

文章编号: 0258-7106(2013)01-0148-09

青海大风山锶矿床中天青石的成分特征*

孙艳^{1,2}, 刘喜方¹, 王瑞江¹, 陈振宇¹, 李建康¹, 李善平³, 赵芝¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2 中国地质大学, 北京 100083; 3 青海省地质调查院, 西宁 青海 3810012)

摘要 青海大风山是中国典型的陆相碳酸盐-硫酸盐沉积组合锶矿床, 也是中国目前储量最大的锶矿床。文章对大风山矿床中不同产状的天青石进行了系统的电子探针测试, 分析归纳了不同类型矿石中天青石的成分变化规律, 发现同心圆状天青石中的 SrO 含量最高, 其次是细纤维状、花朵状、钟乳状、假层纹状、粗纤维状天青石, 隐晶质天青石含量最低。通过与江西省萍乡包公庙、宜春慈化、湖南浏阳永和海相碳酸盐沉积组合锶矿床、重庆大足、玉峡及干沟等海相碳酸盐-硫酸盐沉积组合锶矿床、云南金顶硫化物-天青石层控伴生锶矿床天青石的对比, 总结了不同类型矿床中天青石的特征, 指出青海大风山天青石矿床成分简单, 除 SrSO₄ 较高外, 其余均相对较低, 有利于碳酸锶的提取和回收, 具有很高的工业价值。

关键词 地球化学; 成分特征; 天青石; 青海大风山

中图分类号: P618.78

文献标志码: A

Compositional characteristics of celestite in Dafengshan strontium deposit, Qinghai Province

SUN Yan^{1,2}, LIU XiFang¹, WANG RuiJiang¹, CHEN ZhenYu¹, LI JianKang¹, LI ShanPing³ and ZHAO Zhi¹
(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 3810012, Qinghai, China)

Abstract

The Dafengshan strontium ore deposit in Qinghai Province is a typical continental facies carbonate-sulfate deposit with the largest reserves of celestite in China. The authors studied the strontium component of celestites with different modes of occurrence from the Dafengshan strontium ore deposit by using the electron microprobe analysis and detected the variation regularity of the composition. It is discovered that the concentric circle-shaped celestite has the highest content of SrO, followed by fine fiber-shaped, flower-shaped, stalactitic, pseudo-laminated and crude fiber-shaped ones. The cryptocrystalline celestite has the lowest content of SrO. Based on a comparison with other types of celestite ore deposits such as Baogongmiao and Cihua in Jiangxi, Yonghe in Hunan, Dazu, Yuxia and Gangou in Chongqing and Jinding in Yunnan, the authors summarized the characteristics of different types of celestite deposits and pointed out that the Dafengshan strontium ore deposit has high industrial value. The Dafengshan strontium ore deposit is rich in SrSO₄ and poor in other useless components, and this is beneficial to the extraction and recovery of strontium carbonate.

Key words: geochemistry, characteristics of composition, celestite, Dafengshan in Qinghai

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011220803、1212011120989、1212010633903)的资助

第一作者简介 孙艳, 女, 1981年生, 助理研究员, 构造地质学。Email: sunyan517@163.com

收稿日期 2012-06-02; 改回日期 2012-12-27。秦思婷编辑。

天青石的主要化学成分是 SrSO_4 , 主要见于白云岩、石灰岩、泥灰岩和含石膏黏土等沉积岩中, 目前是提取锶的主要矿物原料(地质矿产部地质词典办公室, 2005; 邵厥年等, 2010)。中国天青石资源丰富, 已探明的天青石矿床以大型、特大型单一锶矿为主, 储量约占总储量的 87%, 其中, 以青海大风山矿床规模最大, 约占全国储量的 60% (薛天星, 1999)。大风山天青石矿床位于柴达木盆地西缘, 其天青石储量居全国首位(张兆鹏等, 1992; 廖雪珍等, 2007)。目前, 发达国家对天青石及锶化合物的需求量逐渐增加, 美国在 2011 年消耗 18 400 t, 比 2010 年增加 77% (Mineral Commodity Summaries, 2012)。但国内外对天青石的相关研究还较少, 本文对青海大风山锶矿中天青石的时空分布、成分及成矿条件的关系进行研究, 并与不同成因类型、矿床类型的天青石成分进行对比, 有助于深化对大风山天青石矿床成矿机制及富集规律的认识, 为合理利用我国优势的锶资源提供科学依据。

1 矿床地质概况

大风山锶矿床位于青海省柴达木盆地西部, 属海西州茫崖花土沟镇管辖。矿床由 4 个矿区组成, 东西长 20 km, 南北平均宽 4 km, 面积达 80 km², 广布第三系、第四系陆湖相沉积的碎屑岩、化学岩和风、洪积砂、砾层等(图 1)。该矿床位于古亚洲成矿域昆仑成矿省柴达木盆地锂硼钾钠镁盐类-石膏-石油-天然气成矿区, 属盆地内部强烈沉降盐湖带中部大浪滩-察尔汗盐湖亚带(徐志刚等, 2008)。盆地被东昆仑山、南祁连山和阿尔金山所包围, 区内构造为舒缓短轴复式背斜构造, 背斜轴向 290°。矿床成因典型的内陆湖泊化学沉积型矿床。矿床形成于干燥气候条件下的内陆滨浅湖环境中, 成矿物质主要来源于周边山系含锶水的补给及少量深部富锶的油田水。受蒸发作用, 湖水浓缩咸化, 湖水中锶浓度增大致硫酸锶饱和时, 天青石沉淀, 与碳酸盐、黏土矿物等混杂堆积形成原始天青石矿层(林文山等, 2005)。

2 天青石的产出特点

大风山矿床以板状、层状矿体为主, 矿体延伸大, 但埋藏较浅, 多在 20 m 以内, 矿体平均厚度为 2~4 m^{①②}。

大风山天青石矿床产出 2 种类型的天青石: 原生天青石(图 2a)和次生天青石(图 2b~2f)。其中, 次生天青石品位较高, 矿石 $\omega(\text{SrSO}_4)$ 一般在 90% 以上。本次采集的原生天青石样品主要为角砾状矿石(图 2a), 呈浅灰色, 角砾多为扁平的板状, 并近似平行分布。板状矿石长径相差较大, 从 1 cm 至十几 cm, 宽度在 2~5 cm 之间。次生天青石矿石主要有假层纹状矿石、钟乳状矿石、同心圆形矿石、笛管状矿石、纤维状矿石共 5 类。假层纹状矿石由白色次生天青石相间分布构成假层纹(图 2b); 钟乳状矿石由白色次生天青石填充于晶洞之中形成(图 2c), 质纯, 硫酸锶的含量高; 同心圆状矿石由次生天青石构成同心圆状(图 2d), 其半径一般为数 cm 至十几 cm, 核部呈放射状, 常与假层纹状伴生; 笛管状矿石系由断面呈放射状的次生天青石圆柱状群体紧密排列而成, 因外形酷似笛管珊瑚而命名, 圆柱直径一般为 3~5 mm, 中心常有一柱形小孔(图 2e); 纤维状矿石由垂直裂隙壁生长的纤维状白色次生天青石和原生矿石组成(图 2f)。天青石晶体常沿(001)发育成板状, 有时沿 a 轴或 b 轴延伸, 呈长柱状, 横切面呈菱形, 集合体通常呈粒状、花朵状、纤维状。单偏光(图 3)下, 天青石晶体呈无色, 正中突起, 干涉色一级黄白, 平行消光, 正延性。形态因切面方位而异, 以长柱状或菱形常见(常丽华等, 2006)。

在大风山矿山原采坑中的一个纵向剖面上进行了系统采样, 剖面高约 7 m, 平均采集 10 个样品, 自上而下为盐壳、角砾状矿石、晶洞及脉发育的角砾状矿石、板状(柳叶状)角砾矿石、似层纹状天青石矿石、纤维状天青石矿石、角砾状天青石、晶洞发育的似层纹状天青石、钟乳状天青石, 底板为钙质泥岩。在采坑内, 上部以原生角砾状矿石为主(-3.5~0 m), 采

① 青海省第一地质矿产勘查大队, 青海省科学技术情报研究所. 1994. 青海省柴达木盆地西北部锶资源评价综合研究. 200 页. 内部资料.

② 青海省第一地质矿产勘查大队. 1996. 青海省花土沟镇大风山锶矿田 I、II、III 矿区详查地质报告. 66 页. 内部资料.

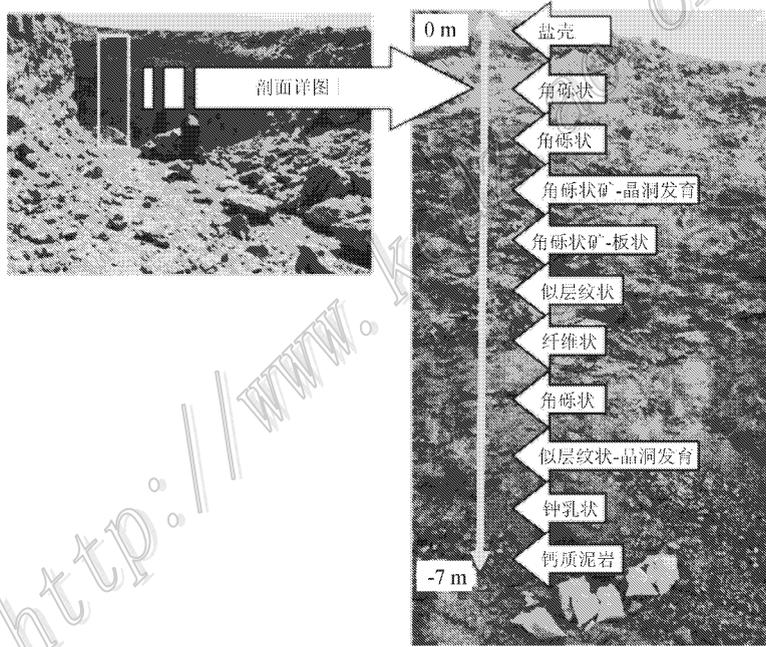
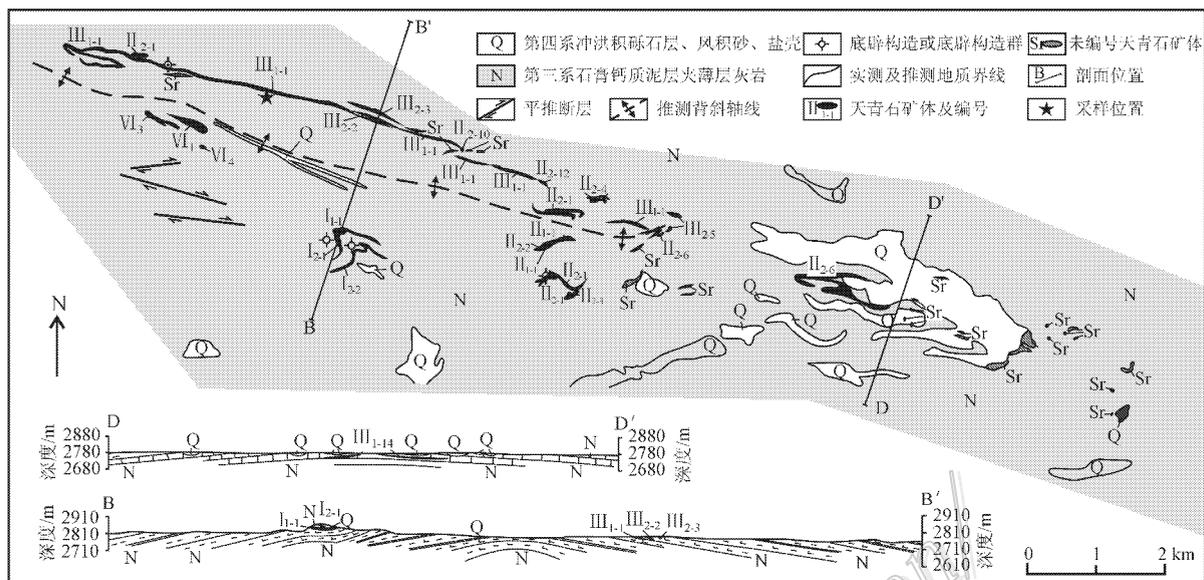


图1 青海省大风山天青石矿床地质图^①及采样位置图(照片为露天开采后采样剖面)

Fig. 1 Geological map of the Dafengshan celestite deposit in Qinghai, showing sampling locations (the photo is the sampling profile after the openpit mining)

坑下部以次生天青石为主(-7~-3.5 m),厚约3 m,矿体较薄。

3 天青石的化学成分特征

本次天青石电子探针分析在中国地质科学院矿

产资源研究所电子探针实验室完成。仪器型号为JEOL JXA-8230型,加速电压15 kV,探针电流20 nA,束斑5 μm,探测极限为100×10⁻⁶。天青石中SrSO₄的含量很高,测量精度可信(陈振宇等,2006)。

大风山矿床中天青石成分分析结果表明,不同类型的天青石成分明显不同(表1),*w*(SrO)变化

^① 青海省第一地质矿产勘查大队,青海省科学技术情报研究所,1994.青海省柴达木盆地西北部锶资源评价综合研究,200页,内部资料。

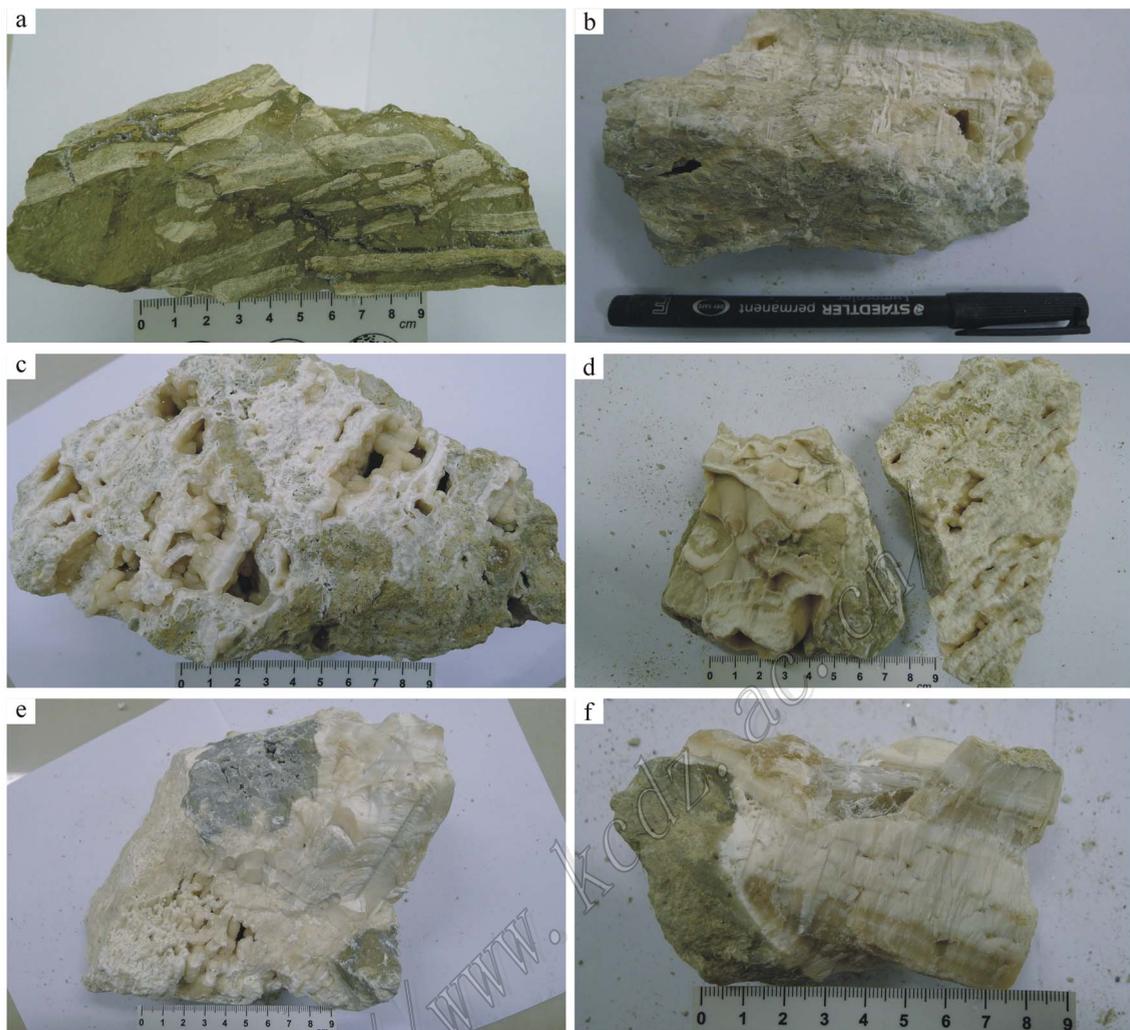


图 2 青海大风山天青石矿石类型

a. 角砾状原生天青石；b. 假层纹状天青石矿石；c. 钟乳状天青石矿石；d. 同心圆形天青石矿石；e. 笛管状天青石矿石；f. 纤维状天青石矿石

Fig. 2 Different types of celestite in the Dafengshan deposit in Qinghai

a. Brecciform primary celestite; b. Pseudo-laminated celestite; c. Stalactitic celestite; d. Concentric circle-shaped celestite; e. Flute-shaped celestite; f. Fiber-shaped celestite

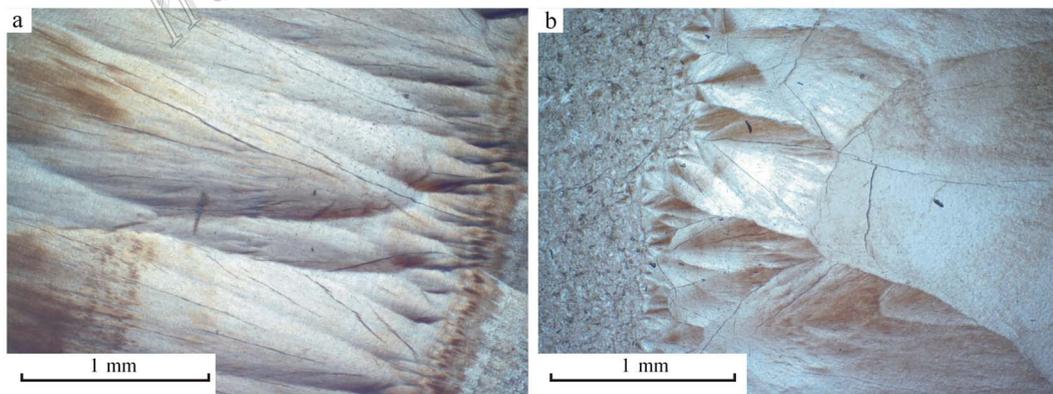


图 3 单偏光镜下天青石晶体

a. 纤维状集合体的天青石；b. 花朵状集合体的天青石

Fig. 3 Celestite crystal under polariscope

a. Fibrous aggregate celestite; b. Flower aggregate celestite

表 1 青海大风山天青石电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of celestite from the Dafengshan ore deposit

序号	点号	$\alpha(B)\%$														
		SiO ₂	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	Cr ₂ O ₃	NiO	SrO	SO ₃
1	dfs-1-4.5	0.002	0	0	0	0.022	0.206	0.009	0	0	0	0.049	0.085	0.026	54.939	43.554
2	dfs-1-4.6	0.077	0	0	0.042	0.040	0.242	0.056	0.012	0	0	0	0.148	0	53.619	42.825
3	dfs-1-4.7	0	0	0.060	0.003	0.035	0.221	0.002	0.017	0	0	0.013	0.097	0	53.372	42.679
4	dfs-kk-4-1	0	0.025	0	0.029	0.015	0.381	0.089	0.010	0	0	0.109	0.025	0	54.434	43.167
5	dfs-kk-4-2	0.042	0.063	0.054	0	0.005	0.279	0.049	0.017	0	0	0.128	0	0	54.192	43.866
6	dfs-kk-3-1.1	0	0.004	0	0.009	0.132	0.206	0.044	0	0	0	0.125	0.100	0	54.222	43.633
7	dfs-kk-3-1.2	0.016	0	0.014	0.042	0.023	0.759	0.039	0	0	0.004	0.005	0.301	0	53.826	42.988
8	dfs-kk-3-1.3	0.002	0	0.068	0.005	0.008	0.226	0.052	0	0.036	0	0.117	0.117	0.028	54.778	43.805
9	dfs-kk-3-1.4	0	0	0.014	0.001	0.034	0.319	0.033	0	0	0	0.177	0.117	0	53.601	43.419
10	dfs-kk-3-1.5	0.016	0	0	0	0.055	0.315	0.075	0.011	0	0	0.289	0.210	0	55.97	43.875
11	dfs-22-2-1.1	0.059	0	0.063	0	0.023	0.251	0.034	0.020	0.005	0	0.064	0.024	0	54.477	43.492
12	dfs-22-2-1.2	0.009	0.008	0.025	0	0	0.334	0.004	0	0	0	0.162	0	0.008	54.723	43.450
13	dfs-22-2-1.3	0	0	0.016	0	0	0.419	0.082	0	0	0	0.034	0.017	0	55.431	42.918
14	dfs-22-2-1.4	0.092	0.004	0	0.015	0.070	0.285	0.076	0.003	0	0	0.080	0.018	0	54.431	43.024
15	dfs-22-2-2.1	0	0	0	0.003	0.012	0.281	0.024	0	0	0	0.037	0.011	0	55.014	43.609
16	dfs-22-2-2.2	0.160	0.028	0.063	0.002	0.078	0.262	0.013	0	0.005	0	0.050	0.056	0.014	52.863	42.745
17	dfs-22-2-2.3	0	0	0.033	0.015	0.024	0.297	0.100	0	0.041	0	0.190	0.004	0.017	55.906	44.696
18	dfs-22-2-2.4	0.080	0	0.011	0	0.079	0.280	0.082	0.001	0.014	0	0	0.157	0.021	53.301	41.048
19	dfs-22-2-2.5	0.148	0	0	0.049	0.069	0.326	0.042	0	0.014	0	0.112	0.060	0	54.803	43.491
20	dfs-22-2-2.6	0.122	0.050	0.011	0.009	0.056	0.303	0.051	0	0.014	0	0.022	0.041	0	55.351	43.656
21	dfs-22-2-2.7	0.103	0	0.019	0.002	0.022	0.208	0.097	0.002	0	0.036	0.091	0.030	0	54.857	43.656
22	dfs-22-2.1	0	0.068	0.050	0.001	0.025	0.241	0	0.018	0.056	0	0.312	0.082	0.006	53.142	42.388
23	dfs-22-2.2	0	0.074	0	0	0	0.492	0	0.022	0	0	0.406	0	0.056	55.542	43.644
24	dfs-22-2.3	0	0	0	0.014	0.008	0.188	0.056	0	0	0	0.124	0	0.003	54.217	43.352
25	dfs-22-2.4	0	0	0.006	0.025	0	0.316	0.014	0	0	0	0.154	0.049	0.012	54.841	43.424
26	dfs-1-3.1	0.089	0	0.014	0	0.073	0.207	0.048	0	0	0.004	0.037	0	0.015	54.279	42.652
27	dfs-1-3.2	0.026	0	0.005	0	0.039	0.228	0.027	0	0	0	0	0	0	53.940	43.803
28	dfs-1-3.3	0.079	0	0	0.004	0.050	0.149	0.025	0	0	0	0.038	0.027	0.012	53.504	42.610
29	dfs-1-3.4	0.047	0.011	0	0.025	0.047	0.164	0.024	0.004	0	0	0	0.092	0.023	54.065	42.934
30	dfs-1-3.5	0.068	0	0	0	0.131	0.212	0.048	0.006	0	0	0	0.041	0.051	52.934	42.392
31	dfs-1-3.6	0.012	0	0	0	0	0.173	0.02	0.003	0	0	0.024	0.021	0.077	54.215	43.615
32	dfs-1-3.7	0	0	0.046	0	0.021	0.192	0.037	0.019	0.014	0	0.027	0.039	0	52.468	42.696
33	dfs-1-3.8	0.037	0	0	0.017	0	0.273	0.046	0	0.023	0	0	0.040	0.005	55.500	43.915
34	dfs-1-3.9	0.009	0.005	0	0	0.003	0.223	0.042	0	0.041	0	0.035	0.006	0	54.426	44.068
35	dfs-1-1.1	0.002	0.051	0	0.023	0.010	0.023	0.019	0	0	0	0.460	0.026	0	57.197	42.369
36	dfs-1-1.3	0.014	0.016	0.030	0.009	0.024	0.227	0.010	0	0	0	0	0.026	0.029	54.872	43.709
37	dfs-1-1.4	0.007	0	0	0.034	0	0.660	0.084	0.022	0	0.014	0	0.023	0	56.106	43.658
38	dfs-1-1.5	0.068	0	0.022	0	0.047	0.226	0	0.015	0.023	0	0.141	0.148	0.088	53.157	42.464
39	dfs-10-2.1	0.060	0.031	0.008	0	0.002	0.264	0.071	0	0	0	0.180	0.028	0.035	54.438	43.417
40	dfs-10-2.2	0.014	0	0.046	0.013	0.005	0.307	0.106	0.013	0	0	0.190	0	0	54.638	43.587
41	dfs-22-1.6	0	0	0	0.028	0.002	0.168	0.023	0.014	0	0	0.155	0.023	0	55.390	43.714
42	dfs-22-1.7	0	0	0	0.028	0.019	0.183	0.016	0.007	0	0	0	0.026	0.016	55.157	42.965
43	dfs-11-1.1	0	0	0.011	0.028	0.025	0.183	0.075	0	0	0	0.124	0	0	55.368	43.160
44	dfs-11-1.2	0.143	0.011	0.027	0.017	0	0.122	0.067	0.005	0.023	0	0.097	0	0.008	54.144	42.604
45	dfs-11-1.3	0.098	0	0.019	0	0.021	0.143	0.030	0	0	0	0.038	0.159	0	54.409	42.777
46	dfs-11-1.4	0.035	0	0.011	0.018	0.047	0.167	0.009	0.004	0.027	0.021	0.097	0.021	0	55.358	43.807
47	dfs-11-1.5	0.117	0	0.030	0.021	0.008	0.156	0.045	0.017	0	0	0.070	0.009	0.025	54.604	42.455
48	dfs-11-1.6	0	0.006	0.036	0.039	0.004	0.035	0.015	0	0.014	0	0.145	0.016	0	57.816	42.795
49	dfs-1-4.2	0	0.025	0.038	0	0.015	0.291	0.042	0.003	0	0	0	0.021	0.024	55.255	42.713
50	dfs-1-4.3	0.105	0	0	0	0.054	0.299	0.032	0.021	0	0.014	0.040	0.065	0	54.658	43.318
51	dfs-1-4.4	0	0	0	0.003	0	0.337	0.044	0	0	0.021	0.006	0.050	0	55.050	43.318

续表 1
Count. Table 1

序号	点号	$\omega(B)/\%$														
		SiO ₂	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	Cr ₂ O ₃	NiO	SrO	SO ₃
52	dfs-kk-3-1.6	0.061	0	0.016	0	0.086	2.357	0.062	0.005	0	0	0.288	0.122	0.041	51.430	40.014
53	dfs-1-4.1	0	0	0.003	0	0.051	0.192	0.005	0	0	0	0.073	0.159	0.051	50.552	41.364
54	dfs-1-1.2	0.151	0.015	0.044	0	0.091	0.205	0.048	0.010	0	0	0.018	0.072	0	50.449	39.599
55	dfs-1-1.6	0.096	0.024	0	0	0.050	0.235	0.012	0.004	0	0	0	0.068	0	52.888	42.465
56	dfs-1-1.7	0.012	0.016	0.017	0.003	0	0.192	0.058	0.018	0	0	0.120	0.082	0	51.322	42.419
57	dfs-1-1.8	0.120	0	0	0.011	0.007	0.208	0.049	0.012	0	0	0.142	0.028	0.015	52.931	42.503
58	dfs-10-1.4	0	0.041	0	0.005	0	0.173	0.037	0.002	0	0	0.043	0	0	54.916	43.228
59	dfs-kk-3-3.1	0.116	0	0	0	0.116	0.287	0.072	0	0.009	0.011	0.095	0.107	0.034	52.172	41.749
60	dfs-kk-3-3.2	0.074	0	0.101	0	0.101	0.162	0	0	0.014	0.014	0.088	0.125	0	52.770	42.807
61	dfs-22-1.8	1.432	0.005	0.136	0	0.304	0.462	0.036	0.009	0	0	0	0.004	0	50.527	40.402
62	dfs-22-1.9	0.042	0.018	0.055	0.026	0.060	0.230	0.010	0.008	0	0	0	0.029	0	55.354	41.545
63	dfs-14-1.1	0.049	0	0.014	0	0.016	0.715	0.002	0.012	0.005	0	0.040	0.020	0	54.971	44.088
64	dfs-14-1.2	0.865	0	0.141	0.029	1.172	2.336	0.157	0.006	0	0.011	0	0.032	0.011	51.114	41.016
65	dfs-10-1.3	0.044	0	0.022	0.036	0	0.190	0.068	0	0	0	0.139	0.019	0	56.437	43.910
66	dfs-7-1.2	0.031	0	0	0	0.015	0.228	0.057	0.007	0	0	0.074	0	0.021	54.613	43.106
67	dfs-7-1.3	0.057	0	0.053	0	0.007	0.258	0.067	0.026	0	0	0.082	0.091	0	52.687	42.527
68	dfs-7-2.1	0.007	0.031	0.017	0.022	0	0.262	0.059	0	0	0	0.572	0.012	0	56.203	43.106
69	dfs-7-2.2	0.358	0	0.031	0.043	0.043	0.384	0.011	0.005	0.037	0	0.407	0.081	0	53.475	42.746
70	dfs-7-2.3	0	0	0	0	0.012	0.221	0.080	0.001	0	0	0.432	0.009	0.011	55.470	42.984

注：点号 1~10 矿石类型为粗纤维状，11~25 为花朵状，26~42 为假层纹状，43~48 为同心圆状，49~51 为细纤维状，52~65 为隐晶质，66~70 为钟乳状。大风山天青石矿 61 号点 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0.673%，64 号点 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0.237%，其余未检测到 Al_2O_3 。

于 50.449%~57.816%，平均 54.215%。 $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 40.014%~44.696%，平均 42.936%。其中粗纤维状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 55.372%~55.97%，平均 54.295%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 42.679%~43.875%，平均 43.381%；花朵状粗纤维状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 52.863%~55.906%，平均 54.593%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 41.048%~44.696%，平均 43.240%；假层纹状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 52.468%~57.197%，平均 54.487%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 42.369%~44.068%，平均 43.210%；同心圆状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 54.144%~57.816%，平均 55.283%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 42.455%~43.807%，平均 42.933%；细纤维状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 54.658%~55.255%，平均 54.988%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 42.713%~43.318%，平均 43.116%；隐晶质天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 50.449%~56.437%，平均 52.702%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 39.599%~44.088%，平均 41.936%；钟乳状天青石 $\omega(\text{SrO})$ 变化于 52.687%~56.203%，平均 54.490%， $\omega(\text{SO}_3)$ 变化于 42.527%~43.106%，平均 42.894%。这 7 种类型的天青石，就 SrO 成分平均值而言，同心圆状的含

量最高，其次是细纤维状、花朵状、钟乳状、假层纹状、粗纤维状，隐晶质的含量最低。

将探针测试结果中的多项氧化物分别与 SrO 投二维散点图(图 4)，可以看出 SrO 含量最高的点出现在同心圆状天青石内，其次是在假层纹状天青石内。花朵状、纤维状、假层纹状、同心圆状、钟乳状这 5 种类型天青石的 SrO 含量均很高(均在 52%以上)；隐晶质的 SrO 含量不稳定，高低差距较大，总体较低。大风山天青石中 Ba 的含量相对其他矿床含量低，但就其内部各种类型天青石而言，钟乳状天青石中 Ba 含量较高，细纤维状、假层纹状天青石中含量最低；同心圆状、假层纹状天青石中 Ca 的含量较低，花朵状、纤维状天青石中含量较高；各种类型天青石 MgO 含量分布相差不大，含量较高的主要集中在花朵状、假层纹状及隐晶质天青石内；同心圆状 SiO₂ 含量稍高，纤维状、假层纹状含量较低。

4 与其他类型锶矿床的对比

全世界已发现锶资源的国家有 30 多个，以资源量排序为中国、西班牙、墨西哥、伊朗、加拿大、美国。

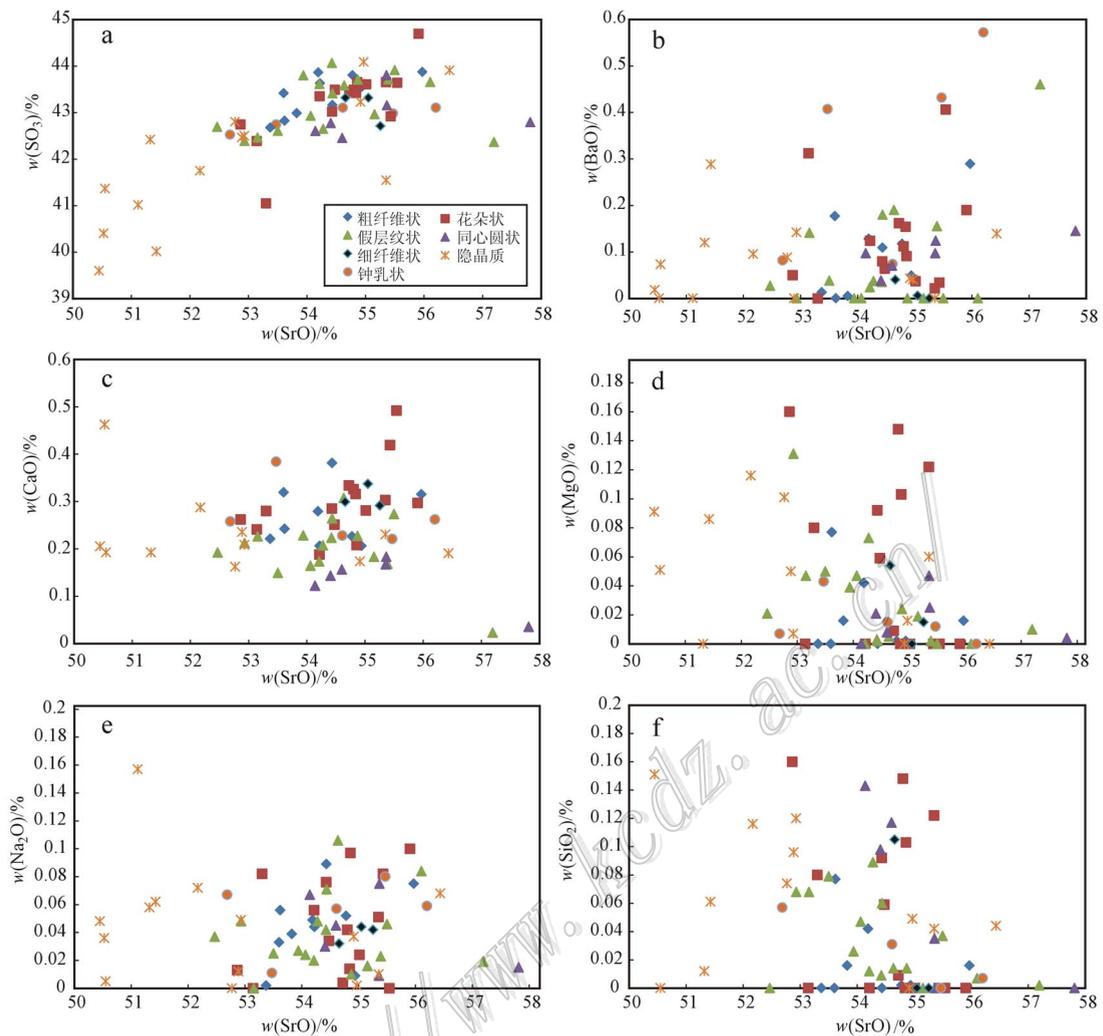


图4 青海大风山探针分析数据二维散点图

Fig. 4 Two-dimensional scatter diagrams of celestite ore component in the Dafengshan ore deposit

形成于中-新生代海相或陆相沉积型和层控型的各类锶矿床都明显分布在特提斯-喜马拉雅构造带和环太平洋构造带及其周边影响范围内,其资源量占世界总资源量的80%以上。中国锶矿床的空间分布与世界锶矿床的空间分布规律一致。由于中国所处的大地构造位置跨越特提斯-喜马拉雅构造带和环太平洋构造带的西带,锶矿床(点)也分布在这个带的内部及其周边影响带范围内(徐兴国等,1999;高延林,1995)。

由表2可见,天青石中的 SO_3 与 SrO 含量具有很强的正相关性(图5a)。其中,浏阳永和的 SrO 含量最高,其次是青海大风山、萍乡包公庙、宜春慈化, $w(\text{SrO})$ 在50%以上,质较纯。重庆干沟、玉峡、大足和云南金顶4个地区的天青石矿 $w(\text{SrO})$ 较低,分

布在37.79%~43.7%之间,其中,重庆干沟白色块状、玉峡白色块状天青石中 SrO 含量相对较高,重庆大足的 SrO 含量最低。江西省的萍乡包公庙、宜春慈化、湖南浏阳永和3个地区的天青石为海相碳酸盐沉积组合锶矿床,其中,浏阳永和地区的天青石为颇负盛名的菊花石,是一种珍贵的石雕工艺品原料,具有很高的观赏价值,在湖南浏阳地区的开采历史可能已有200多年(刘德镒,1988;张刚生等,1998)。

浏阳永和天青石矿 SiO_2 含量相关资料未搜集到,含量最高的是宜春慈化、重庆玉峡白色块状、萍乡包公庙及重庆大足天青石(图5b), $w(\text{SiO}_2)$ 在5%以上。大风山天青石的 $w(\text{SiO}_2)$ 最低,仅为0.07%。重庆玉峡条纹带状、重庆干沟条纹带状和金顶铅锌矿精矿中 $w(\text{SiO}_2)$ 分布于2.12%~3.19%。

表 2 我国部分天青石矿床成分表
Table 2 Celestite components of part of strontium ore deposits in China

名称	w(B)/%										类型
	SrO	BaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	总和	
萍乡包公庙天青石	51.84	0.29	5.58	0.05	0.296	0.06	0.005	0.002	40.68	98.81	海相碳酸盐沉积组合锶矿床
宜春慈化天青石	50.90	0.12	6.18	0.22	0.296	0.72	0.002	0.002	40.01	98.45	
浏阳永和天青石	54.81	0.01	—	0.04	1.65	0.25	—	—	48.32	105.08	
重庆大足古龙锶矿 ^①	37.79	0.24	5.01	0.82	8.35	2.16	—	—	29.62	83.99	层控型锶矿床(海相)
重庆玉峡条纹带状天青石 ^①	38.45	0.65	3.19	0.71	8.31	5.64	—	—	29.19	86.14	
重庆玉峡白色块状天青石 ^①	42.17	0.65	5.95	—	4.34	2.74	—	—	32.45	88.30	
重庆干沟条纹带状天青石 ^①	41.22	3.60	3.10	0.49	8.22	2.17	—	—	32.26	91.06	
重庆干沟白色块状天青石 ^①	43.70	6.05	1.11	0.47	8.71	0.33	—	—	36.40	96.77	
云南金顶铅锌矿天青石精矿	39.74	3.47	2.12	0.26	10.98	0.20	—	—	33.90	90.67	硫化物-天青石层控伴生锶矿床(陆相)
青海大风山	54.22	0.11	0.08	0.01	0.32	0.05	0.006	0.04	42.94	97.78	陆相沉积组合
天青石理论成分	56.42								43.58		

注：据方邳森等，1993；徐兴国，1984。青海大风山数据由国家地质实验测试中心测得。

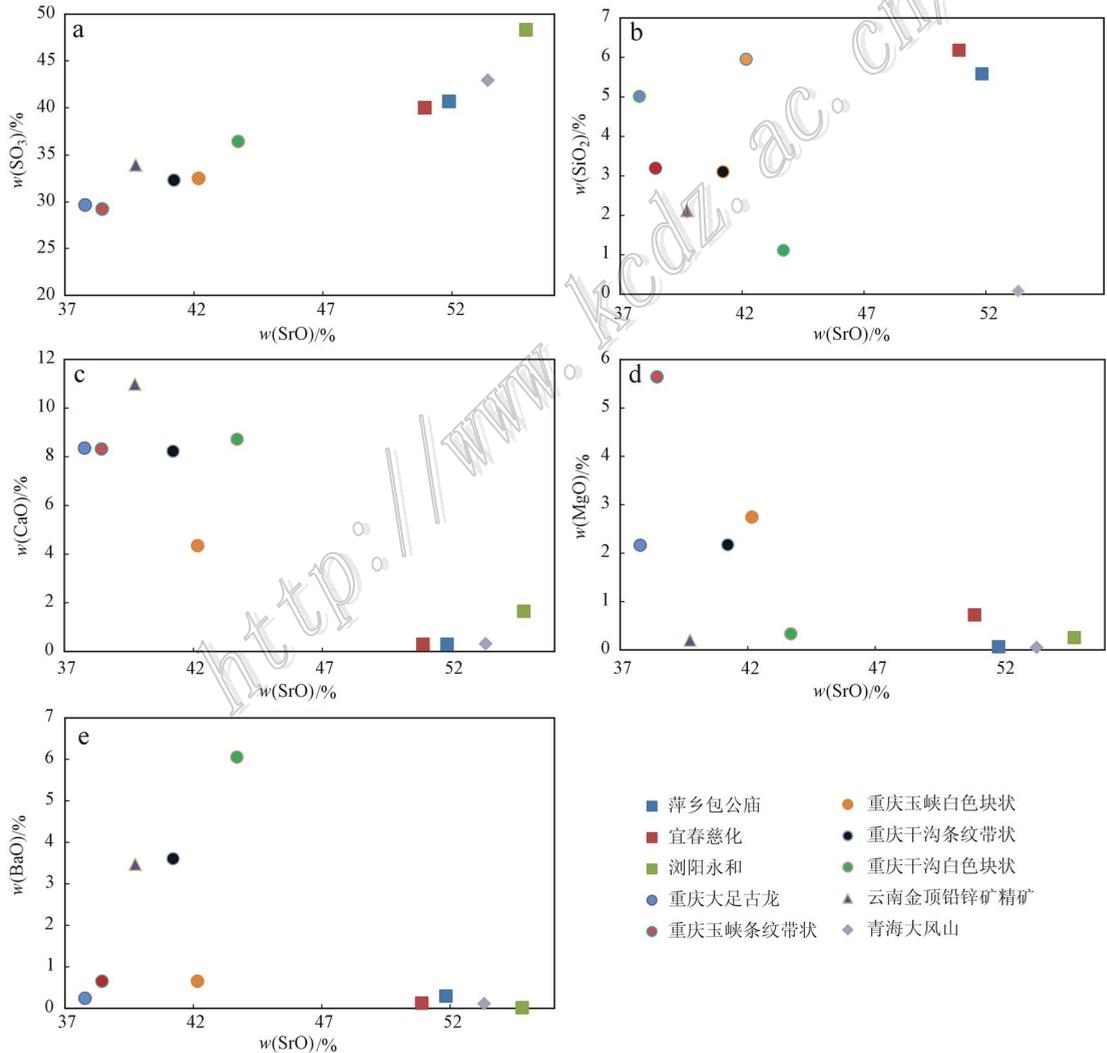


图 5 中国部分天青石矿石成分二维散点图

Fig. 5 Two-dimensional scatter diagrams of part of celestite ores in China

① 重庆市地质矿产勘查开发总公司 205 地质队，2003。重庆市大足县古龙锶矿评价报告。内部资料。

宜春慈化、萍乡包公庙矿床锶在海相碳酸盐沉积阶段呈类质同象进入文石中,也被许多生物吸收存储在文石、高镁方解石、天青石质的壳骨中。当沉积物的孔隙水流动性较强时,含锶的文石、高镁方解石在成岩过程中转化为更稳定的低镁方解石,同时析出锶和镁。镁与海水中的硅质形成海泡石黏土,而锶则被黏土质矿物吸附形成黏土质成岩结核,天青石放射状晶簇嵌布于其中的结核,该类型的 SiO_2 含量较高,表明其具有硅质核心(方邝森等,1993;徐兴国,1984)。

重庆玉峡条带状天青石的钙镁成分特征是高钙、高镁,金顶铅锌矿精矿、干沟白色块状天青石的特点是低钙、低镁,青海大风山、萍乡包公庙、宜春慈化、浏阳永和天青石的特点是低钙、低镁(图 5c、d)。

重庆干沟白色块状天青石中 BaO 的含量远大于其他几个矿床(图 5e), $\omega(\text{BaO})$ 为 6.05%;其次,是重庆干沟条纹带状天青石及云南金顶铅锌矿精矿, $\omega(\text{BaO})$ 分别为 3.47%、3.60%;重庆玉峡、重庆大足、萍乡包公庙、宜春慈化、浏阳永和、青海大风山等 $\omega(\text{BaO})$ 在 1% 以下,有助于锶的提取。

5 结 语

(1) 大风山天青石矿石种类较多,本次经电子探针测得的天青石,以同心圆状中的 SrO 成分含量最高,其次是细纤维状、花朵状、钟乳状、假层纹状、粗纤维状天青石,隐晶质的天青石含量最低。

(2) 大风山天青石矿床以板状、层状矿体为主,矿体延伸大,但埋藏较浅,矿体较薄。在本次采集样品的采坑中,上部是原生角砾状矿石, SrSO_4 含量较低,采坑下部以纤维状、钟乳状、似层纹状天青石为主, SrSO_4 含量较高。

(3) 青海大风山天青石矿床属陆相沉积锶矿床,地处上新世柴达木陆相沉积盆地中心的清水湖泊沉积相带内,经长期蒸发作用形成天青石矿层,后

经表生成矿作用叠加,发生浅部次生富集,与国内其他著名天青石矿床相比,大风山矿床天青石成分简单,除 SrSO_4 含量高外,钙、镁、钠、硅等其他元素含量均很低,具有很高的工业价值。

参考文献/References

- 常丽华,陈曼云,金巍,李世超,于介江. 2006. 透明矿物鉴定手册[M]. 北京:地质出版社. 139页.
- 陈振宇,余金杰,徐珏,周剑雄. 2006. 榴辉岩中金红石的微量元素电子探针分析[J]. 电子显微学报,25(增刊):295-296.
- 地质矿产部地质词典办公室. 2005. 地质辞典(矿物岩石地球化学分册)[M]. 北京:地质出版社. 92页.
- 方邝森,袁旭音. 1993. 赣西湘东菊花状天青石的特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志,12(4):341-348.
- 高延林. 1995. 锶的利用与开发[M]. 西宁:青海人民出版社. 1-184页.
- 廖雪珍,张凯. 2007. 青海大风山天青石矿工艺矿物与选矿工艺流程研究[J]. 甘肃冶金,29(4):21-23.
- 林文山,崔林,夏明强,丁春梅. 2005. 青海省大风山锶矿床成因探讨[J]. 青海国土资源经略(2):29-31.
- 刘德镒. 1988. 浏阳式菊花石的特征及其地质意义[J]. 岩相古地理,8(3-4):40-49.
- 邵厥年,陶维屏. 2010. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京:地质出版社. 243-246页.
- 徐兴国. 1984. 从锶的地球化学特征探讨天青石矿床的成因类型及找矿方向[J]. 地质论评,30(2):146-154.
- 徐兴国,谷秀兰. 1999. 中国的锶矿床[M]. 成都:四川科学技术出版社. 1-125页.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,陈郑辉,李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 地质出版社. 1-138页.
- 薛天星. 1999. 中国(天青石)锶矿床概述[J]. 化工矿产地质,21(3):141-148.
- 张刚生,李家珍. 1998. 中国菊花石的矿物组成特征[J]. 矿产与地质,12(5):294-301.
- 张兆鹏,施加辛. 1992. 矿产资源战略分析——锶矿[R]. 云南省地质矿产局. 1-111页.
- Mineral Commodity Summaries. 2012. U. S. Geological Survey[R]. 156p.