成矿流体运移聚散的重要因素。盆地内又被数条北西、北东东向2组断裂所切割而成若干断块,这些断块在盆地凹陷的同时发生相对运动而形成多个次一级凹陷沉积中心。据国家地震局地质研究所(2003)在盆地内通过地变形、地球化学异常、盐溶分布和地震等信息的研究,认为在盆地中东部除原已发现的北西向三湖断裂带和北北东向哑西断裂带外,还存在着北北东向锡铁山-察尔汗断裂带、近南北向达布逊湖东断裂带和近东西向团结湖断裂带等隐伏的活动断裂带,迄今均处于活动状态中,它为深层地下水和其他物质的向上运移提供了裂隙通道。随盆地不断发展演化,在喜马拉雅运动期,盆地南北缘向盆地挤压推覆,总体呈北西—南东向展布,盆地基底破碎,断裂发育,盖层产生褶皱,形成隆凹相间的地貌特征,构成一系列背斜构造带(图1)。

区域上,盆地西部出露地层主要为第三系、第四系更新统及全新统等。第三系主要由内陆湖相沉积的碎屑岩夹碳酸盐岩及硫酸盐岩等组成,天青石矿床赋矿地层主要为渐新统下干柴沟组(E_3g)、中新统上干柴沟组(N_1g)、中新统下油砂山组(N_1y)、上新统上油砂山组(N_2y)、上新统狮子沟组(N_2s^2)等,其中尖顶山天青石矿床赋矿地层主要为上新统狮子沟组(N_2s^2)及第四系下更新统七个泉组(Q_3q)等。背斜构造线呈北西向展布,地层产状平缓,一般在 5° 左右,短轴背斜呈平缓、开阔型构造,如南翼山、大风山、尖顶山、黑梁子、碱山等平坦、开阔型的短轴背斜构造。随构造挤压应力和侧向压力作用持续增加,背斜构造在轴部或附近产生次生脆性断裂,并产生北西—南东向压扭性断裂,北西向断裂为主断裂;其次为北北西—北北东向平移断层,规模相对较小,多成群出现于大风山、尖顶山、碱山、黑梁子等背斜轴部。

2 矿床地质特征

尖顶山天青石矿床位于柴达木盆地西缘2个北西向斜列式小背斜隆起构成的低山丘陵区,风蚀地貌发育,丘陵多呈北西向带状展布,地表均被数十厘米至一米厚的盐壳所覆盖,局部为风积砂所覆盖。

2.1 地层

矿区内出露地层主要为第三系上新统狮子沟组(N_2s^2)及第四系下更新统七个泉组(Q_3q)、全新统(Q_4)等。矿体主要产于上新统狮子沟组上段,另外在狮子沟组下段及七个泉组下部地层也有矿化及小矿体存在。上新统狮子沟组(N_2s^2)为一套内陆湖相碎屑、蒸发沉积岩,地层产状平缓;七个泉组(Q_3q)不整合于上新统狮子沟组之上;全新统(Q_4)不整合于下伏地层之上,为厚0.3~1 m的盐壳及风积砂堆积。据上新统狮子沟组(N_2s^2)岩性及赋矿特征,可划分为2个岩性段:下岩段(N_2s^{2-1})、上岩段(N_2s^{2-2})。

2.1.1 下岩段(N_2s^{2-1})

下岩段可进一步划分为下部层位、上部层位,下部层位岩性主要为深灰—灰黑色含碳钙质泥岩夹深灰色薄层灰岩、角砾状灰岩及透镜状、薄层天青石矿,天青石主要赋存于含碳钙质泥岩或灰岩中,层位不稳定,多呈薄层状或透镜状产出,厚度0.1~1 m,下部层位厚度大于280 m,未见底;上部层位为灰黄色、浅黄绿色钙质泥岩夹薄层灰岩及天青石矿层等组成,其中薄层灰岩局部相变为含砂灰岩、竹叶状(角砾状)灰岩,常见褐铁矿赋存于灰岩表面、裂隙或孔洞中,上部层位为富含天青石矿层位,厚度18~32 m,与下部层位呈整合接触关系。

2.1.2 上岩段(N_2s^{2-2})

上岩段划分为下部层位及上部层位,下部层位主要由石膏钙质泥岩、含石膏钙质泥岩夹石膏碎屑灰岩、白云质灰岩、白云岩、石膏鲕状灰岩及透镜状石膏矿层等组成,其中天青石矿层主要赋存于该层位的顶部及底部,顶部天青石矿层为白云质灰岩,底部为鲕状灰岩、石膏碎屑灰岩及碎屑石膏岩等组成,该层位厚度为18~23 m,与下岩段上部层位呈整合渐变过渡关系;上部层位岩性主要为石膏钙质泥岩、含石膏钙质泥岩夹薄层白云质灰岩、白云岩、石膏碎屑灰岩、石膏鲕状灰岩及钙质泥岩等,不含矿,厚度大于42 m,与下伏下部层位呈渐变过渡关系。

2.1.3 七个泉组(Q_3q)

不整合于上新统狮子沟组之上,岩性以砂质泥岩、泥岩、砂砾岩为主夹少量粉砂岩、砂岩、碳质泥岩、泥灰岩及石膏、芒硝等,厚度大于300 m。

2.2 背斜构造

尖顶山背斜浅部为典型的挤压构造,而深部为

伸展作用形成的箕状断陷(刘志宏,2008)。在靠近断层部位厚度最大,远离断层部位地层厚度逐渐减小并趋于稳定,与下盘地层的厚度基本一致。在地震剖面中,尖顶山背斜是一个断层传播褶皱,具有长而缓的南西翼,短而陡的北东翼(SUPPE J,1990)。天青石矿床位于尖顶山背斜构造之北东翼,背斜长20 km,宽约10 km,为一穹状背斜;呈北西—南东向展布,轴向 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 。两翼地层产状不对称,北东翼倾角较陡,一般为 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$,北西段达 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$;南西翼较平缓为 $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。尖顶山背斜核部出露地层为中统油砂山组(N_2y),两翼由上新统狮子沟组(N_2s)及中、下更新统(Q_1 、 Q_2)构成;SUPPE J认为(1992)狮子沟组及其以上地层,在背斜顶部被风化剥蚀,靠近背斜构造高的部位地层沉积厚度较小,轴面方向地层厚度逐渐增大,显示生长地层的特征。锆矿体主要赋存于背斜北东翼南东段的狮子沟组地层的上部。

2.3 矿体特征

天青石矿体主要产于上新统狮子沟组上段,狮子沟组下段及七个泉组下部地层也有矿化及小矿体存在。矿体上盘围岩以白云岩、鲕状白云岩、碎屑白云岩、石膏泥岩为主,下盘以泥岩、砂岩、白云岩及砂砾岩为主。矿床由8个矿体构成,即G1、G1-1、G1-2、G1-3、G2、G3、G4、G5。其中G1矿体规模最大,在其顶底部普遍存在表外矿,具分枝现象,G1长 $>2\,000\text{ m}$,斜深为 $470\sim 735\text{ m}$,最大厚度为 7.89 m ,平均厚度为 3.80 m ,平均品位为 32.92% ;G2、G3沿倾向具尖灭再现特征;G2长 800 m ,斜深为 $103.50\sim 590\text{ m}$,最大厚度为 1.94 m ,平均厚度为 1.30 m ,平均品位为 13.11% ;G3长约为 400 m ,斜深为 765 m ,最大厚度为 2.76 m ,平均厚度为 1.92 m ,平均品位为 19.03% ;G4、G5为小盲矿体,G4长 400 m ,斜深为 200 m ,最大厚度为 0.97 m ,平均厚度为 0.49 m ,平均品位为 19.45% ;G5长 400 m ,斜深为 72 m ,最大厚度为 0.97 m ,平均厚度为 0.49 m ,平均品位为 10.02% 。

综上所述,矿区内G₁为主矿体,其余7条矿体规模相对较小,矿体的形态简单,呈层状、似层状、透镜状产出,上部多裸露地表,产状平缓,向深部渐变陡,与地层产状一致,厚度变化小,品位较高,矿体连续性好,具有巨大找矿潜力。

3 矿石组构与矿石矿物

3.1 矿石类型

矿石分为原生天青石矿石和次生天青石矿石2类,以原生天青石矿石为主,占 95% 。

3.2 矿石组构

矿石结构主要有隐晶质结构、砂质-粉砂质结构、鲕粒状结构、板柱状结构;矿石构造主要为致密块状构造、角砾状构造及少量糖粒状构造等。

3.3 矿石矿物

3.3.1 原生矿石矿物

容矿围岩主要为含碳钙质泥岩、鲕状灰岩,矿石矿物主要为鲕状天青石、砂砾状天青石等。矿物中有益矿物单一,主要为天青石,次有白云石、石膏、重晶石等。

鲕状灰岩:灰白色,具鲕粒状结构,块状构造。鲕粒具同心环状结构,主要由泥晶质方解石(70%)组成,胶结物(30%)主要由石膏和泥晶方解石组成,石膏呈大片亮晶胶结鲕粒,呈孔隙式胶结类型。

鲕状天青石矿石:为灰白、灰绿色,鲕粒状结构,块状构造。鲕粒为 $50\%\sim 60\%$,多由白云石组成,核部包含有砂粒,鲕粒有真鲕、薄皮鲕、假鲕3种。外形为圆状、椭圆状。鲕径一般为 $0.1\sim 1.0\text{ mm}$,胶结物以天青石为主,石膏、砂粒少量,占 $30\%\sim 40\%$ 。天青石呈他形粒状,粒径为 $0.03\sim 0.2\text{ mm}$ 。砂粒呈次棱角、次圆状,由石英、长石、黑云母、白云母及安山岩岩屑组成,含量为 5% 左右,粒径为 $0.03\sim 0.45\text{ mm}$ 。

砂砾状天青石矿石:灰白、浅灰绿色,砂砾状结构,层状、块状构造,砂砾物质占 $60\%\sim 70\%$,砾石以石英、变质岩、火成岩为主,磨圆度较好,呈次圆或圆状,砾径为 $0.2\sim 1.5\text{ cm}$ 。胶结物占 30% 左右,以天青石为主,白云石、石膏少量。天青石为他形晶,粒度为 $0.1\sim 0.4\text{ mm}$ 。

3.3.2 次生矿石矿物

次生天青石矿仅分布于近地表处,由原生天青石矿经地表水淋滤、溶解、运移,在次级裂隙、节理、孔洞等适宜部位再充填、结晶而成。矿石质地较纯,矿物成分简单,次生天青石占 95% 以上,另有少量石膏、重晶石、方解石、白云石等;矿石矿物主要为层纹状天青石。

层纹状天青石矿石:矿石矿物主要为次生天青石,呈不同颜色的层纹平行产出,层厚不等,由数毫米到数厘米,沿裂隙两侧向中心生长,呈对称型,中心部位可见石膏层产出。

4 稀土元素特征

主要对尖顶山地区容矿围岩及含矿岩石中稀土元素地球化学特征进行分析,稀土元素分析数值见表 1。

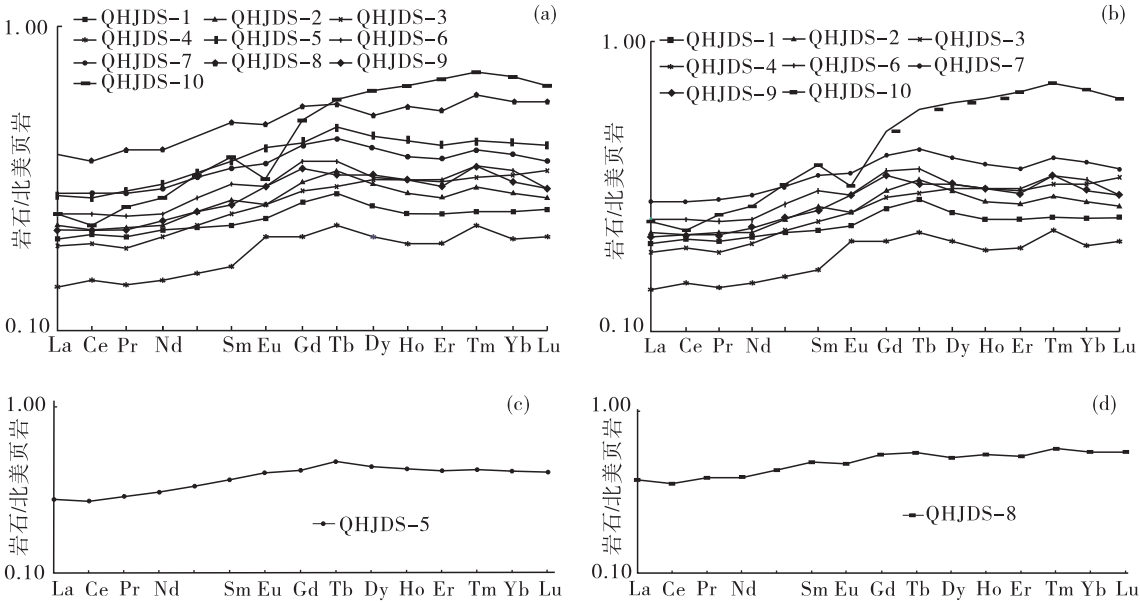
含天青石砂岩: $\Sigma\text{REE}=27.9\times10^{-6}\sim54.63\times10^{-6}$, 平均为 42.73×10^{-6} ; $\text{LREE}/\text{HREE}=3.82\sim7.73$, 平均为 6.48; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.35~0.82, 平均为 0.67; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.64~0.89, 平均为 0.81; 在天青石矿与北美页岩标准化稀土曲线图(图 2b)显示,曲线呈略向左倾趋势,显示天青石矿轻重稀土轻微分馏,具轻稀土略显亏损性特征。 δEu 为 0.73~1.11, 平均为 0.94, Eu 呈弱负异常或不显异常。陈衍景(1996)认为,稀土元素在不同的氧化还原条件下,元素的状态和元素间的分馏也会产生不同的响应,在化学沉积中,氧化环境的沉积物 ΣREE 高, Eu/Eu^* 低, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 低;还原环境的沉积物 ΣREE 低, Eu/Eu^* 高, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 高。由此可见,研究区天

青石矿 ΣREE 低,而 Eu/Eu^* 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 相对较低,可能为不同环境的产物,暗示成矿物源具有多来源性。

含砂砾岩: ΣREE 为 54.76×10^{-6} ; LREE/HREE 为 6.4; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.67; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.77; 在含矿岩石与北美页岩标准化稀土曲线图(图 2c)显示,曲线略向左倾,显示含矿岩石轻重稀土略显微分馏,具轻稀土亏损性特征; δEu 为 1.03, 铕不显异常。

含天青石砂质砾岩: ΣREE 为 72.32×10^{-6} ; LREE/HREE 为 6.62; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.68; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.79; δEu 为 0.92, Eu 呈弱负异常或不显异常;在含矿岩石与北美页岩标准化稀土曲线图上(图 2d)显示,曲线略向左倾,显示含矿岩石轻重稀土略显微分馏,具轻稀土略显亏损性特征。

ROLLINSON H R(1993)按沉积岩的质量比例计算碎屑岩中 ΣREE 多小于 100×10^{-6} , Ce 明显亏损。而研究区碎屑岩中 ΣREE 一般在 $27.9\times10^{-6}\sim72.32\times10^{-6}$, 平均为 46.89×10^{-6} ; δCe 为 0.93~1.05, 平均为 0.98, Ce 略显亏损,在含矿岩石与北美页岩标准化稀土曲线图上(图 2a)显示,曲线略向左倾, Ce 略显亏损;暗示含矿物源可能具陆缘碎屑物的成分。



a. 容矿围岩及含矿岩石; b. 含矿砂岩; c. 含砂砾岩; d. 含矿砂质砾岩

图 2 尖顶山矿区不同岩石类型稀土分配模式图

Fig. 2 REE distribution pattern map of different rock types in the Jiandingshan mine area

表 1 尖顶山地区不同类型岩石稀土元素分析结果及特征表(10⁻⁶)
Tab.1 Analytical results and Characteristic of REE elements of different types of rocks in Jiandingshan area(10⁻⁶)

样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
QHJDS-1	含天青石砂岩	7.63	16.6	1.79	7.21	1.24	0.25	1.24	0.22	1.20	0.24	0.69	0.10	0.69	0.11	6.62
QHJDS-2	含天青石砂岩	8.38	17.2	1.93	7.45	1.49	0.28	1.43	0.26	1.42	0.28	0.78	0.12	0.79	0.12	7.75
QHJDS-3	含天青石砂岩	7.20	15.4	1.64	6.84	1.33	0.28	1.35	0.23	1.46	0.31	0.87	0.13	0.91	0.15	8.24
QHJDS-4	含天青石砂岩	5.33	11.7	1.25	4.95	0.90	0.22	0.95	0.17	0.95	0.19	0.55	0.09	0.56	0.09	5.34
QHJDS-5	含砂砾岩	10.6	21.5	2.53	10.3	2.00	0.43	1.92	0.36	2.03	0.42	1.16	0.17	1.16	0.18	10.8
QHJDS-6	含天青石砂岩	9.22	19.2	2.11	8.27	1.68	0.32	1.66	0.28	1.50	0.31	0.89	0.14	0.95	0.13	8.22
QHJDS-7	含天青石砂岩	10.7	22.3	2.51	9.95	1.90	0.38	1.89	0.33	1.86	0.37	1.04	0.16	1.08	0.16	9.63
QHJDS-8	含天青石砂质砾岩	14.6	28.4	3.43	13.2	2.69	0.51	2.52	0.43	2.41	0.54	1.51	0.24	1.59	0.25	13.7
QHJDS-9	含天青石砂岩	8.11	17.0	1.89	7.76	1.44	0.32	1.60	0.25	1.51	0.31	0.85	0.14	0.87	0.13	8.11
QHJDS-10	含天青石砂岩	9.18	17.6	2.24	9.17	2.08	0.34	2.29	0.45	2.86	0.63	1.90	0.29	1.93	0.28	18.6

样品号	岩性	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La/Sm	La ₂ /Yb	Sm/Nd	Gd/Yb	(La ₂ /Yb) _N	(La ₂ /Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δEu☆	δCe
QHJDS-1	含天青石砂岩	39.21	34.72	4.49	7.73	6.15	11.06	0.17	1.80	0.82	0.89	1.09	0.95	0.95	1.04
QHJDS-2	含天青石砂岩	41.93	36.73	5.20	7.06	5.62	10.61	0.20	1.81	0.78	0.82	1.10	0.90	0.90	0.99
QHJDS-3	含天青石砂岩	38.10	32.69	5.41	6.04	5.41	7.91	0.19	1.48	0.58	0.79	0.90	0.98	0.98	1.03
QHJDS-4	含天青石砂岩	27.90	24.35	3.55	6.86	5.92	9.52	0.18	1.70	0.70	0.86	1.03	1.11	1.12	1.05
QHJDS-5	含砂砾岩	54.76	47.36	7.40	6.40	5.30	9.14	0.19	1.66	0.67	0.77	1.00	1.03	1.03	0.96
QHJDS-6	含天青石砂岩	46.66	40.80	5.86	6.96	5.49	9.71	0.20	1.75	0.72	0.80	1.06	0.90	0.90	1.00
QHJDS-7	含天青石砂岩	54.63	47.74	6.89	6.93	5.63	9.91	0.19	1.75	0.73	0.82	1.06	0.94	0.94	0.99
QHJDS-8	含天青石砂质砾岩	72.32	62.83	9.49	6.62	5.43	9.18	0.20	1.58	0.68	0.79	0.96	0.92	0.92	0.93
QHJDS-9	含天青石砂岩	42.18	36.52	5.66	6.45	5.63	9.32	0.19	1.84	0.69	0.82	1.11	0.98	0.99	1.00
QHJDS-10	含天青石砂岩	51.24	40.61	10.63	3.82	4.41	4.76	0.23	1.19	0.35	0.64	0.72	0.73	0.73	0.90

注:样品数据由国家地质实验测试中心于 2015 年完成。

5 物源分析

(1)稀土元素(REE)的含量、配分模式和一些重要的稀土元素参数对探讨沉积物的成因、物源具有重要意义(徐方建,2009)。蒋富清(2008)认为稀土元素在表生环境中的化学性质非常稳定,其组成

及分布模式受风化作用、搬运过程、以及沉积和成岩作用的影响很小,因而常被用作物源示踪剂。将尖顶山地区不同类型样品投在 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ 图解(图 3a)中,投点显示具有正相关关系;而在 $\delta\text{Ce}-\Sigma\text{REE}$ 图解(图 3b)中显示,投点具有负相关关系。表明研究区成矿物源组成复杂,具有多来源性特征,且显示在成矿期后受到后期成岩作用、构造作用的影响。

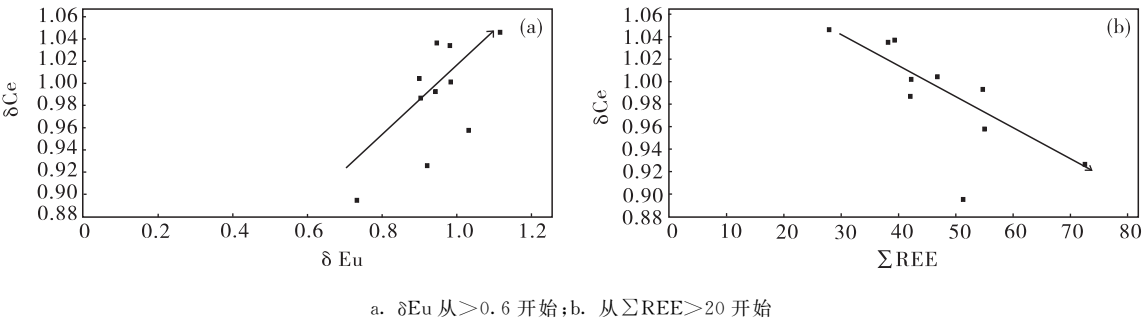


图 3 尖顶山地区 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}-\Sigma\text{REE}$ 相关性图解

Fig. 3 Correlation between $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ and $\delta\text{Ce}-\Sigma\text{REE}$ of the Jianding mountain area

(2)沉积岩中稀土元素的分布、分配与其形成的环境密切相关(郭华,2006;姚纪明,2009);元素 Ce、Eu 的异常反映在 δEu 、 δCe 值的变化上, δEu 为 Eu 异常系数,可灵敏的反映体系内的地球化学状态,可作为鉴别物质的来源的重要参数(TAYLOR S R, 1985)。金秉福(2003)认为稀土元素含量的高低,尤其是 Ce 含量的变化,已成为判别古沉积环境的良好标志。尖顶山地区各类岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $0.35\sim 0.82$,平均为 0.67 ; δEu 平均为 0.94 ,Eu 呈弱负异常或不显异常; δCe 平均为 0.98 ,Ce 略显弱亏损性特征。杨守业(1999)认为 REE 在沉积过程中以碎屑态、吸附态及溶解态等形式存在,而以碎屑态最稳定。在研究区 $\text{La}/\text{Yb}-\text{REE}$ 图(乔海明,2011)(图 4)中显示,尖顶山含矿岩石投点于沉积岩区,而大风山含矿岩石投点于沉积岩区外围(李善平,2012),表明处于盆地边缘的尖顶山地区天青石矿、含矿岩石可能来源于陆缘碎屑层,容矿围岩与陆缘碎屑物质流体的补给关系密切。

由此可见,研究区成矿物质可能更多来源于陆缘碎屑物质,富铈流体受强烈挤压产生水平运移,与孔隙度较大的围岩发生化学及渗滤交代作用,在构造适宜部位沉淀成矿。

(3)稀土元素在化学沉积中,还原环境的沉积物 ΣREE 低,氧化环境的沉积物 ΣREE 高(陈衍景,

1996)。研究区各类岩石 ΣREE 一般为 $38.1\times 10^{-6}\sim 54.63\times 10^{-6}$,平均为 46.89×10^{-6} ,远小于 100×10^{-6} ;表明成矿物质具有还原环境的特性,暗示尖顶山地区铈矿流体可能来源于深部断裂卤水。研究区周边深大断裂较为发育,且被深大断裂所限,有深部卤水补给的可能性。自中新世以来,印度板块与欧

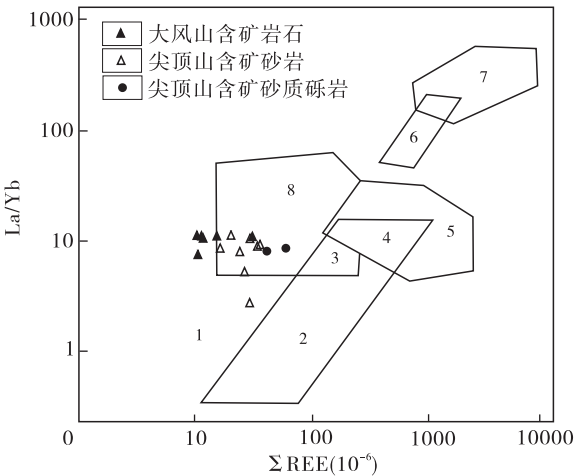


图 4 尖顶山矿区不同类型岩石 $\text{La}/\text{Yb}-\text{REE}$ 图解
(底图据乔海明,2011)

Fig. 4 $\text{La}/\text{Yb}-\text{REE}$ diagram of different rock types in the Jianding mountain mine area

亚板块碰撞挤压作用使得柴达木盆地内部分基底断裂复活,而且产生了新的张性断裂,这些断裂多呈北西向展布(张明利,1999;金之钧,1999)。金强(2003)认为柴达木盆地深大断裂提供富含稀有元素的深层卤水,膏盐沉积物富含稀有元素,深层卤水是断裂活动带热液溶蚀周围各种岩类形成的。而柴达木盆地西部第三纪在狮子沟、芒崖一带存在深大断裂活动,存在深层卤水形成的条件,同时干旱气候又使盆地存在强烈的蒸发作用。肖荣阁(2001)认为当成矿流体水平运移至张性断裂、背斜轴部的压扭性断裂等构造线上时,沿断裂上升,富矿元素流体大量运移通过断裂通道形成热泉涌出,成矿流体的物理化学性质发生急剧变化,流体的相平衡状态被破坏,富矿元素流体发生卸载沉淀。由此可见,天青石矿的形成可能与深层地下卤水的补给密切相关,深层地下卤水沿深大断裂持续补给,在深大断裂表层附近构造适宜部位富集成矿。

综上所述,尖顶山地区天青石矿的形成可能与深层地下卤水及盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给紧密相关。

6 矿床成因

尖顶山锑矿床位于柴达木盆地西北缘,自侏罗纪以来,盆地相对下沉,四周隆起形成高山逐渐与海洋隔离构成内陆封闭盆地。中新世柴达木地区处于高山深盆环境,以蚀源基岩风化作用为主,多源的锑汇入柴达木古湖西部,为锑成矿提供了物质条件。富锑热卤水在软沉积物或通道旁的围岩中经交代、充填和动力作用成矿,也可以发生沸腾和泥火山喷发形成地表热泉(HOOPER E C D,1991)。朱朝良(2009)认为柴达木盆地内的天青石矿床是典型的内陆湖泊化学沉积型-改造富集型矿床;薛天星(1999)据大风山天青石矿床的成矿作用与成矿地质特征,认为大风山天青石矿床成因为陆相湖泊化学沉积型。葛文胜(2001)认为大风山天青石矿床产于第三系至第四系陆源碎屑-化学岩系中,具有明显的热液沉积特征,是已知的世界上成矿时代最年轻的层控型大陆热水沉积天青石矿床。在正常沉积条件下,随蒸发盆地中盐湖卤水至天青石析出沉积时,盐湖卤水蒸发沉积顺序为:碳酸盐(白云石、天青石)—石膏等,天青石赋存于湖盆中心的碳酸盐-硫酸盐沉积

相带内;矿石主要为天青石、石膏等,呈晶粒状、碎屑状及鲕状结构,具块状、层状、细脉状构造。

尖顶山地区受中上更新世时期新构造运动的影响,使地层褶皱形成背向斜构造,在区域内较为发育,富锑流体受强烈挤压产生水平运移,与孔隙度较大的围岩发生化学及渗滤交代等作用溶解后,在盆地凹陷或其他适宜部位沉积沉淀富集成矿。部分深部富锑流体沿盆地内次生断裂运移至盆地边缘及地形适宜地区逐渐富集,在运移过程中,通过减压致裂、沸腾而形成晶洞、巢孔及孔洞等构造,在渗滤、交代、充填、沉淀等作用下形成网脉状、纹层状、鞘状、放射状、针状等次生天青石矿脉及矿体。尖顶山锑矿床主要赋矿地层为第三系上新统狮子沟组,天青石矿主要赋存于下岩段深灰-灰黑色含碳钙质泥岩夹深灰色薄层灰岩、角砾状灰岩中,层位不稳定,多呈薄层状、似层状或透镜状产出,厚度为0.1~1m,厚度变化小,品位较高,矿体连续性好。肖荣阁(2001)认为海相热水沉积中常见重晶石与硬石膏岩,而陆相热水沉积则以天青石和石膏为主,硫酸盐的结晶沉积温度低于碳酸盐,具低温热水沉积岩特征。而尖顶山地区矿石主要为天青石、石膏等,其形成可能与深层地下卤水补给密切相关。在天青石矿的形成过程中,处于盆地西部边缘的尖顶山地区,盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给作用可能更为显著。

综上所述,尖顶山矿区在高山深盆环境、气候持续炎热及干旱等条件下,蚀源基岩风化作用为锑成矿提供了部分物源;矿的形成可能与深层地下卤水及盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给紧密相关。一方面,盆地周边深大断裂较为发育,且可能与盆地内部次级断裂存在流体循环,深层地下卤水沿深大断裂持续补给,在盆地西部构造适宜部位富集成矿;另一方面,表层富锑流体受强烈挤压产生水平运移,与孔隙度较大的围岩发生化学及渗滤交代等作用溶解后,在盆地凹陷或其他适宜部位沉积沉淀,形成天青石矿;其中盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给作用可能更为显著。因此,尖顶山锑矿成因可能具有陆源碎屑化学沉积型矿床特征。

7 结语

(1)尖顶山锑矿床位于中朝构造域的西南缘祁连加里东造山带和柴达木地块之间,由8个矿体构

成,天青石矿体主要产于上新统狮子沟组上段,矿体呈层状、似层状、透镜状产于含碳钙质泥岩中,形态简单,厚度变化小,品位较高,连续性好。

(2)含矿砂岩 ΣREE 值较低,平均为 42.73×10^{-6} , LREE/HREE 平均为 6.48, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 平均为 0.81,在标准化稀土曲线图中曲线略向左倾,具轻稀土略显亏损性特征;各类岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.35~0.82, δEu 平均为 0.94, δCe 平均为 0.98, Eu/Ce 呈弱负异常或不显异常;在 $\text{La}/\text{Yb}-\text{REE}$ 图中显示,含矿岩石投点于沉积岩区,反映尖顶山地区天青石矿的形成可能与深层地下卤水及盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的活动相关。

(3)尖顶山锆矿的形成一方面与深层地下卤水沿深大断裂持续补给有关,在盆地西部构造适宜部位富集成矿;另一方面盆地周缘陆缘碎屑富锆流体与围岩发生化学及渗滤交代等作用溶解后,在适宜部位形成天青石矿;尖顶山锆矿可能与深层地下卤水及盆地周缘陆缘碎屑物质富矿流体的补给紧密相关,后者补给作用可能更为显著;尖顶山锆矿成因可能具有陆源碎屑化学沉积型矿床特征。

参考文献(References):

葛文胜,蔡克勤. 柴达木盆地西北部锆矿成矿系统研究[J]. 现代地质,2001,15(1):53-59.

GE Wensheng, CAI Keqin. System of strontium mineralization in northwestern Qaidam Basin[J]. Modern Geology, 2001, 15(1): 53-59 (in Chinese with English abstract).

高世扬,宋彭生,夏树屏. 郑绵平盐湖化学—新类型硼锂盐湖[M]. 北京:科学出版社,2007,20-59.

GAO Shiyang, SONG Pengsheng, XIA Shuping. Salt Chemistry-new types of lithium boron salt lake [M]. Beijing: Science Press,2007,20-59.

肖荣阁,杨忠芳,杨卫东,等. 热水成矿作用[J]. 地学前缘, 1994,1(4):140-147.

XIAO Rongge, YANG Zhongfang, YANG Weidong, et al. Hydrothermal mineralizing process[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1994,1(4):140-147(in Chinese with English abstract).

杨谦,吴必豪,王绳祖,等. 察尔汗盐湖钾盐矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1993,188-189.

YANG Qian, WU Bihao, WANG Shengzu, et al. Deposit geology of potash in the Chaerhan salt Lake [M]. Beijing:

Geological Publishing House, 1993,188-189(in Chinese with English abstract).

刘志宏,杨建国,万传彪,等. 柴达木盆地北缘地区中生代盆地性质探讨[J]. 石油与天然气地质,2004,25(6): 620-625.

LIU Zhihong, YANG Jianguo, WAN Chuanbiao, et al. Nature of Mesozoic basins in the northern edge of Qaidam basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 620-625(in Chinese with English abstract).

陈衍景,邓健,胡桂兴. 环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约[J]. 地质地球化学,1996,3:97-104.

CHEN Yanjing, DENG Jian, HU Guixing. environment on sediment distribution patterns of trace elements and constraints [J]. Geological and Geochemical, 1996, 3: 97-104(in Chinese with English abstract).

徐方建,李安春,徐兆凯,等. 东海内陆架沉积物稀土元素地球化学特征及物源意义[J]. 中国稀土学报,2009,27(4):574-583.

XU Fangjian, LI Anchun, XU Zhaokai, et al. Inner shelf sediment REE geochemistry Provenance significance [J]. Chinese Rare Earth Society, 2009, 27 (4): 574-583 (in Chinese with English abstract).

蒋富清,周晓静,李安春,等. $\delta\text{EuN}-\Sigma\text{REEs}$ 图解定量区分长江和黄河沉积物[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2008,38(11): 1460-1469.

JIANG Fuqing, ZHOU Xiaojing, LI Anchun, et al. $\Delta\text{EuN}-\Sigma\text{REEs}$ illustrations quantitative distinction between the Yangtze and Yellow sediments [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38 (11): 1460-1469 (in Chinese with English abstract).

郭华,夏斌,王润红,等. 渤海湾盆地阳信地区古近纪玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学,2006,35(3):227-239.

GUO Hua, XIA Bin, WANG Runhong, et al. Bohai Bay Basin yangxin Paleogene basalt geochemistry and geological significance [J]. Geochemistry, 2006, 35 (3): 227-239(in Chinese with English abstract).

姚纪明,于炳松,陈建强,等. 中扬子北缘上侏罗统-白垩系沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J]. 地球化学, 2009,38(3):231-241.

YAO Jiming, YU Binsong, CHEN Jianqiang, et al. in the northern margin of Yangtze Upper Jurassic-Cretaceous sedimentary geochemistry and tectonic background analysis [J]. Geochemistry, 2009,38 (3): 231-241(in Chinese with English abstract).

金秉福,林振宏,季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球

- 化学记录释读[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 99-106.
- JIN Binfu, LIN Zhenhong, JI Fuwu. Marine depositional environment and source element geochemical record Interpretation [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 99-106(in Chinese with English abstract).
- 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 164-167.
- YANG Shouye, LI Congxian. REE tracer Provenance Research Progress [J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(2): 164-167(in Chinese with English abstract).
- 乔海明, 闫周让, 章金彪, 等. 吐哈盆地十红滩锆矿床稀土元素地球化学特征浅析[J]. 地质论评, 2011, 57(1): 73-81.
- QIAO Haiming, YAN Zhourang, ZHANG Jinbiao, et al. Shihongtan Tuha Basin REE geochemistry of uranium deposits Analysis [J]. Geological Review, 2011, 57(1): 73-81(in Chinese with English abstract).
- 李善平, 谢智勇, 李小雪, 等. 青海大风山天青石矿稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. 稀土, 2013, 34(1): 31-41.
- LI Shanping, XIE Zhiyong, LI Xiaoxue, et al. REE geochemical characteristics and provenance analysis of the Dafengshan celestite deposit, Qinghai province [J]. Rare Earth, 2013, 34(1): 31-41(in Chinese with English abstract).
- 张明利, 金之钧, 汤良杰. 柴达木盆地中新生代构造应力场特征[J]. 地球学报, 1999, 20(增刊): 74-76.
- ZHANG Mingli, JIN Zhijun, TANG Liangjie. Qaidam Basin in the Cenozoic tectonic stress field [J]. Earth Science, 1999, 20(Suppl.): 74-76(in Chinese with English abstract).
- 金之钧, 张明利, 汤良杰. 柴达木盆地中-新生代构造演化[J]. 地球学报, 1999, 20(增刊): 68-72.
- JIN Zhijun, ZHANG Mingli, TANG Liangjie. Qaidam basin-Cenozoic tectonic evolution[J]. Earth Science, 1999, 20(Suppl.): 68-72(in Chinese with English abstract).
- 金强. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩微量元素组成及其地球化学特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 1-5.
- JIN Qiang. Western Qaidam Basin Tertiary evaporites trace elements and their geochemical characteristics[J]. Petroleum University (Natural Science), 2003, 27(2): 1-5(in Chinese with English abstract).
- 肖荣阁, 张汉城, 陈卉泉, 等. 热水沉积岩及矿物岩石标志[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 379-386.
- XIAO Rongge, ZHANG Hanchen, CHEN Huiquan, et al. Hot rocks and logo of minerals rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 379-386(in Chinese with English abstract).
- 朱朝良. 柴达木盆地天青石矿成矿地质特征及开发利用优势[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2009, 4: 55-57.
- ZHU Chaoliang. Geology and exploitation of advantages of celestite mineralization in the Qaidam Basin[J]. China Non-metallic Minerals Industry Guide, 2009, 4: 55-57(in Chinese with English abstract).
- 薛天星. 中国(天青石)锆矿床概述[J]. 化工矿产地质, 1999, 21(3): 141-149.
- XUE Tianxing. Overview of strontium deposits in China (celestite) [J]. Chemical Industry Mines and Geology, 1999, 21(3): 141-149(in Chinese with English abstract).
- SUPPE J, CHOU G T, HOOK S C. Rate of folding and faulting determined from growth strata[A]. MCCLAY K R. Thrust tectonics [C]. New York: Chapman & Hill, 1992, 105-121.
- SUPPE J, MEDWEDEFF D A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 1990, 83(3): 409-454.
- ROLLINSON H R. Using Geochemical Data[M]. Lonman Scientific & Technical, 1993, 21-49.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985, 57-114.
- HOOPEER E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments [J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(2): 181-196.