

沉积岩容矿天青石矿床的发育特征与成因综述*

黄 钢¹, 宋玉财^{1**}, 庄亮亮¹, 田力丹¹, 吴 畏¹, 张 滢²

(1 中国地质科学院地质研究所 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;

2 中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘 要 沉积岩容矿的天青石矿床是锶最主要的来源。文章对全球该类矿床的资料进行了系统梳理, 对矿床的发育特征和成因进行了综述和探讨。研究显示: ① 该类矿床的产出与含石膏或硬石膏的蒸发盐密切相关, 或赋存在碳酸盐岩-蒸发岩沉积建造中, 或出现在蒸发岩底辟环境; ② 多数为后生成因, 表现为富锶流体交代石膏或硬石膏, 或富锶流体与富硫酸盐流体混合、充填开放空间; 少数矿床为同生成因, 天青石直接从蒸发环境的水体中沉淀出; ③ 后生天青石矿床中的锶可以来自不同途径, 包括盆地流体与富钙矿物相互作用萃取的锶、碳酸盐岩重结晶过程文石转变为方解石或硬石膏转变为石膏释放的锶; 同生天青石矿床中的锶来自沉积水体本身, 沉积源区岩石提供了锶; ④ 天青石中的硫来源于围岩地层中的石膏或硬石膏, 有些矿床中的硫来自发生过硫酸盐还原作用后的(溶解的)石膏/硬石膏, 而在个别矿床中, 还原硫氧化成硫酸盐提供了部分硫; ⑤ 一些天青石矿床中出现有铅锌硫化物, 两者可以有成因关系, 也可以无成因关系; ⑥ 少数天青石矿床中重晶石含量较高, 与高 Ba/Sr 流体与富硫酸盐流体混合有关。天青石从低钡流体中结晶时, 钡在流体中含量的震荡变化会导致 SrSO_4 - BaSO_4 固溶体的形成, 从而使天青石出现环带或出溶结构。

关键词 地质学; 沉积岩容矿; 天青石; 分布; 典型矿床; 锶和硫来源; 成因

中图分类号: P618.78

文献标志码: A

Characteristics and genesis of sediment-hosted celestite deposit: An overview

HUANG Gang¹, SONG YuCai¹, ZHUANG LiangLiang¹, TIAN LiDan¹, WU Wei¹ and ZHANG Ying²

(1 Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China;

2 China Petroleum Pipeline Bureau Engineering., Ltd., Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract

Sediment-hosted celestite deposits are the principle sources of the world's strontium resources. Based on the data of celestite deposits worldwide, this study presents an overview of the ore characteristics and genesis. ① Deposits are hosted by gypsum- or anhydrite-bearing evaporite, either by carbonate-evaporite sedimentary sequences or by evaporite diapirs; ② Mineralization is mostly epigenetic, characterized by strontium-rich fluids replacing gypsum or anhydrite or by open-space filling through mixing of strontium-rich fluids with sulfate-rich fluids; a few of deposits are syngenetic with celestite deposition in evaporative environments; ③ Strontium in epigenetic celestite deposits can be obtained via interaction between basinal fluids and Ca-rich minerals, conversion of aragonite to calcite during diagenetic recrystallization of carbonate sediments, or transformation of anhydrite to gypsum during hydration; strontium in syngenetic celestite deposits derives from water in sedimentary systems with the ultimate source being the provenance of sediments; ④ Sulfur in celestite derives mainly from gypsum or an-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 41773043、91855214、41773042、41772088、41922022)联合资助

第一作者简介 黄 钢, 1989年生, 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: ghuang13@163.com

** 通讯作者 宋玉财, 1978年生, 男, 研究员, 从事矿床学研究。Email: song_yucan@aliyun.com

收稿日期 2021-05-04; 改回日期 2021-06-30。孟秋熠编辑。

hydrite within host rocks but some of the (dissolved) gypsum or anhydrite have suffered from sulfate reduction; oxidation of reduced sulfur may contribute sulfur to celestite in a few of deposits; ⑤ Zinc and lead sulfides occur in some celestite deposits where celestite and sulfides have genetic links or not; ⑥ High Ba/Sr ratio of mineralizing fluid is responsible for high abundance of barite in a few of celestite deposits. Variation in Ba concentration in low Ba concentration of mineralizing fluid can form SrSO_4 - BaSO_4 solid solution in celestite and consequently generate oscillatory zonation or exsolution texture.

Key words: geology, sediment-hosted, celestite, distribution, typical deposits, sources of strontium and sulfur, genesis

锶是一种稀有碱土金属,具有较强的吸收X射线辐射功能及高介电常数等特性,被广泛应用于电子、冶金、军工、化工、轻工和医疗等领域,如用于彩色电视机荧屏、磁性材料铁氧体永磁铁、陶瓷釉颜料、润滑剂等,是重要的战略性新兴产业资源(刘超等,2016)。自然界中含锶矿物多达30余种,以天青石(SrSO_4)和菱锶矿(SrCO_3)最为常见,其中,具有工业价值的锶矿床均以天青石(SrSO_4)为主(徐兴国等,1984;杨清堂等,1998;朱乔乔等,2017)。

目前,世界上已发现的天青石矿床主要有2种类型:①以沉积岩为容矿围岩的天青石矿床,成矿与岩浆活动无关;②与火山活动有关的火山岩型天青石矿床(年秀清,2018)。沉积岩容矿天青石矿床赋存在沉积岩中,岩性多为碳酸盐岩和蒸发岩组合;火山岩型天青石矿床与岩浆流体活动有关,岩石类型主要为中、基性火山岩和碳酸岩。统计表明,沉积岩容矿天青石矿床的锶资源量在所有天青石矿床中占比超过90%,是最为重要的天青石矿床类型。因此,文章主要论述沉积岩容矿天青石矿床。

文章对全球沉积岩容矿天青石矿床资料进行了梳理、分析、总结,包括矿床的分类、基本特征、在全球和中国的分布、典型矿床特征,基于此,探讨了天青石中锶和硫的来源、与共伴生铅锌硫化物和重晶石的关系,期望能够为人们全面了解该类矿床有所帮助。

1 矿床的分类和基本特征

沉积岩容矿的天青石矿床有2种成因:①后生成因,即盆地卤水后生交代地层中蒸发岩、同时也充填开放空间形成;②同生成因,即在蒸发环境下,与碳酸盐岩和蒸发岩一起先后从海相或湖相水体中沉积形成。世界上多数沉积岩容矿天青石矿床被认为是后生成因的(Scholle et al., 1990; Hanor, 2000; Tekin, 2001a; Dill et al., 2009; 2014)。但需要指出的

是,对于某些矿床,不同学者有不同观点,持同生和后生成因观点都有(De Brodtkorb et al., 1982; 1997; Martin et al., 1984; Moore et al., 1997; Ehya et al., 2013; Veigas et al., 2015; Pourkaseb et al., 2017)。

后生天青石矿床具有以下基本特征(Hanor, 2004; Tritlla et al., 2007; Bejaoui et al., 2014):①矿床产出于浅海泻湖或潮坪相碳酸盐岩中或膏岩底辟环境;②含矿建造以碳酸盐岩-蒸发岩为主(图1),见少量的碎屑岩,围岩时代从志留纪到新近纪都有出现;③矿体通常发育在地层中的富蒸发岩层位,也有一些矿床矿体出现在膏岩底辟体的顶部或边部,矿体形态为层状、透镜状,在岩溶或膏岩底辟作用下,围岩往往破碎;④天青石通常交代石膏和硬石膏等硫酸盐产出,或充填开放空间产出,矿石构造包括块状、条带状、脉状、浸染状等,天青石粒度粗粒到细粒;⑤天青石矿床多数单独产出,少数与中低温热液铅锌矿床共/伴生,矿物组合主要为天青石、石膏、白云石、方解石,一些矿床中发育重晶石、萤石、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿;⑥成矿流体主要为中低温、富 Cl^- 、贫 SO_4^{2-} 的盆地卤水;⑦天青石锶同位素组成较蒸发岩围岩即可相似,也可不同;硫同位素组成变化范围较大,较蒸发岩围岩,大部分天青石显示富 ^{34}S 的特征,少数矿床中天青石 $\delta^{34}\text{S}$ 值低于石膏/硬石膏。

同生天青石矿床赋存于海相或湖泊相沉积地层中,对于赋存在海相地层中的矿床,其争议较大,很多被认为是后生成因。湖相地层中的天青石矿床,围岩发育碳酸盐岩、石膏、硬石膏等蒸发盐。矿床矿体形态为层状、板状及透镜状,延伸数百至数千米,厚度1~15 m。早期沉淀碳酸盐,然后沉淀天青石,晚期沉淀石膏,天青石与围岩呈整合接触关系,矿石由天青石、菱锶矿、石膏、硬石膏、方解石、白云石及黏土矿物组成。矿石结构为碎屑结构、鲕状结构、晶粒结构,纹层状、块状构造。天青石中锶、硫同位素与蒸发岩围岩中相似(薛天星,1999;马顺清等,2012)。

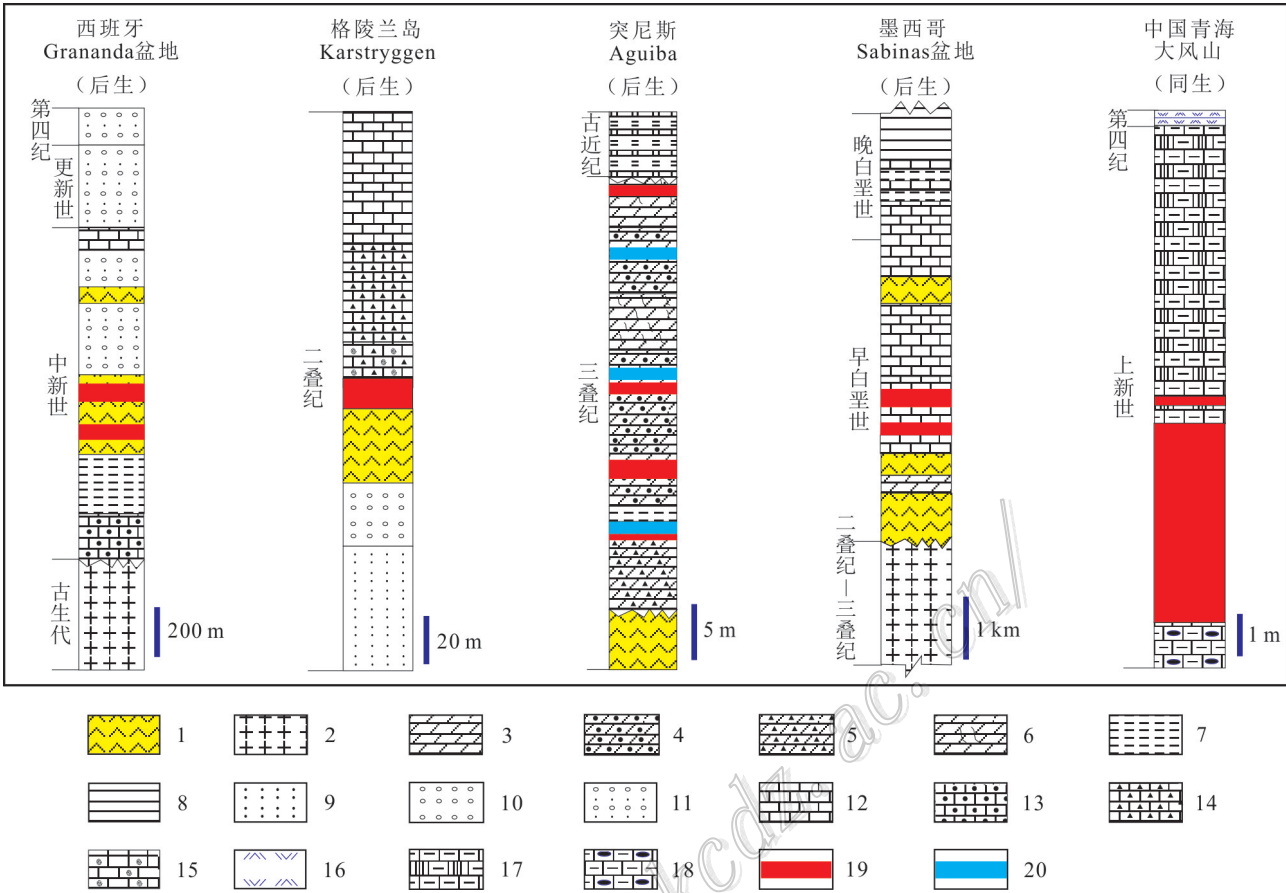


图1 全球代表性沉积岩容矿天青石矿床地层柱状图(据 Scholle et al., 1990; Sánchez et al., 2009; Abidi et al., 2012; Veigas et al., 2015; 石海岩等, 2018)

1—蒸发岩;2—火成岩基底;3—白云岩;4—复成分角砾岩;5—单成分白云岩质角砾岩;6—碎裂白云岩;7—泥岩;8—页岩;9—砂岩;
10—砾岩;11—含砾砂岩;12—灰岩;13—砂屑灰岩及钙质砂岩;14—灰岩角砾岩;15—生物碎屑灰岩;16—风积盐壳;
17—石膏化泥晶灰岩;18—含钙质结核泥晶灰岩;19—天青石矿体;20—铅锌矿体

Fig.1 Stratigraphic columns of typical sediment-hosted celestite deposits in the world (after Scholle et al., 1990; Sánchez et al., 2009; Abidi et al., 2012; Veigas et al., 2015; Shi et al., 2018)

1—Evaporite; 2—Igneous basement; 3—Dolostone; 4—Polygenic breccias; 5—Monogenic dolomitic breccias; 6—Fractured dolostone;
7—Mudstone; 8—Shale; 9—Sandstone; 10—Conglomerate; 11—Pebbly sandstone; 12—Limestone; 13—Calcareneite;
14—Limestone breccias; 15—Bioclastic limestone; 16—Eolian salt; 17—Gypsification micrite;
18—Calcareous nodules-bearing micrite; 19—Celestite ore body; 20—Pb-Zn ore body

中国青海大风山锶矿被认为是典型的同生天青石矿床(孙艳等, 2013; 石海岩等, 2018)。

2 沉积岩容矿天青石矿床在全球的分布

全球主要沉积岩容矿的天青石矿床及基本特征列入表1。在全球,该类矿床大量出现在欧亚大陆南部和非洲大陆北部的特提斯构造域,其他矿床出现

在欧洲北部、北美和南美大陆、格陵兰岛(图2)。在特提斯域,天青石矿床的分布从东部的青藏高原及周缘一直延伸到西部的比利牛斯造山带,其赋矿围岩时代从早三叠世到更新世,围岩主要是碳酸盐岩-蒸发岩建造,少数为碎屑岩,主要的矿床包括青藏高原及周缘的大风山、华莹山、金顶矿床,伊朗扎格罗斯造山带胡齐斯坦省 Likak 和 Bangesten 矿床,中伊朗地块内的 Mekbad 和 Kuh-e-Talhe 矿床,卡塔尔 Al Nakhsh 矿床,土耳其高原 Sivas 盆地内的天青石矿

表 1 全球主要沉积岩容矿天青石矿床、矿点及基本特征

Table1 Major sediment-hosted celestite deposit in the world and their basic characteristics

矿床/矿点	元素组合	矿石量/Mt	围岩	成因类型	矿物组合	参考文献
墨西哥 Sabi- nas 盆地天青 石成矿带	La Tinaja	Sr-Ba	/	早白垩世海相 Acatita 组灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、重晶石、石膏、方解石
	San Agustin	Sr-Ba-F	/	早白垩世海相 Acatita 组灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、重晶石、方解石、单质硫、石膏、萤石、石英
	Volcan	Sr-Ba	/	早白垩世海相 Acatita 组灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、重晶石、方解石
	Venado	Sr-Ba	/	早白垩世海相 Acatita 组灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、重晶石、方解石
	Berrendos	Sr-Ba	/	早白垩世海相 La Virgen 组灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、重晶石、方解石、单质硫、石膏
西班牙 Grana- da 盆地天青石	Escuzar	Sr	/	中新世海相 Chimeneas 组蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石、赤铁矿
	Montivive	Sr	/	中新世海相 Agron 组蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石、赤铁矿
中伊朗地块天 青石成矿带	Molkabad	Sr	2.5	渐新世—中新世 Qom 组海相灰岩-蒸发岩	后生成因	天青石、方解石、石膏
	Kuh-e-Talhe	Sr	1~1.5	渐新世—中新世 Qom 组海相石膏质泥灰岩	后生成因	天青石、方解石、石膏
Zagros 造山带 天青石成矿带	Likak	Sr	0.075	早中新世 Gachsaran 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、方解石、硬石膏
	Bangestan	Sr	1.5	渐新世—中新世 Asmari 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、方解石、硬石膏
格陵兰岛天青 石矿床	Karstryggen	Sr	25~50	晚二叠世 Karstryggen 组层状藻灰岩- Wegener 组灰岩角砾岩	后生成因	天青石、石膏、方解石
突尼斯膏岩底 劈域天青石成 矿带	Ain Allega	Pb-Zn-Sr	25	三叠纪蒸发岩发生底辟,底辟体中白云岩角砾岩	后生成因	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、天青石、重晶石、白云石、方解石
	El Aguiba	Pb-Zn-Sr	/	底辟体中三叠纪白云岩角砾岩	后生成因	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、天青石、重晶石、白云石、方解石
	Jeb Doghra	Sr	/	底辟体中三叠纪白云岩角砾岩	后生成因	天青石、方解石、白云石、石膏
	Oued Jeb	Pb-Zn-Sr	/	底辟体中三叠纪白云岩角砾岩	后生成因	方铅矿、闪锌矿、天青石、白云石
阿根廷	San Charbel	Sr	/	早侏罗世 Tabanos 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石
Neuquen 盆地 天青石成矿带	Llao	Sr	/	晚侏罗世 Auquilco 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石
	El Olivido	Sr	/	早白垩世 Huitrin 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石、白云石
土耳其 Sivas	Kortuzla	Sr	20	中新世 Haciali 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石、黏土矿物
盆地天青石成 矿带	Sahantepe	Sr	/	渐新世 Selimiye 组蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石
	Solgece	Sr	/	始新世 Bozbel 组碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、石膏、方解石
兰坪盆地	金顶	Pb-Zn-Sr	6.63	发生底辟的三叠纪三合洞组碳酸盐岩- 蒸发岩	后生成因	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、天青石、方解石、石膏、硬石膏
柴达木盆地西 部天青石成矿 带	大风山	Sr	17.5	上新世狮子沟组陆源碳酸盐岩-蒸发岩	同生成因	天青石、菱锆矿、方解石、白云石、石膏
	尖顶山	Sr	2.295	上新世狮子沟组-更新世七个泉组陆源碳酸盐岩-蒸发岩	同生成因	天青石、菱锆矿、方解石、白云石、石膏
	碱山	Sr	/	更新世七个泉组陆源碳酸盐岩-蒸发岩	同生成因	天青石、菱锆矿、方解石、白云石、石膏
重庆华蓥山天 青石成矿带	铜梁玉峡	Sr	3.55	早三叠世嘉陵江组二段碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、菱锆矿、白云石、方解石、石英、石膏、黄铁矿
	干沟	Sr	0.96	早三叠世嘉陵江组四段碳酸盐岩-蒸发岩	后生成因	天青石、菱锆矿、白云石、方解石、石英、石膏、萤石、黄铁矿

注:“/”为没有数据。

床,塞浦路斯 Maroni 矿床,西班牙比利牛斯造山带 Granada 盆地中的 Montivive 和 Escuzar 矿床,北突尼斯阿特拉斯造山带膏岩底辟带内的天青石矿床(葛

文胜等, 2001; Tekin et al., 2002; Dill et al., 2009; Abidi et al., 2010; Veigas et al., 2015; Pourkaseb et al., 2017; Song et al., 2020)。欧洲北部的主要天青石矿

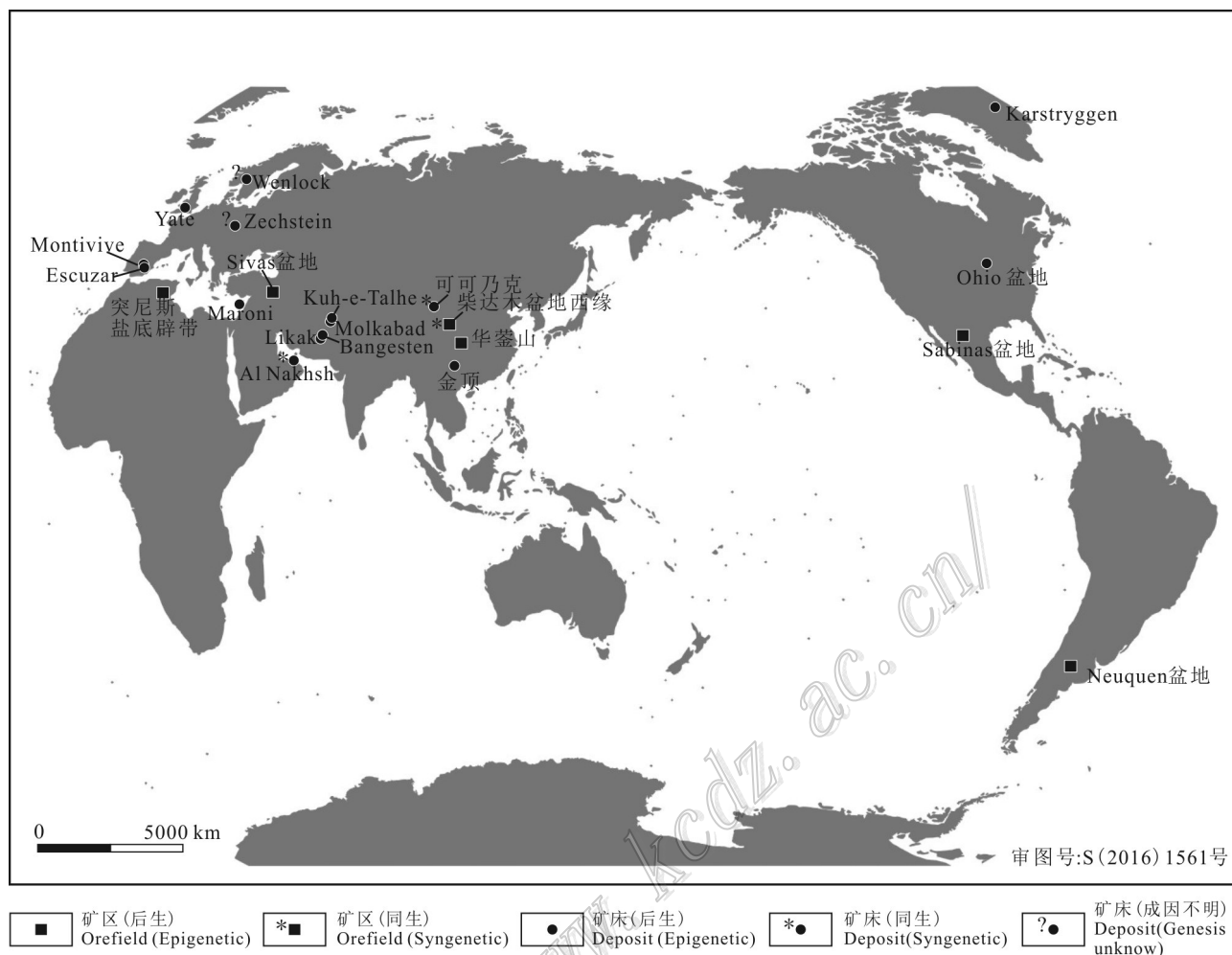


图2 全球沉积岩容矿天青石矿床分布

Fig.2 Distribution of sediment-hosted celestite deposits in the world

床有英国的 Yate 矿床,波兰的 Zechstein 矿床,挪威的 Wenlock 矿床,这些矿床的规模较小 (Wood et al., 1976; Hryniv et al., 2010)。在北美,墨西哥科阿韦拉州的 Sabinas 盆地内发育有世界上最大的后生天青石矿集区,该矿集区内发育 53 个天青石矿床,均赋存于早白垩世碳酸盐岩-蒸发岩建造中。美国 Ohio 盆地内发育有大量天青石矿床,赋存在志留纪白云岩-蒸发岩中。在南美阿根廷内乌肯省的 Neuquen 盆地,发育众多天青石矿床,赋存于白垩纪地层中 (Carlson, 1987; De Brodtkorb et al., 1982; Sánchez et al., 2009)。格陵兰岛的 Karstryggen 矿床是典型的后生天青石矿床 (Scholle et al., 1990)。

中国天青石矿床丰富,主要分布在喜马拉雅-青藏高原造山带、中亚造山带、秦岭造山带、扬子板块

以及柴达木盆地,既包括沉积岩容矿的矿床,也包括火山岩型矿床,前者有柴达木盆地西缘大风山天青石矿集区、扬子板块华蓥山天青石矿集区、中亚造山带可可乃克矿床、喜马拉雅-青藏高原造山带金顶矿床等,后者有扬子板块爱景山、狮子立山、秦岭造山带黄龙铺等天青石矿床(图3,图4)。

3 典型矿床

沉积岩容矿天青石矿床按成因分为同生和后生天青石矿床,而后生天青石矿床赋存状态为交代层状或底辟蒸发岩或充填开放孔隙。因此,本文选取了全球 4 个典型的沉积岩容矿天青石矿床进行介绍,分别代表交代层状蒸发岩、交代层状蒸发岩与开放空间充填共存、交代底辟蒸发岩、同沉积形成的天

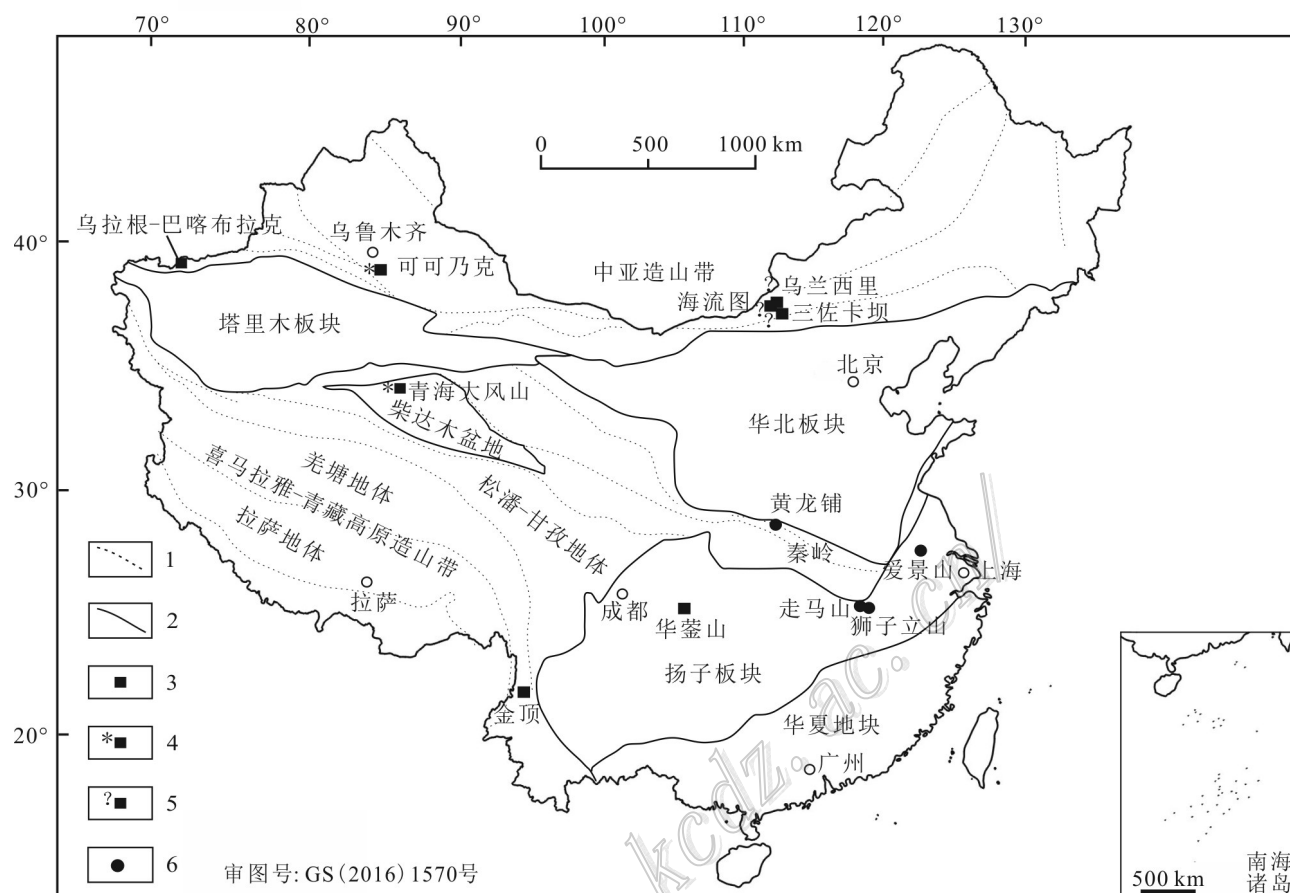


图3 中国天青石矿床分布

1—显生宙缝合带;2—板块边界;3—沉积岩容矿天青石矿床(后生);4—沉积岩容矿天青石矿床(共生);5—沉积岩容矿天青石矿床(成因不明);6—火山岩容矿天青石矿床;

Fig.3 Distribution of celestine deposits in China

1—Phanerozoic suture; 2—Boundary of block; 3—Sediment-hosted celestine deposit (epigenetic); 4—Sediment-hosted celestine deposit (syngenetic); 5—Sediment-hosted celestine deposit (genesis unknown); 6—Volcanic type celestine deposit

青石矿床。

3.1 西班牙 Granada 盆地内的天青石矿床

矿床位于西班牙比利牛斯造山带南部的 Granada 盆地内,代表盆地卤水直接交代层状蒸发岩所形成的矿床,后生成因。古生代变质岩及三叠纪碳酸盐岩构成了 Granada 盆地的基底,盆地在中新世和上新世充填了一套硅质碎屑岩、灰岩及蒸发岩,天青石赋存于蒸发岩中(图1,图5;Veigas et al., 2015)。

Montevive 和 Escuzar 矿床是盆地内最主要的2个矿床,天青石总资源量不明,矿石年产量达20万吨,矿物组合为天青石、白云石和方解石,无硫化物,矿石品位 50%~70%(杨清堂, 1998; Veigas et

al., 2015)。Montevive 矿床中天青石呈层状与石膏质叠层石互层产出,天青石交代与叠层石互层的石膏,单层矿体厚度为 20~50 cm,矿体总厚度达 90 m,由于断层、喀斯特化及角砾岩化作用导致单个矿体延伸不远,矿体总长度约 1 km。层状天青石中见扰动及垮塌构造,发育泥裂和溶蚀孔洞,天青石因含少量的浸染状赤铁矿,而呈现出灰褐色-红褐色,镜下主要见天青石与薄层状白云石互层。Escuzar 矿床天青石主要与石膏互层产出,天青石交代石膏并见大量天青石的石膏假晶,同时,可见少量的天青石充填于灰岩喀斯特溶洞中(Martin et al., 1984)。

在早期研究中, Martin 等(1984)认为2个矿床

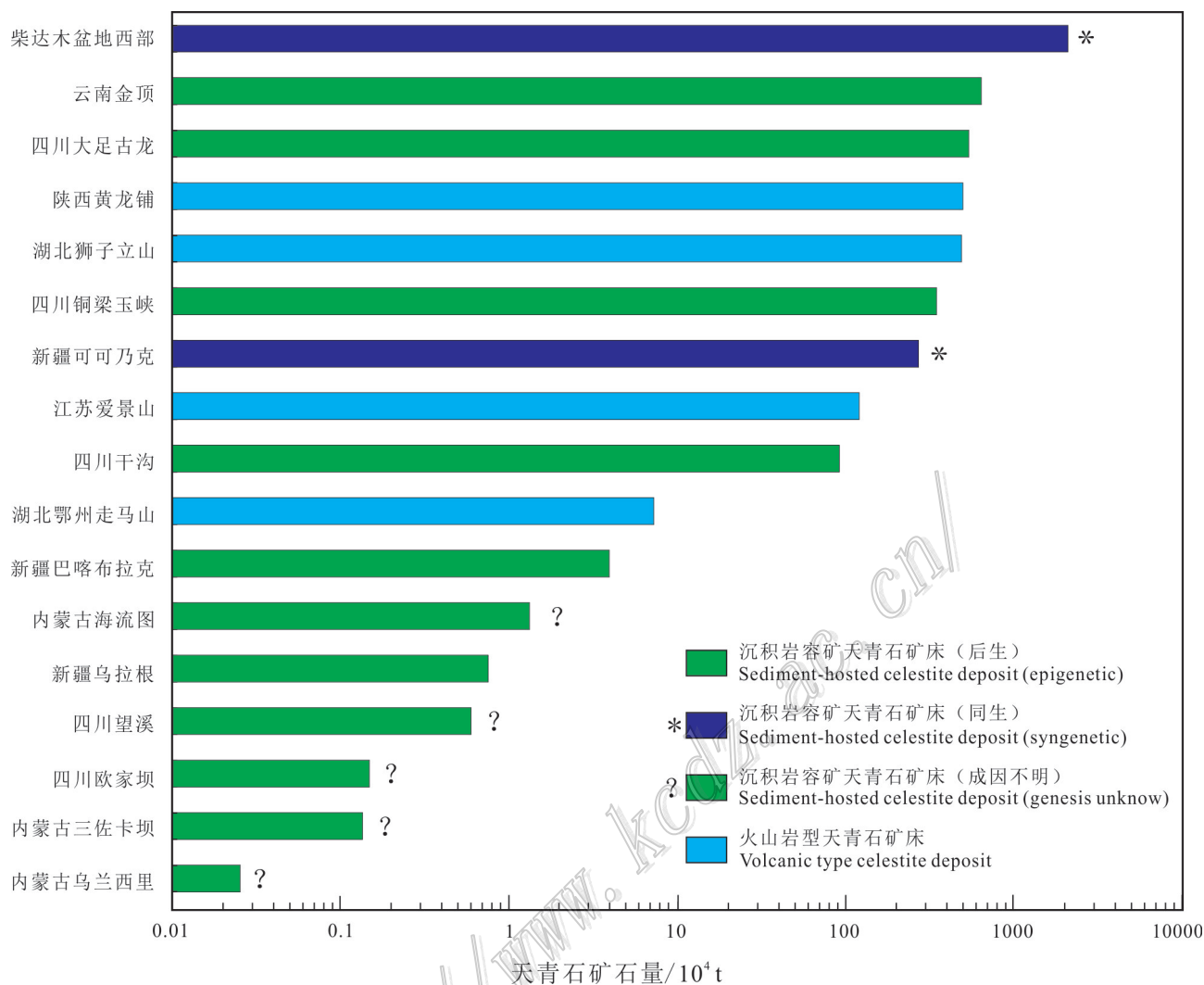


图4 中国主要天青石矿床的矿石量

Fig.4 Ore tonnages of major celestite deposits in China

的层状天青石为同生成因,是海水在泻湖环境中与富锶地下水混合,后经不断的蒸发作用形成的,而少量充填于喀斯特孔洞及裂隙中的天青石为后生成因,是富锶的热液与石膏溶解形成的富硫酸盐流体混合形成。但近来研究发现,层状天青石中可见大量天青石的石膏假晶,表明天青石交代石膏、形成晚于石膏,因此提出了Granada盆地中天青石矿床是后生成因的观点,即富锶的热卤水交代沉积阶段的石膏所形成(Taberner et al., 2002; Veigas et al., 2015)。

3.2 格陵兰岛 Karstryggen 天青石矿床

Karstryggen 天青石矿床位于格陵兰岛东部 Jameson 盆地的西部边缘,代表成矿流体交代蒸发岩及开放空间充填共存的天青石矿床,为后生成

因。矿区内出露的地层主要为二叠纪的碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩,包括下二叠统 Huledal 组红色砂岩,上二叠统 Karstryggen 组层状藻灰岩、蒸发岩及灰岩角砾岩,及上二叠统 Wegener Halvo 组海相灰岩及灰岩角砾岩(图1)。灰岩因岩溶作用发育大量的孔洞和裂隙。天青石赋存于 Karstryggen 组与 Wegener Halvo 组灰岩和蒸发岩中(图6),矿区面积达 80 km²。

该天青石矿床矿石储量达 25~50 Mt,矿物组合为天青石、方解石和白云石,不发育重晶石及铅锌硫化物,矿石平均品位 50%~60%,局部可达 80%~90%。该矿床发育交代型和充填型 2 种类型天青石,交代型天青石位于 Karstryggen 组层状藻灰岩、灰岩角砾岩及 Wegener Halvo 组灰岩角砾岩中,交代石膏、方

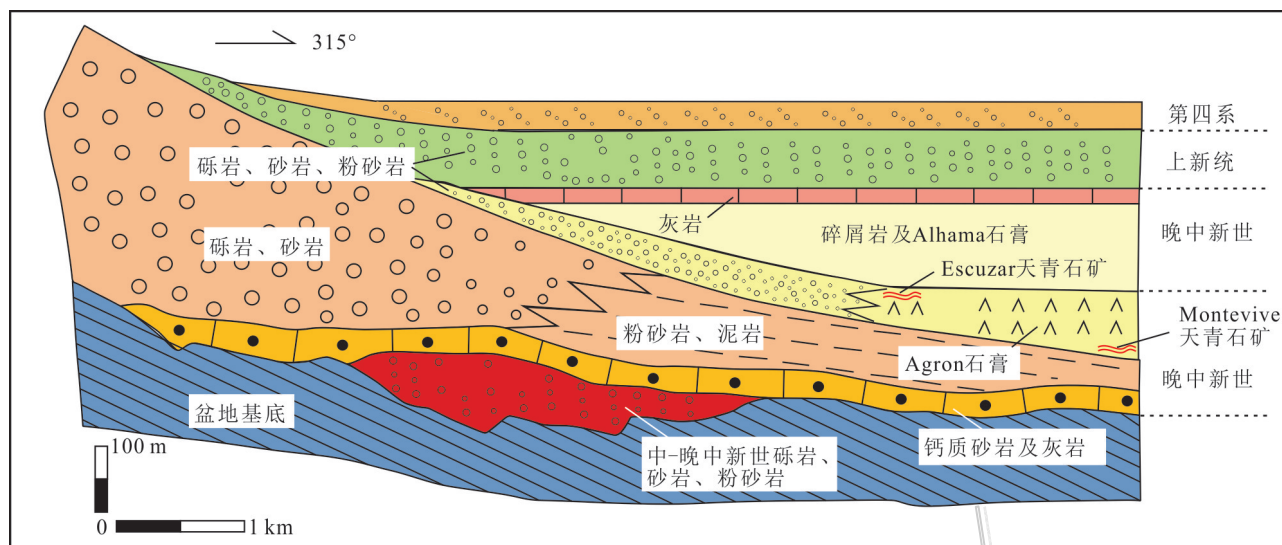


图5 西班牙 Granada 盆地天青石矿集区的剖面示意图(修改自 Veigas et al., 2015)

Fig.5 Schematic cross-section through the celestite-rich Granada Basin, Spain (Modified after Veigas et al., 2015)

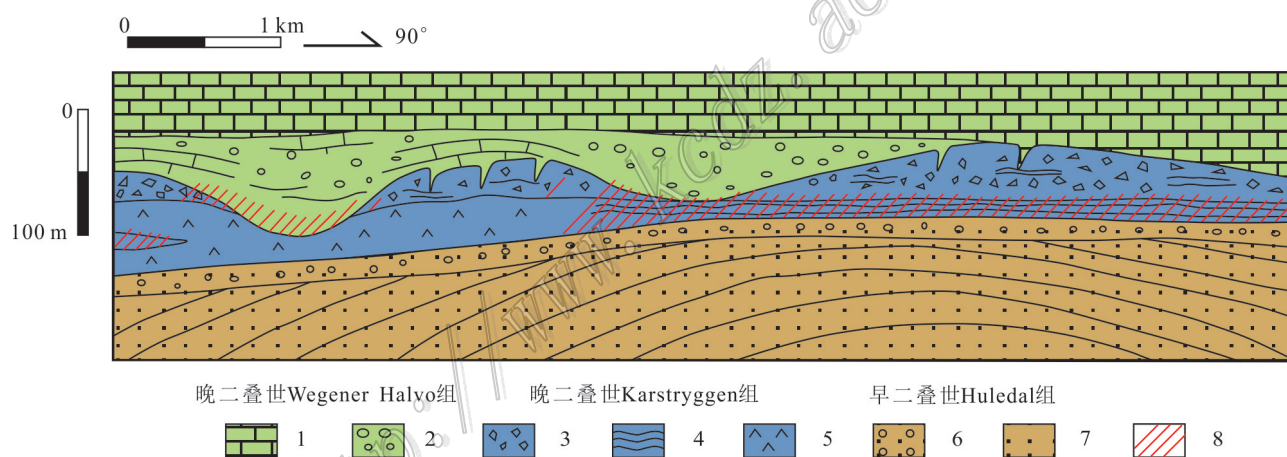


图6 格陵兰岛 Karstryggen 天青石矿床剖面图(修改自 Scholle et al., 1990)

1—海相泥晶灰岩-灰岩;2—砾岩及灰岩角砾岩;3—灰岩角砾岩;4—层状藻灰岩;5—石膏;6—红色砾岩;7—红色砂岩;8—天青石矿层

Fig.6 Schematic cross-section through the Karstryggen celestite deposit, Greenland (modified from Scholle et al., 1990)

1—Marine micrite-limestone; 2—Conglomerate and limestone breccia; 3—Limestone breccia; 4—Laminated algal limestone; 5—Gypsum;

6—Red conglomerate; 7—Red sandstone; 8—Celestite ore-body

解石以及白云石,镜下见天青石中包裹大量的碳酸盐岩包裹体,表现出交代残余结构;充填型天青石呈脉状充填于 Wegener Halvo 组灰岩裂隙及溶蚀垮塌形成的孔洞中,该类天青石矿石品位较高,可达 80%~90%,镜下呈板状,自形,晶体颗粒较大 (Scholle et al., 1990; Breesch et al., 2009)。

Karstryggen 天青石矿床是一典型的后生天青石矿床,研究认为,二叠纪浅海相潮坪环境沉积了一套

蒸发岩和碳酸盐岩,后因地层抬升导致灰岩发生岩溶作用形成灰岩角砾岩及裂隙和孔洞。成矿流体运移经过下伏富放射性成因铀的砂岩红层时,与之发生水岩反应萃取斜长石中的铀,而后与石膏溶解产生的富硫酸盐流体混合沉淀出天青石 (Scholle et al., 1990; Breesch et al., 2009)。

3.3 北突尼斯 Ain Allega-Aguiba 天青石矿床

北非 Atlas 造山带东段(阿尔及利亚和突尼斯境

内)三叠纪蒸发岩发生了强烈的底辟作用,形成了大量的蒸发岩底辟体,在底辟体上部冠岩(Cap-rock)和底辟体相邻的地层中,往往发育有密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床、天青石、重晶石、萤石等矿床。Bouhlef等(2016)根据矿物组合将这些矿床分为4类: Pb-Zn-Sr层控交代型矿床、Pb-Zn-Ba-F层控交代和充填型矿床、Pb-Zn层控交代型和脉状矿床、碎屑岩容矿的Pb-Zn-As矿床。Ain Allega-Aguiba Pb-Zn-

Sr矿床是北突尼斯最大的天青石矿床(Abidi et al., 2012),天青石矿石储量达24 Mt,品位为60%,也伴有少量的重晶石。

在Ain Allega-Aguiba矿床,三叠纪蒸发岩底辟入晚白垩世—渐新世地层中,形成Djebel Namra底辟体(图7)。地层以灰岩、泥灰岩、砂岩为主,盐底辟体顶部为一套白云岩角砾岩,角砾直径几厘米至几米不等,棱角明显,被硬石膏胶结,是蒸发岩底辟过

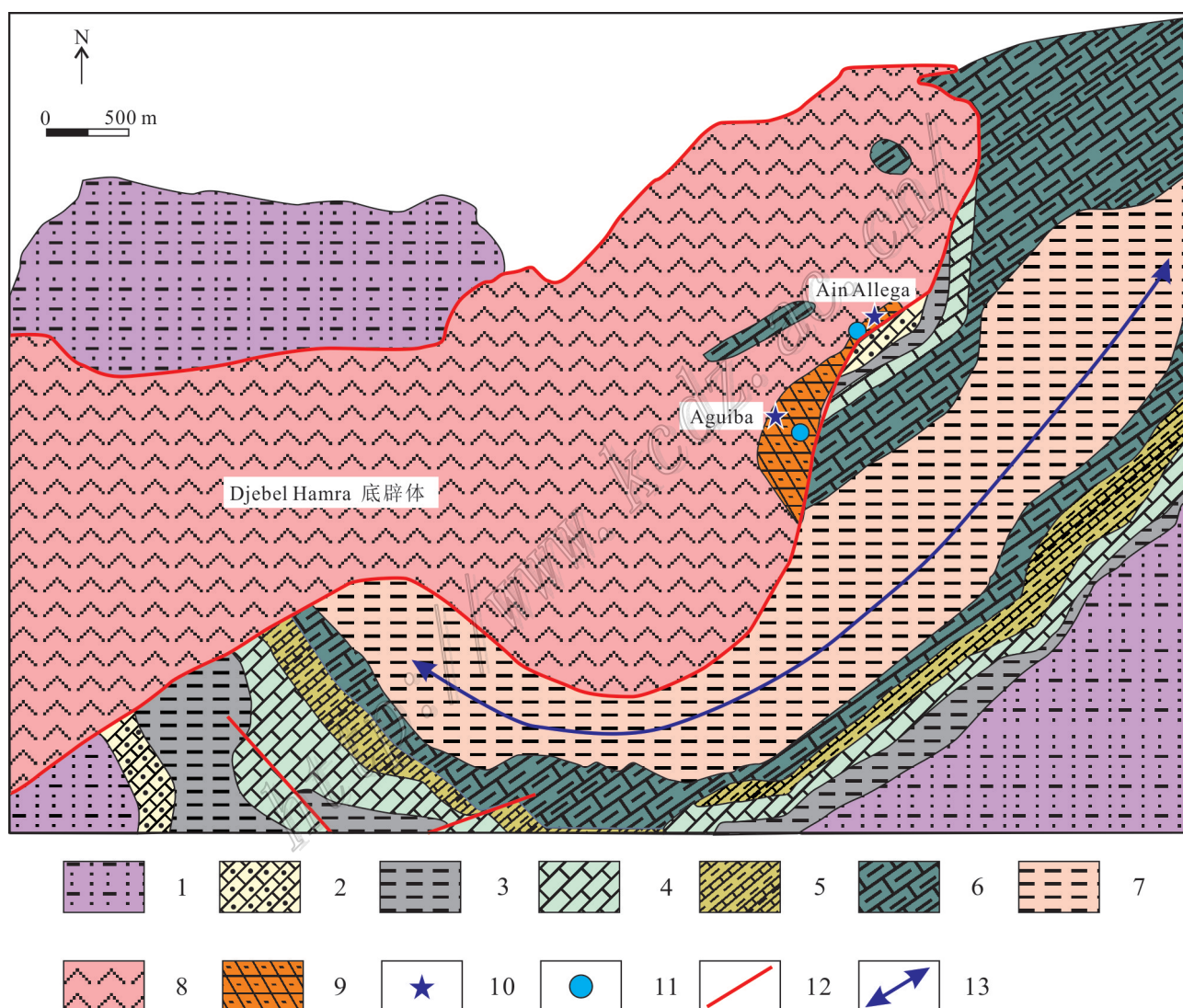


图7 北突尼斯Ain Allega-Aguiba天青石矿床地质图(据Abidi et al., 2012)

1—晚始新世—中新世砂岩、粉砂岩;2—早始新世含燧石灰岩;3—古新世泥灰岩;4—晚白垩世灰岩;5—晚白垩世灰岩-泥灰岩互层;6—晚白垩世灰岩-泥灰岩;7—晚白垩世泥灰岩;8—三叠纪蒸发岩;9—冠岩;10—天青石矿;11—铅锌矿;12—断层;13—背斜轴部

Fig.7 Geological map of the Ain Allega-Aguiba deposit, North Tunisia (modified from Abidi et al., 2012)

1—Late Eocene—Miocene sandstone and siltstone; 2—Early Eocene limestone with flint; 3—Paleocene marl; 4—Late Cretaceous limestone; 5—Late Cretaceous interbedded of limestone and marl; 6—Late Cretaceous limestone and marl; 7—Late Cretaceous marl; 8—Triassic evaporite; 9—Cap-rock; 10—Celestite deposit; 11—Pb-Zn deposit; 12—Faults; 13—Axe of anticline

程从深部携带上来的三叠纪岩石。矿体呈层状和脉状分布在白云岩角砾岩中,矿石构造有角砾状构造、斑马状构造、块状构造,矿物组合为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、天青石、重晶石、方解石和白云石。天青石主要交代白云岩角砾间硬石膏,少量充填在裂隙和开放空间中,天青石既可以单独产出,也可与铅锌矿共生。Abidi等(2012)认为铅锌与天青石矿化为同一成矿事件产物,矿物分2阶段形成,第一阶段为硫化物(方铅矿、闪锌矿、黄铁矿)和硫酸盐(天青石、重晶石)胶结底辟成因白云岩角砾岩;第二期为硫化物和硫酸盐胶结溶蚀垮塌白云岩角砾岩。天青石、重晶石呈固溶体形式出现,呈双峰式分布,即重晶石中 $w(\text{SrSO}_4)$ 少于10%,天青石中 $w(\text{BaSO}_4)$ 少于10%,缺少中间组成(Abidi et al., 2012)。天青石流体包裹体均一温度平均值180℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 平均值为16.3%,在同一天青石样品中发现不同盐度的流体包裹体,显示为含锶钡的卤水与含硫酸盐溶液混合(Abidi et al., 2010; 2012)。

3.4 青海柴达木盆地大风山天青石矿床

青海柴达木盆地是世界上最大的陆相盐类矿床富集区,盆地西部也是中国最大的天青石矿集区,发育多个大型、超大型天青石矿床,天青石累计矿石量达2000万t,占中国锶储量70%(朱朝良, 2009; 马顺清等, 2012; 韩继龙等, 2018),其中,大风山矿床最大,其锶矿储量位居中国第一。

大风山矿床主要赋存于上新统上部狮子沟组(N_2s)内陆湖相陆源碳酸盐岩-蒸发岩中,岩性为钙质泥岩、泥晶灰岩、灰岩以及石膏层。前人根据沉积阶段及岩性组合将该地层分为2个岩性段(N_2s^1 、 N_2s^2)和4个岩性层(N_2s^{1-1} 、 N_2s^{1-2} 、 N_2s^{2-1} 、 N_2s^{2-2}),其中下岩性段上层 N_2s^{1-2} 为主含矿层,岩性主要为钙质泥岩夹泥晶灰岩,矿体呈层状、似层状产于该层顶部,与围岩产状一致,矿体厚度18~32 m,全区90%的天青石位于该层位中。 N_2s^{1-1} 、 N_2s^{2-1} 为次要含矿层,下岩性段下层 N_2s^{1-1} 岩性为含碳钙质泥岩、含碳灰岩夹薄层天青石,上岩性段下层 N_2s^{2-1} 岩性为石膏化钙质泥岩、泥晶灰岩、石膏碎屑岩夹薄层天青石,矿体呈似层状及透镜状,矿体规模较小(图8)(石海岩等, 2018)。

大风山天青石矿床矿物组合简单,矿石矿物以天青石为主,菱锶矿少量出现,脉石矿物为白云石、方解石、石膏等,天青石呈糖粒状、角砾状、块状,颜色呈现灰绿色、灰白色、深灰色等。前人按成因将天

青石分为两类,即原生和次生天青石,原生天青石呈层状、似层状和透镜状,分布范围广,是主要矿石类型;次生天青石多产于岩石裂隙中(马顺清等, 2012)。目前主流观点认为,该矿床是典型的内陆湖泊化学沉积型矿床,在蒸发环境下,碳酸盐岩先沉淀,然后天青石从湖水中沉淀,最后沉淀出石膏和硬石膏(孙艳等, 2013; 年秀清等, 2018; 石海岩等, 2018)。

4 讨论

4.1 锶的来源

锶与钙的晶体化学习性相似,故通常以类质同象替换钙的形式进入到含钙矿物的晶格中,导致一些含钙的矿物锶的含量偏高,统计表明,文石 $w(\text{Sr})$ 平均为 8000×10^{-6} ,硬石膏 $w(\text{Sr})3000 \times 10^{-6}$,方解石/白云石 $w(\text{Sr})400 \times 10^{-6}$ (Wood et al., 1976),基性岩锶丰度 440×10^{-6} ,中性岩锶丰度 300×10^{-6} ,碱性岩锶丰度 $1000 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$,磷块岩锶丰度 $100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ (南京大学地质系, 1979)。因此,含斜长石的中基性岩浆岩、碱性岩和砂岩、含文石的生物碎屑灰岩、含石膏/硬石膏的蒸发盐、含磷灰石的磷块岩等是锶的主要来源。

当含镁的卤水与文石相互作用时会发生白云石化,使文石转变为白云石,或文石在一定温压条件下转变成方解石时,会释放出大量的锶,为天青石成矿提供锶。如西班牙Granada盆地Montevive和Escuzar天青石矿床,其天青石与围岩同期中新世海水的锶同位素组成一致(图9),Veigas等(2015)认为,在碳酸盐岩围岩热液蚀变过程,文石重结晶转变为方解石时释放大量的锶进入到卤水中,与蒸发岩相互作用后形成天青石。英国Yate天青石矿床呈层状及脉状赋存于石炭纪Keuper组泥灰岩中,其上覆地层为三叠纪蒸发岩,下部地层为含文石灰岩,天青石锶同位素组成低于泥灰岩围岩,但高于灰岩及蒸发岩(图9),Wood等(1976)认为锶来源于含文石灰岩白云岩化过程释放的锶,但在此之后又受到泥灰岩锶同位素的改造。

当斜长石风化形成黏土矿物或含斜长石的岩石与卤水发生水岩反应时,会释放出大量的锶。在墨西哥Sabinas盆地天青石矿集区,基底为含斜长石的碎屑岩,天青石高于围岩中石膏和与围岩同时期海水的锶同位素组成(图9),研究推测盆地卤水与基底

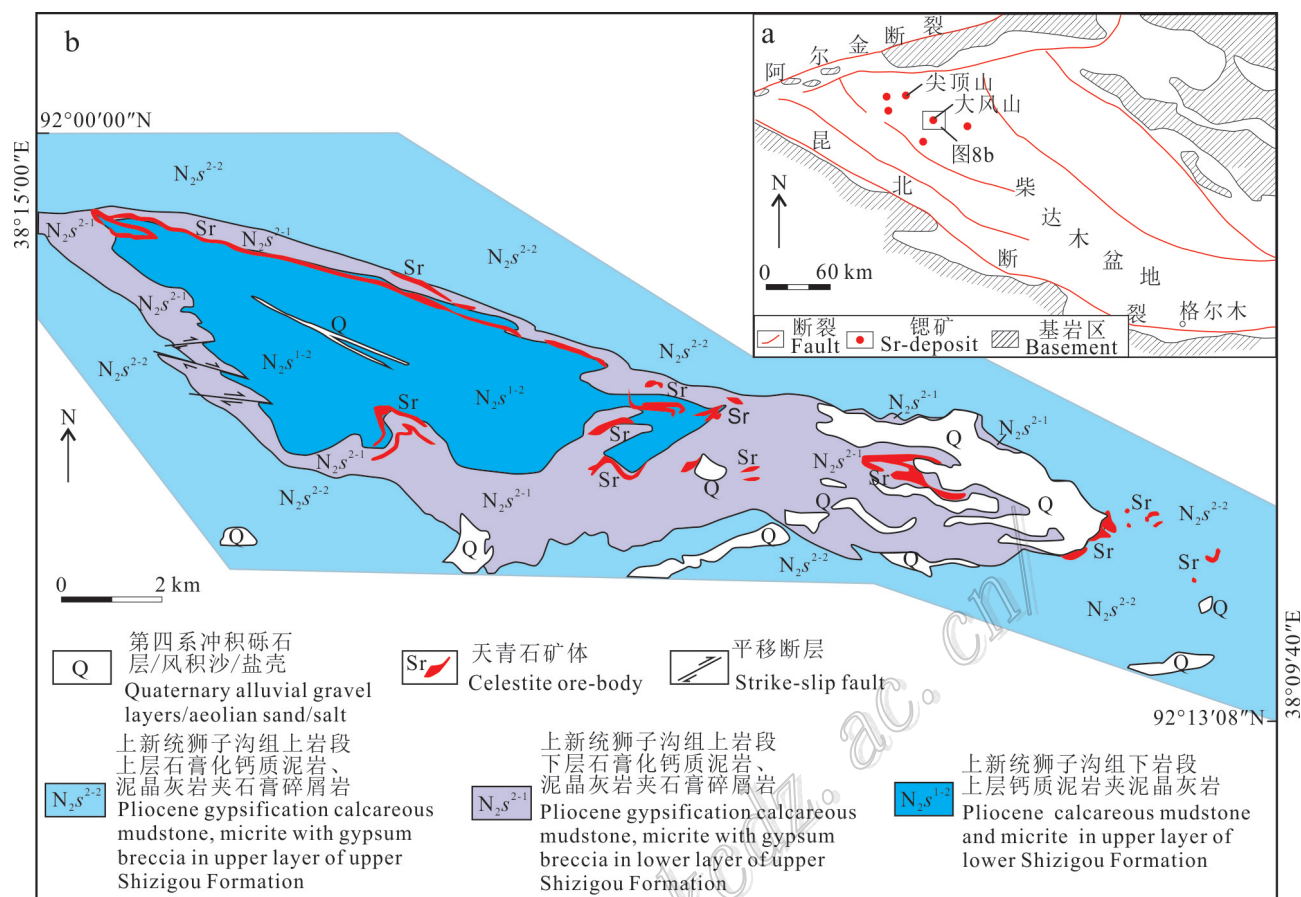


图8 中国青海大风山天青石矿床构造位置(a)及地质(b)图(据石海岩等,2018)

Fig.8 Tectonic location (a) and geological map (b) of the Dafengshan celestine deposit, Qinghai Province, China (after Shi et al., 2018)

岩石发生水岩反应,萃取了其中斜长石中的锶,为天青石成矿提供锶(Sánchez et al., 2009)。在格陵兰岛Karstryggen天青石矿床,基底为一套二叠纪的红色砂岩,天青石远远高于二叠纪围岩中石膏/硬石膏的锶同位素组成,由于在基底红层中见大量的斜长石蚀变形成的黏土矿物,Scholle等(1990)认为天青石中锶来源于红层中富放射性成因锶的长石砂岩,是卤水与长石砂岩发生水岩反应时萃取了斜长石中的锶。

较石膏而言,锶更容易进入硬石膏晶格中,导致硬石膏锶含量高于石膏,因此,当硬石膏在低温(通常低于56℃)条件下水化形成石膏时,会释放大量的锶(Jowett et al., 1993, Dill et al., 2009)。在土耳其Sivas盆地天青石矿床,天青石呈层状、结核状、透镜状分布于中新世蒸发岩内、以及下部始新世砂岩和灰岩中,在地表水作用下,硬石膏及灰岩被溶蚀发育喀斯特孔洞,同时,将硬石膏转变为石膏。由于天青

石与这些石膏和硬石膏的锶同位素一致(图9),研究认为,硬石膏转变为石膏过程中释放锶,含锶流体下渗遇到硫酸盐从而沉淀形成天青石(Tekin et al., 2001b; 2002)。

海水锶的浓度较低,很难直接通过蒸发浓缩沉淀形成大型超大型天青石矿床,而对于陆相湖盆而言,当有外部锶加入时,湖水中锶含量会不断增加,富锶湖水在干旱环境中蒸发浓缩,在湖盆边缘会直接沉淀天青石,形成大型、超大型矿床。例如,柴达木盆地青海大风山矿床,周边山系岩石富锶,风化过程中岩石释放锶进入地表水,最后流入湖盆(孙艳等,2013;韩继龙等,2018),湖水通过蒸发作用形成天青石。

4.2 硫的来源

沉积岩容矿天青石矿床出现在含石膏/硬石膏的沉积地层或蒸发岩底辟环境中,并且常出现天青石交代石膏或硬石膏的现象,因此,后天青石矿床

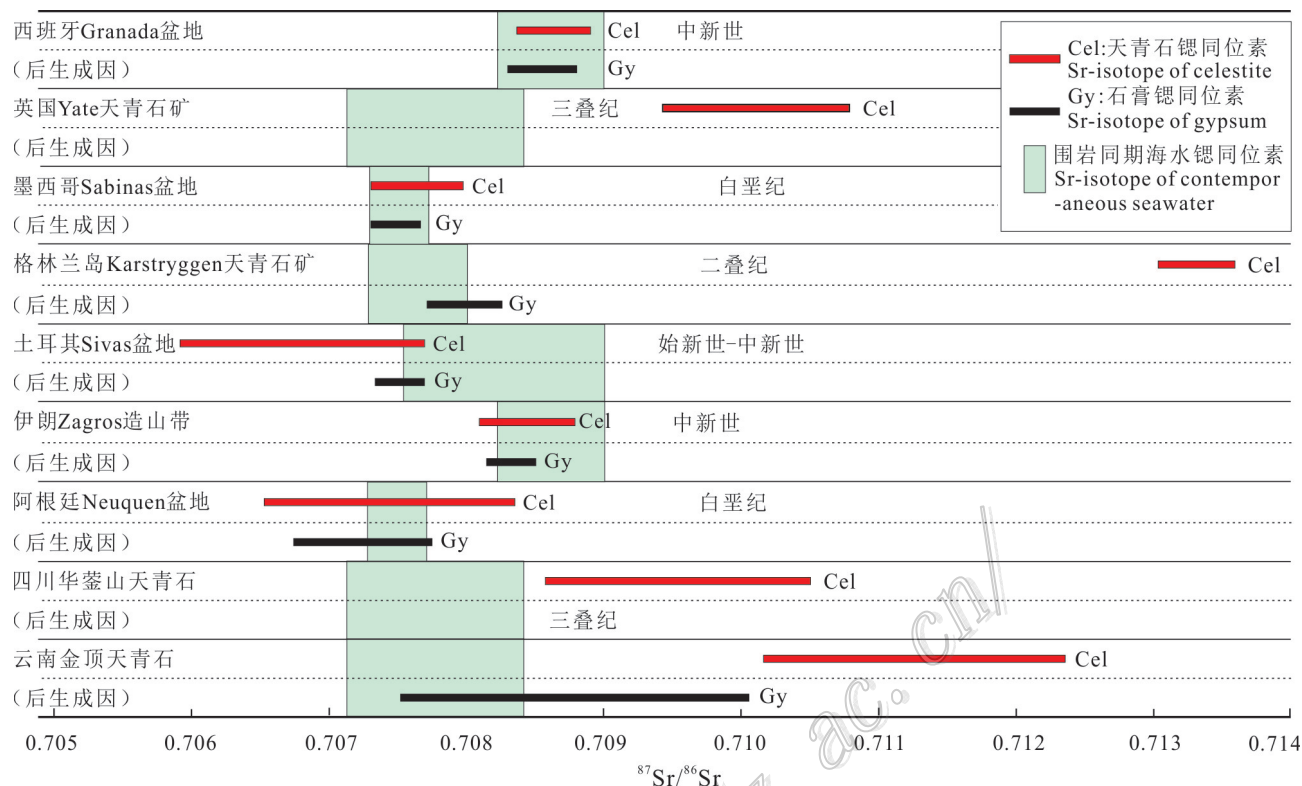


图9 全球代表性沉积岩容矿天青石矿床中天青石、围岩中石膏和与围岩同期海水的锶同位素组成

西班牙Granada盆地数据自Martin et al., 1984; Veigas et al., 2015; 英国Yate数据自Wood et al., 1976; 墨西哥Sabinas盆地数据自Kesler et al., 1981; 格林兰岛Karstryggen数据自Scholle et al., 1990; 土耳其Sivas盆地数据自Tekin et al., 2002; 伊朗扎格罗斯造山带数据自Moore et al., 1997; Ehrenberg et al., 2007; Bazargani-Guilani et al., 2008; Ehya et al., 2013; 阿根廷Neuquen盆地数据自Brodtkorb et al., 1982; Romas et al., 1990; 四川华蓥山数据自朱创业等, 1999; 金顶数据自覃功炯等, 1991; 胡古月等, 2013; 朱志军等, 2018; 张治波等, 2018

Fig.9 Strontium isotope compositions of celestite, gypsum and contemporaneous sea-water of host rock in representative sediment-hosted celestite deposits in the world

data source, Spain Granada basin: Martin et al., 1984; Veigas et al., 2015; England Yate: Wood et al., 1976; Mexico Sabinas basin: Kesler et al., 1981; Greenland Karstryggen: Scholle et al., 1990; Turkey Sivas basin: Tekin et al., 2002; Iran Zagros Orogenic belt: Moore et al., 1997; Ehrenberg et al., 2007; Bazargani-Guilani et al., 2008; Ehya et al., 2013; Argentina Neuquen basin: Brodtkorb et al., 1982; Romas et al., 1990; Sichuan Huayingshan: Zhu et al., 1999; Jinding: Qin et al., 1991; Hu et al., 2013; Zhu et al., 2018; Zhang et al., 2018

中硫被认为主要来自围岩中的石膏或硬石膏。同生天青石矿床中硫主要来源于沉积水体,如青海大风山天青石矿床,天青石 $\delta^{34}\text{S}=20.84\text{‰}\sim 25.53\text{‰}$,石膏 $\delta^{34}\text{S}=22.32\text{‰}\sim 26\text{‰}$,可见,石膏与天青石的硫同位素组成基本一致(图10,葛文胜等,2001),它们的硫来自蒸发后的高盐度湖水。

然而,硫同位素组成表明,对于一些后生矿床,地层中石膏或硬石膏可能经历了硫酸盐还原作用后才提供了硫。墨西哥Sabinas盆地天青石 $\delta^{34}\text{S}=13.2\text{‰}\sim 18.2\text{‰}$,石膏 $\delta^{34}\text{S}=13.2\text{‰}\sim 16.4\text{‰}$ (Kesler et al., 1981),西班牙Granada盆地天青石 $\delta^{34}\text{S}=17.8\text{‰}\sim 21.3\text{‰}$,石膏 $\delta^{34}\text{S}=15.8\text{‰}\sim 18.6\text{‰}$ (Veigas et al.,

2015),土耳其Sivas盆地新生代天青石矿床天青石 $\delta^{34}\text{S}=22.7\text{‰}\sim 31.2\text{‰}$,石膏 $\delta^{34}\text{S}=22.9\text{‰}\sim 24.4\text{‰}$ (Martin et al., 1984),这些矿床天青石普遍较围岩地层中石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 高(图10)。由于天青石与流体中硫酸根硫同位素分馏系数较石膏与流体中硫酸根小(陈骏等, 2004),如果天青石中硫来自地层中石膏,其硫同位素组成应比石膏略低,但上述矿床中天青石较围岩地层中石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 高。这种现象被解释为:地层中石膏被流体溶解后,发生了细菌参与下的硫酸盐还原作用(BSR)或硫酸盐热化学还原作用(TSR),生成的还原硫会富集 ^{32}S ,从而导致流体中残余硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 升高,那么从这样流体中沉淀出的天青石

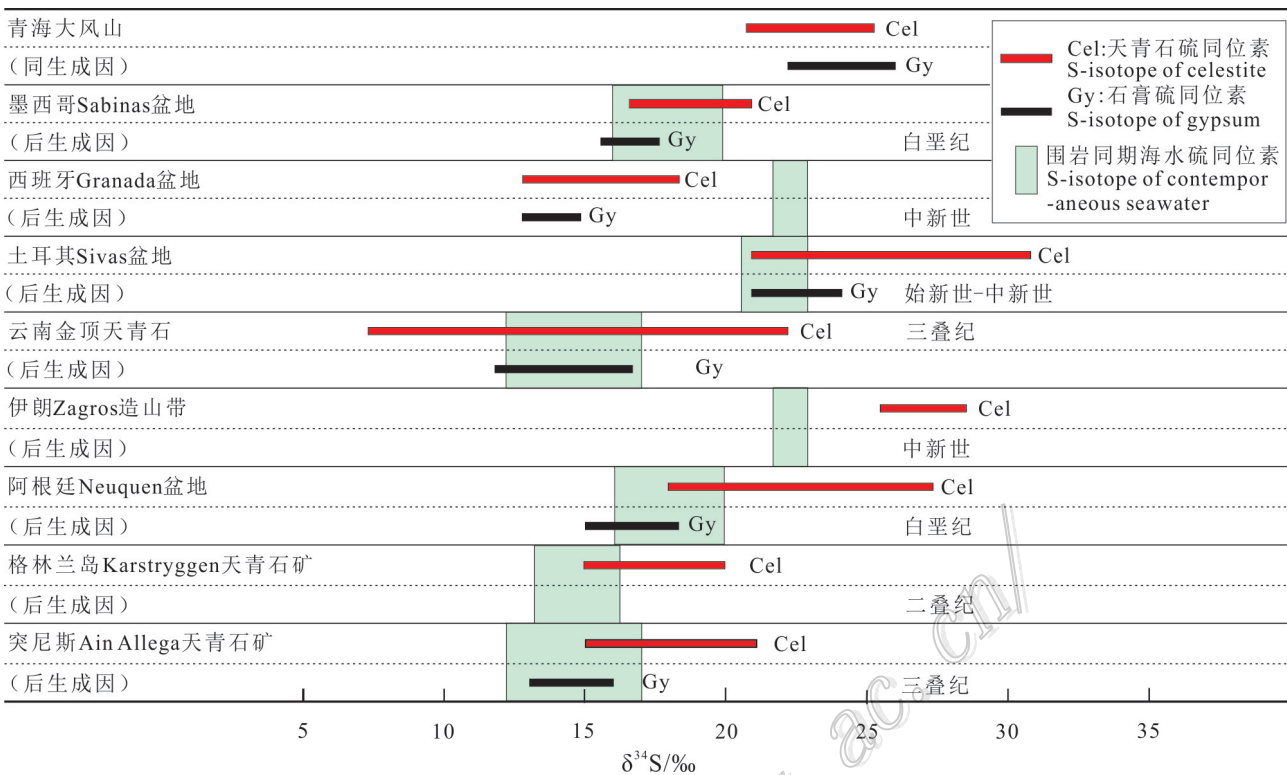


图10 全球沉积岩容矿天青石矿床中天青石、围岩中石膏和与围岩同期海水的硫同位素组成

青海大风山天青石数据自葛文胜等,2001;墨西哥Sabinas盆地数据自Kesler et al., 1981;西班牙Granada盆地数据自Martin et al., 1984; Veigas et al., 2015;土耳其Sivas盆地数据自Tekin et al., 2002;金顶数据自覃功炯等,1991;尹静等,2012;郑海峰等,2012;胡古月等,2013;刘腾,2016;张治波等,2018;伊朗扎格罗斯造山带数据自Moore et al., 1997; Ehrenberg et al., 2007; Bazargani-Guilani et al., 2008; Ehya et al., 2013;阿根廷Neuquen盆地数据自Brodtkorb et al., 1982; Romas et al., 1990;格陵兰岛Karstryggen数据自Scholle et al., 1990;突尼斯数据自Abidi et al.,2012; Jemmali et al., 2013

Fig.10 Sulfur isotope compositions of celestite, gypsum and contemporaneous sea-water of host rock in major sediment-hosted celestite deposits in the world

data source, Qinghai Dafengshan: Ge et al., 2001; Mexico Sabinas basin: Kesler et al., 1981; Spain Granada basin: Martin et al., 1984; Veigas et al., 2015; Turkey Sivas basin: Tekin et al., 2002; Jinding: Qin et al., 1991; Yin et al., 2012; Zheng et al., 2012; Hu et al., 2013; Liu et al., 2016; Zhang et al., 2018; Iran Zagros Orogenic belt: Moore et al., 1997; Ehrenberg et al., 2007; Bazargani-Guilani et al., 2008; Ehya et al., 2013; Argentina Neuquen basin: Brodtkorb et al., 1982; Romas et al., 1990; Greenland Karstryggen: Scholle et al., 1990; Tunisian: Abidi et al.,2012; Jemmali et al., 2013

的 $\delta^{34}\text{S}$ 值就比地层中石膏的高,也就是说天青石中的硫来源于细菌还原作用后的石膏和硬石膏等硫酸盐。

此外,在少数矿床中,天青石中的硫酸盐还可能部分来源于还原硫的氧化。在兰坪金顶,矿床同时发育硫化物和天青石,天青石主要有充填型和交代型2种类型,其中,充填型天青石晚于硫化物形成,它的 $\delta^{34}\text{S}=8.7\text{‰}\sim 17.7\text{‰}$,而矿床地层中石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 主要为 $15\text{‰}\sim 16\text{‰}$ (覃功炯等,1991;郑海峰,2012;胡古月等,2013;刘腾等,2016),部分天

青石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显低于石膏。矿床中黄铁矿、闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 1.1‰ 至 -43.3‰ ,其还原硫来自围岩中石膏的BSR作用(周维全等,1992;唐永永等,2013;Xue et al., 2015; Deng et al., 2017; Yalikun et al., 2018)。笔者分析,当这些硫化物或形成这些硫化物的还原硫发生氧化时,形成硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值会明显偏低,因此,金顶矿床充填型天青石中有氧化后还原硫的贡献。

4.3 天青石与铅锌成矿的关系

全球范围,一些天青石矿床中也发育铅锌硫化

物,如云南金顶、北非突尼斯铅锌成矿带内矿床,这些矿床中普遍出现石膏和硬石膏等蒸发盐。

目前,对于天青石与铅锌矿成矿的关系主要有2种观点:①天青石与铅锌矿为同期流体作用的产物(薛春纪等,2006;Xue et al., 2007; Abidi et al., 2012;余静等,2016);②天青石与铅锌矿为不同成矿事件下不同流体作用的产物,只是出现在同一矿床范围内(Bouhlef et al., 2016)。薛春纪等(2006)通过对金顶矿石中矿物的交生关系将矿化分为石英-闪锌矿-方铅矿、闪锌矿-方铅矿-天青石、方铅矿-方解石-天青石-石膏3个阶段,Xue等(2007)对方铅矿-闪锌矿-天青石的流体包裹体显微测温研究发现,天青石和铅锌矿的均一温度、盐度相似,认为天青石和铅锌矿为同期同成矿流体的产物。Abidi等(2012)对突尼斯 Ain Allega Pb-Zn-Sr 矿床矿物共生序列研究发现,天青石、重晶石与铅锌矿在空间分布上关系密切,认为两者之间为同期流体作用形成的。Bouhlef等(2016)通过对突尼斯 Bou Jaber 矿床研究,提出该矿床存在3期独立的矿化事件,由早到晚依次为铅锌矿化、重晶石矿和少量天青石矿化、萤石矿,流体包裹体显微测温及包裹体成分分析显示,3期矿化的均一温度和盐度明显不同,且重晶石包裹体中铅锌含量极低,因此,天青石和硫化物可能是不同期次、不同成矿流体的产物。

4.4 重晶石及钡在天青石中含量变化的成因

重晶石是沉积岩容矿天青石矿床中常见的一种矿物(Abidi et al., 2012),但除了墨西哥 Sabinas 盆地内天青石矿床和突尼斯境内少数几个天青石矿床外,重晶石在矿床中的含量较低,无经济价值。

天青石矿床中重晶石含量低有2个原因:①天青石和重晶石溶解度存在巨大差异。例如,在25℃,1个大气压条件下,重晶石的溶度积为 10^{-10} ,天青石的溶度积为 $10^{-6.63}$ (Hanor et al., 2000),两者相差3个数量级,因此,富铈的盆地卤水中一旦含有少量的硫酸盐时,钡就会和硫酸盐结合沉淀出重晶石,而铈不一定沉淀出来,导致流体中富铈贫钡;②不同于天青石,重晶石很难通过交代石膏/硬石膏形成。Forjanes等(2020)通过实验模拟发现,含铈流体与石膏/硬石膏接触时,可以迅速交代石膏/硬石膏,这时天青石晶粒在石膏/硬石膏表面无定向排列,晶粒之间的孔隙度较大,石膏/硬石膏表面之下可以继续发生交代作用;而含钡流体与石膏/硬石膏接触时反应缓

慢,使重晶石晶粒在石膏/硬石膏表面紧密,定向排列,形成一层薄的重晶石层,隔绝了含钡流体与表面之下的石膏/硬石膏接触,从而阻碍了更多重晶石的形成。

Hanor (2004) 通过统计发现,全球盆地卤水中铈的浓度与氯离子浓度成正相关,而钡的浓度与硫酸盐浓度成负相关,因海水蒸发作用或蒸发岩溶解形成的盆地卤水,其盐度较高,硫酸盐含量中等,Sr/Ba也较高,该流体与石膏/硬石膏相互作用时通常形成天青石,不含或少含重晶石。因此,推测只有在含高Ba/Sr流体与含硫酸盐流体混合时,才能同生沉淀出具经济价值的天青石-重晶石矿床。

在一些天青石矿床(如突尼斯 Ain Allega 和 El Aguib, 中国金顶等)中,天青石发育震荡环带或叶片出溶体结构(图11),不同震荡环带或叶片出溶体的Ba含量不同(Putnis et al., 1992; Heurreux et al., 2002; Lubashevsky et al., 2008; Abidi et al., 2012; 刘思彤等,2014)。Prieto(1997)通过实验模拟发现,当天青石从溶液中结晶时,当水溶液中Ba含量($X_{Ba, aq}$)很低时($0.000\ 05 < X_{Ba, aq} < 0.004$),才能形成上述环带或出溶结构,这时水溶液中Ba含量的微小变化,会导致结晶出的天青石中Ba的含量(X_{BaSO_4})变化较大, $0.1 < X_{BaSO_4} < 0.9$;当水溶液中Ba含量高时,则直接沉淀出重晶石而不形成环带或出溶结构(图12)。因此,当富Sr溶液中含有少量的钡时,Ba含量在水溶液中微小变化,会引起沉淀出天青石中Ba含量的变化,高Ba天青石在背散射图像上表现出明亮的区域,低Ba天青石在背散射图像上表现出灰暗的区域,因此,结晶出的天青石形成明暗相间的环带和出溶体。

5 结 论

沉积岩容矿的天青石矿床是铈最为重要的来源,全球广泛分布。矿体赋存于沉积岩中,呈层状和透镜状,围岩时代从志留纪到新近纪,岩性多为碳酸盐岩和蒸发岩组合,少数为碎屑岩和蒸发岩组合。多数矿床为后生成因,为富铈流体交代沉积或底辟的石膏或硬石膏形成,或富铈流体与富硫酸盐流体混合、充填于开放空间内形成。少数矿床为同生成因,形成于蒸发环境,天青石从沉积水体中直接沉淀出,通常晚于碳酸盐岩,而早于石膏/硬石膏沉淀。后生矿床中,天青石的铈可以来自不同途径,包括流

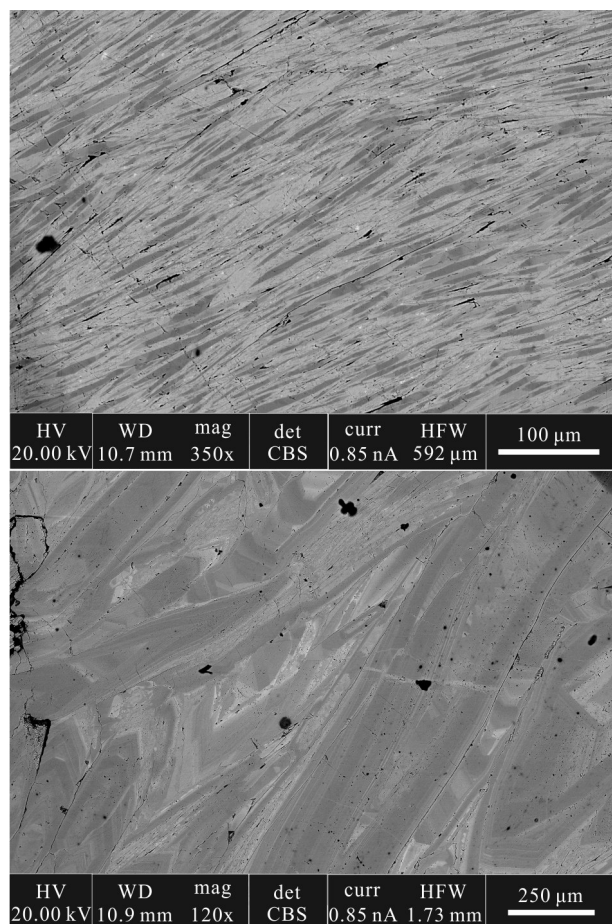


图11 具叶片状出溶体及震荡环带的天青石BSE图片(亮带为高Ba天青石,暗带为低Ba天青石)

Fig.11 The BSE image of leaf-shape exsolution and oscillatory zonation textures in celestite (Light zone represents Ba-rich celestite and dark zone represents Ba-poor celestite)

体与深部富钙的矿物相互作用萃取的锶、围岩碳酸盐岩重结晶过程中文石转变为方解石、硬石膏转变为石膏等过程释放的锶;同沉积矿床中,锶来自沉积水体本身,沉积源区的富锶岩石提供了锶。天青石的硫主要来自围岩地层中的石膏或硬石膏,有些矿床中石膏或硬石膏经历了细菌还原作用,个别矿床中硫化物氧化提供了部分硫。一些天青石矿床与MVT铅锌矿化出现在同一矿床内,但不同矿床情况不同,两者可以有成因关系,也可以无成因关系。重晶石在该类天青石矿床中普遍含量较低,仅在少数矿床中含量较高,后者为高Ba/Sr流体和含硫酸盐流体混合所致。富Sr流体中Ba含量很低时(0.000 05~0.004),沉淀产物中Ba不以重晶石的形式出现,而是进入到天青石晶格中,此时流体中Ba

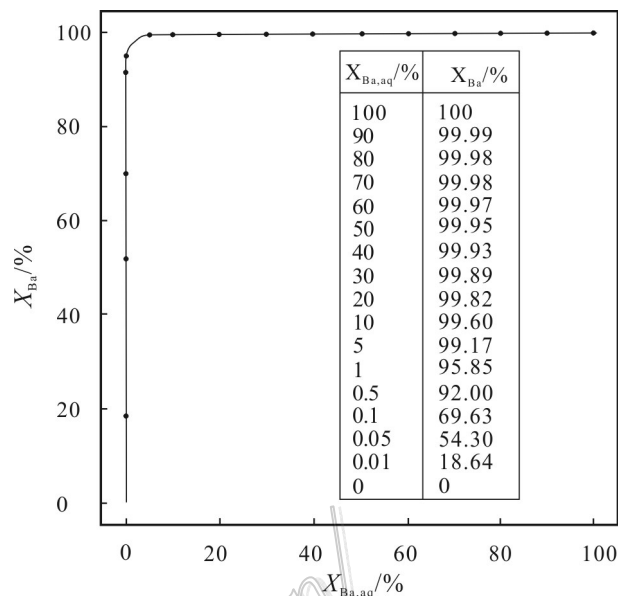


图12 (Sr,Ba)SO₄固溶体 $X_{Ba,aq}$ - X_{Ba} 图解($X_{Ba,aq}$ 为溶液中Ba含量; X_{Ba} 为晶体中Ba含量)(据Prieto, 1997)

Fig.12 The $X_{Ba,aq}$ - X_{Ba} diagram for (Sr,Ba)SO₄ solid solution ($X_{Ba,aq}$ refers to the concentration of Ba in the aqueous solution; X_{Ba} refers to the concentration of Ba in the solid) (after Prieto, 1997)

含量的震荡变化,会导致结晶出的天青石形成环带或出溶结构。

References

- Abidi R, Shimi N S, Somarin A and Henchiri M. 2010. Mineralogy and fluid inclusions study of carbonate-hosted Mississippi valley-type Ain Allega Pb-Zn-Sr-Ba ore deposit, northern Tunisia[J]. Journal of African Earth Sciences, 57(3): 262-272.
- Abidi R, Shimi N S, Gasquet D, Hatira N and Somarin A. 2011. Genesis of celestite-bearing cap rock formation from the Ain Allega ore deposit (northern Tunisia): Contributions from microthermometric studies[J]. Bulletin De La Societe Geologique De France, 182(5): 427-435.
- Abidi R, Shimi N S, Marnignac C, Hatira N, Gasquet D, Renac C, Soumarin A and Gleeson S. 2012. The origin of sulfate mineralization and the nature of the BaSO₄-SrSO₄ solid-solution series in the Ain Allega and El Aguiba ore deposits, northern Tunisia[J]. Ore Geology Reviews, 48: 165-179.
- Bazargani-Guilani K, Mohammad and Tak A. 2008. Celestite ore deposit and occurrences of the Qom Formation, Oligo-Miocene, Central Iran[J]. Geology and Seismology, 8: 23-38.
- Bejaoui J, Bouhlel S, Sellami A and Braham A. 2014. Geology, mine-

- ralogy and fluid inclusion study of Oued Jebbs Pb-Zn-Sr deposit; comparison with the Bou Grine deposit (diapirs zone, Tunisia atlas)[J]. *Arabian Journal Geosciences*, 7(6): 2483-2497.
- Bouhlef S, Leach D L, Johnson C A, Marsh E, Laouar S S and Banks D A. 2016. A salt diapir-related Mississippi Valley-type deposit: The Bou Jaber Pb-Zn-Ba-F deposit, Tunisia: Fluid inclusion and isotope study[J]. *Mineralium Deposita*, 51(6): 749-780.
- Breesch L and Stemmerik L. 2009. Genetic and fluid flow model of a large-scale celestite deposit in Karstryggen, Central East Greenland[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101: 9.
- Chen B F, Lin W S, Bai J H, Zhao H X, Li J L, Ren H, Bai Z H and Fu J. 2018. Geological characteristics and genetic analysis of Jindingshan stromium deposit in western Qaidam Basin[J]. *North-western Geology*, 51(4): 184-193 (in Chinese with English abstract).
- Chen J and Wang H N. 2004. *Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- De Brodtkorb M K, Ramos V, Barbieri M and Ametrano S. 1982. The evaporitic celestite-barite deposits of Neuquen, Argentina[J]. *Mineralium Deposita*, 17(3): 423-436.
- De Brodtkorb M K. 1997. Isotope data on barite and celestite deposits related to three Mesozoic evaporitic sequences of the Neuquen Basin, Argentina[J]. *International Geology Review*, 39(4): 307-316.
- Deng J, Wang C M, Bagas L, Selvaraja V, Jeon H, Wu B and Yang L F. 2017. Insights into ore genesis of the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, China: Evidence from Zn and in-situ S isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 943-957.
- Department of Geology, Nanjing University. 1979. *Geochemistry (the revised edition)*[M]. Beijing: Science Press. 1-373 (in Chinese).
- Dill H G, Kunst F H, Berner Z and Stuben D. 2009. Miocene diagenetic and epigenetic strontium mineralization in calcareous series from Cyprus and the Arabian Gulf: Metallogenic perspective on sub- and suprasalt redox-controlled base metal deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(4): 557-576.
- Dill H G, Nolte N and Hansen B T. 2014. Lithology, mineralogy and geochemical characterizations of sediment-hosted Sr-F deposits in the eastern Neo-Tethyan region-with special reference to evaporation and halokinesis in Tunisia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 92: 76-96.
- Ehrenberg S N, Pickard N A H, Laysen G V, Monibi S, Mossadegh Z K, Svana T A, Aqrabi A A M, McArthur J M and Thirlwall M F. 2007. Strontium isotope stratigraphy of the Asmari formation (Oligocene-Lower Miocene), SW Iran[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 30(2): 107-128.
- Ehya F, Shakouri B and Rafi M. 2013. Geology, mineralogy and isotope (Sr, S) geochemistry of the Likak celestite deposit, SW Iran[J]. *Carbonates Evaporites*, 28(4): 419-431.
- Forjanes P, Astilleros J M and Fernandez-Diaz L. 2020. The formation of barite and celestite through the replacement of gypsum[J]. *Minerals*, 10(2): 1-17.
- Ge W S and Cai K Q. 2001. Mineralization system of celestite deposits in northwestern Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 15(1): 53-58(in Chinese with English abstract).
- Hanor J S. 2000. Barite-Celestine geochemistry and environments of formation[J]. *Reviews of Mineralogy and Geochemistry*, 40(1): 193-275.
- Hanor J S. 2004. A model for the origin of large carbonate and evaporite hosted celestite (SrSO₄) deposits[J]. *Society for Sedimentary Geology*, 74(2): 168-175.
- Han J L, Han F Q, Nian X Q, Liu W Y, Mao Q F, Ma Z and Hussain S A. 2018. Study on the celestite and element geochemistry characteristics in the West of Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 26(4): 34-43 (in Chinese with English abstract).
- Heureux I L and Jamtveit B. 2002. A model of oscillatory zoning in solid solutions grown from aqueous solutions: Applications to the (Ba, Sr)SO₄ system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(3): 417-429.
- Hryniv S and Peryt T M. 2010. Strontium distribution and celestite occurrence in Zechstein (Upper Permian) anhydrites of West Poland[J]. *Geochemistry*, 70(2): 137-147.
- Hu G C. 2017. Geological characteristics and discussion of genesis to the Yuxi celestite Mine in Tongliang of Chongqing[D]. Supervisor: Mao X D. Chengdu: Chengdu University of Technology. 78p (in Chinese with English abstract).
- Hu G Y, Li Y H and Zeng P S. 2013. The role of halosalt in mineralization of the Jinding Pb-Zn deposit: Evidence from sulfur and strontium isotopic compositions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1694-1702(in Chinese with English abstract).
- Jemmali N, Souissi F, Carranza E J M and Vennemann T W. 2013. Sulfur and lead isotope of Guern Halfaya and Bou Grine deposits (Domes zone, northern Tunisia): Implications for sources of metals and timing of mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 54: 17-28.
- Jowett E C, Lawrence M Cathles III and Bruce W Davis. 1993. Predicting depths of gypsum dehydration in evaporite sedimentary Basins [J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77(3): 402-413.
- Kesler S E and Jones L M. 1981. Sulfur and strontium isotopic geochemistry of celestite, barite and gypsum from the Mesozoic Basins of North-eastern Mexico[J]. *Chemical Geology*, 31: 211-224.
- Liu C, Zhao T, Wang D H and Li J K. 2016. Strontium industry and future development strategy in China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 29-35(in Chinese with English abstract).
- Liu S T, Liu X and Gao H W. 2014. Study on the exsolution of celestite in Lanping Jinding Lead-Zinc deposit and the significance[J]. *Value Engineering*, 8: 309-311 (in Chinese with English abstract).
- Liu T. 2016. The development characteristics of evaporite and its metallogenic in Jinding lead-zinc deposits, Yunnan[D]. Supervisor: Zhu Z J. Nanchang: East China University of Technology. 61p(in Chinese with English abstract).
- Lubashevsky I, Mues T and Heuer A. 2008. Different routes towards oscillatory zoning in the growth of solid solutions[J]. *Physical Re-*

- view, 78: 1-18.
- Martin J M, Huertas M O and Ruiz L T. 1984. Genesis and evolution of strontium deposits of the Granada Basin (southeastern Spain): Evidence of diagenetic replacement of a stromatolite belt[J]. *Sedimentary Geology*, 39: 281-298.
- Ma S Q, Li S P, Xie Z Y, Pan T, Bai Z H, Chen J and Ren H. 2012. Characteristics and genetic analysis of celestite deposits in Dafeng mountain area, Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 45(3): 130-140 (in Chinese with English abstract).
- Moore F and Jami M. 1997. Syngenetic strontium ore deposition at the base of Asmari Formation, Bangestan anticline, Behbahan, Iran[J]. *Journal of Science and Technology*, 8(3): 178-188.
- Nian X Q. 2018. Geochemical characteristics of the rich strontium stratum in western Qaidam Basin and it's geological significance[D]. Supervisor: Han F Q. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 117p(in Chinese with English abstract).
- Pourkaseb H, Zarasvandi A, Rezaei M, Mahdavi R and Ghanavati F. 2017. The occurrence and origin of celestite in the Abolfares regions, Iran: Implications for Sr-mineralization in Zagros fold belt (ZFB)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 134: 352-364.
- Prieto M, Gonzalez F, Putnis A and Diaz L F. 1997. Nucleation, growth, and zoning phenomena in crystallizing $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{CO}_3$, $\text{Ba}(\text{SO}_4, \text{CrO}_4)$, $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{SO}_4$ and $(\text{Cd}, \text{Ca})\text{CO}_3$ solid solutions from aqueous solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(16): 3383-3397.
- Putnis A, Diaz L F and Prieto M. 1992. Experimentally produced oscillatory zoning in the $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{SO}_4$ solid solution[J]. *Nature*, 358(6389): 743-745.
- Qin G J and Zhu S Q. 1991. Prediction of Jinding lead-zinc ore deposit[J]. *Yunnan Geology*, 10(2): 145-190(in Chinese with English abstract).
- Ramos V A and De Brodtkorb M K. 1990. The barite and celestite metallotects of the Neuquen Retroarc Basin, Central Argentina[J]. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*, Springer Verlag, 47: 599-613.
- Sánchez F G, Camprubi A, Partida E G, Solís R P, Canet C, Garcia E C and Atudorei V. 2009. Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorite, barite and Pb-Zn deposits in the MVT province of northeastern Mexico[J]. *Mineralium Deposita*, 44(3): 343-361.
- Scholle P A, Stemmerik L and Harpoth O. 1990. Origin of major karst-associated celestite mineralization in Karstrygeen, Central East Greenland[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60(3): 397-410.
- Shi H Y, Miao W L, Zhang X Y, Li W X, Tang Q L and Li Y S. 2018. Geological characteristics and ore-forming material source of celestite deposits in Dafeng mountain, northwestern Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1733-1752(in Chinese with English abstract).
- Song Y C, Liu Y C, Hou Z Q, Fard M, Zhang H R and Zhuang L L. 2019. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonics setting, and ore controls[J]. *Gondwana Research*, 75: 249-281.
- Song Y C, Hou Z Q, Xue C D and Huang S Q. 2020. New mapping of the world-class Jinding Zn-Pb deposits, Lanping Basin, Southwest China: Genesis of ore host rocks and records of hydrocarbon-rock interaction[J]. *Econ. Geol.*, 115(5): 981-1002.
- Souissi F, Sassi R, Dandurand J L, Bouhlel S and Hamda S B. 2007. Fluid inclusion microthermometry and rare earth element distribution in the celestites of the Jebel Doghra ore deposit (Dome Zone, northern Tunisia): Towards a new genetic model[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 178(6): 459-471.
- Sun Y, Liu X F, Wang R J, Chen Z Y, Li J K, Li S P and Zhao Z. 2013. Compositions characteristics of celestite in Dafengshan strontium deposit, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(1): 148-156 (in Chinese with English abstract).
- Taberner C, Marshall J D, Hendry J P, Pierre C and Thirlwall M F. 2002. Celestite formation, bacterial sulphate reduction and carbonate cementation of Eocene reefs and Basinal sediments (Igualada, NE Spain)[J]. *Sedimentology*, 49(1): 171-190.
- Tang Y Y, Bi X W, Wu L Y, Zou Z C and He L P. 2013. Re-Os isotopic dating of pyrite from Jinding Zn-Pb ore deposit and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 287-294(in Chinese with English abstract).
- Tekin E. 2001a. Stratigraphy, geochemistry and depositional environment of the celestine-bearing gypsiferous formation of the Tertiary Ulas-Sivas Basin, East-Central Anatolia (Turkey) [J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 10: 35-49.
- Tekin E, Varol B and Friedman G M. 2001b. A preliminary study: Celestite-bearing gypsum in the Tertiary Sivas Basin, central-eastern Turkey[J]. *Carbonates and Evaporites*, 16(1): 93-101.
- Tekin E, Varol B, Ayan Z, Ankara, Satir M and Tubingen. 2002. Epigenetic origin of celestite deposits in Tertiary Sivas Basin: New mineralogical and geochemical evidence[J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 7: 289-318.
- Tritlla J, Lamadrid H and Levresse G. 2007. El Tule stratabound F-Sr deposit: A key to understand the origin and mobilization of basinal brines in NE Mexico[J]. *Proceeding of the Ninth Biennial SGA Meeting*, 1339-1342.
- Veigas J G, Rosell L, Cendon D I, Gibert L, Martin J M, Ruiz J T and Orti F. 2015. Large celestine orebodies formed by early-diagenetic replacement of gypsified stromatolites (Upper Miocene, Montevive-Escuzar deposit, Granada Basin, Spain) [J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 187-199.
- Wood M W and Shaw H F. 1976. The geochemistry of celestites from the Yate area near Bristol (U.K.)[J]. *Chemical Geology*, 17: 179-193.
- Xu C H. 2016. Brief Study on the metallogenic geological setting and genesis to celestite in Mts. Huaying Sichuan-Chongqing[D]. Supervisor: Mao X D. Chengdu: Chengdu University of Technology. 74p(in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Zeng R, Gao Y B, Zhu H P, Zhao S H and Li Y Q. 2006. Fluid processes of a heavy metallogenesis at Jinding, Lanping, SW-

- China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1031-1039(in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M and Wang D H. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 337-359.
- Xue C J, Chi G X and Fayek M. 2015. Micro-textures and in situ sulfur isotopic analysis of spheroidal and zonal sulfides in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China: Implications for biogenic processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103(1): 288-304.
- Xue T X. 1999. Celestite (Sr) deposits in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 21(3): 141-148(in Chinese with English abstract).
- Xu X G. 1984. Genetic types of celestite deposits and their prospecting direction discussed from strontium geochemistry[J]. *Geological Review*, 30(2): 146-154(in Chinese with English abstract).
- Yalikun Y, Xue C J, Dai Z J, Chi G X, Fayek M and Symons D. 2018. Microbial structures and possible bacterial sulfide fossils in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, SW-China: Insights into the genesis of Zn-Pb sulfide mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 61-72.
- Yang Q T. 1998. Genesis of a celestite deposit with reference to its geological characteristics[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 20(1): 32-37(in Chinese with English abstract).
- Yan J P, Han F Q, Ma R Y, Luo C G and Zhang Y X. 2011. Study on geological and geochemical characteristics of Jiandingshan strontium mine in Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 19(4): 15-20(in Chinese with English abstract).
- Yin J. 2016. The feature and evolution of metallogenic fluid of Jinding Pb-Zn deposit, Lanping[J]. *Yunnan Geology*, 35(2): 167-174(in Chinese with English abstract).
- Yu J. 2016. The mechanisms of sulfate-sulfide-carbonate intergrowth and companion for Paomaping lead-zinc deposit of Jinding ore-field in Lanping, northwestern Yunnan, SW China[D]. Supervisor: Xue C D. Kunming, Kunming University of Science and Technology. 78p(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z B. 2018. Geochemical characteristics of evaporites and its relation to metallogenesis in Lanping Basin[D]. Supervisor: Zhu Z J. Nanchang: East China University of Technology. 95p(in Chinese with English abstract).
- Zheng H F, Guo F S, Zhu Z J and Jiang Y B. 2012. Carbon, oxygen and sulfur isotope geochemistry characteristic of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan and their geological significance[J]. *Resources Survey and Environment*, 33(4): 218-224(in Chinese with English abstract).
- Zhou W Q and Zhu Q L. 1992. A study of the isotopic composition of Pb and S in the Lanping Pb-Zn deposit, Yunnan Province[J]. *Geochimica*, 2: 141-148(in Chinese with English abstract).
- Zhu C L. 2009. Geology and exploitation of advantages of celestite mineralization in Qaidam Basin[J]. *China Non-metallic Minerals Industry Guide*, 4: 55-57(in Chinese with English abstract).
- Zhu C Y and Wu W H. 1999. Stable Isotopic characteristics and metallogenic mechanism of Huayingshan strontium mineralization belt[J]. *Geochimica*, 28(2): 197-202(in Chinese with English abstract).
- Zhu Q Q, Xie G Q and Han Y X. 2017. SHRIMP zircon U-Pb dating of quartz diorite porphyry from the Shizilishan Sr (Pb-Zn) deposit in Hubei Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3484-3494(in Chinese with English abstract).
- Zhu Z J and Guo F S. 2018. Geological characteristics of gypsum and its geological significance in Jinding mining area of Lanping Basin, western Yunnan[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 41(4): 226-235(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈秉芳, 林文山, 白建海, 赵海霞, 李建亮, 任华, 白宗海, 付军. 2018. 青海尖顶山锶矿床地质特征及成分分析[J]. *西北地质*, 51(4): 184-193.
- 陈骏, 王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 葛文胜, 蔡克勤. 2001. 柴达木盆地西北部锶矿成矿系统研究[J]. *现代地质*, 15(1): 53-58.
- 韩继龙, 韩凤清, 年秀清, 刘文玉, 毛庆飞, 马喆, Hussain S A. 2018. 柴达木盆地西部天青石矿区矿物学与元素地球化学特征研究[J]. *盐湖研究*, 26(4): 34-43.
- 胡广灿. 2017. 重庆铜梁玉峡天青石矿床地质特征及成因讨论(硕士论文)[D]. 导师: 毛晓冬. 成都: 成都理工大学. 78页.
- 胡古月, 李延河, 曾普胜. 2013. 膏盐在金顶铅锌矿成矿中的作用: 硫和锶同位素证据[J]. *地质学报*, 87(11): 1694-1702.
- 刘超, 赵汀, 王登红, 李建康. 2016. 中国锶矿产业发展现状与未来发展策略思考[J]. *桂林理工大学学报*, 36(1): 29-35.
- 刘思彤, 刘星, 高慧文. 2014. 兰坪金顶铅锌矿床天青石出溶现象的研究及意义[J]. *价值工程*, 8: 309-311.
- 刘腾. 2016. 云南金顶铅锌矿床蒸发岩发育特征及其金属成矿意义研究(硕士论文)[D]. 导师: 朱志军. 南昌: 东华理工大学. 61页.
- 马顺清, 李善平, 谢智勇, 潘彤, 白宗海, 陈静, 任华. 2012. 青海大风山天青石矿床地质特征及成因分析[J]. *西北地质*, 45(3): 130-140.
- 南京大学地质系. 1979. 地球化学(修订版)[M]. 北京: 科学出版社. 1-373.
- 年秀清. 2018. 柴达木盆地西缘富锶地层的地球化学特征及其地质意义(博士论文)[D]. 导师: 韩凤清. 北京: 中国科学院大学. 117页.
- 覃功炯, 朱上庆. 1991. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. *云南地质*, 10(2): 145-190.
- 石海岩, 苗卫良, 张西营, 李雯霞, 唐启亮, 李永寿. 2018. 柴达木盆地西北部大风山天青石矿床地球化学特征及成矿物源属性探讨[J]. *地质学报*, 92(8): 1733-1752.
- 孙艳, 刘喜方, 王瑞江, 陈振宇, 李建康, 李善平, 赵芝. 2013. 青海大风山锶矿床中天青石的成分特征[J]. *矿床地质*, 32(1): 148-156.
- 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 邹志超, 和利平. 2013. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *矿物学报*, 33(3): 287-294.

- 徐长昊. 2016. 四川-重庆华蓥山天青石成矿地质条件及矿床成因研究(硕士论文)[D]. 导师: 毛晓冬. 成都: 成都理工大学. 74页.
- 薛春纪, 曾荣, 高永宝, 朱和平, 赵世华, 李永强. 2006. 兰坪金顶大规模成矿的流体过程-不同矿化阶段流体包裹体微量元素约束[J]. 岩石学报, 22(4): 1031-1039.
- 薛天星. 1999. 中国(天青石)锗矿床概述[J]. 化工矿产地质, 21(3): 141-148.
- 徐兴国. 1984. 从锗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.
- 杨清堂. 1998. 沉积型天青石矿的地质特征及其成因探讨[J]. 化工矿产地质, 20(1): 32-37.
- 闫建平, 韩凤清, 马茹莹, 罗重光, 张燕霞. 2011. 柴达木盆地尖顶山锗矿地质地球化学特征研究[J]. 盐湖地质, 19(4): 15-20.
- 尹静. 2016. 兰坪金顶铅锌矿床成矿流体特征与演化[J]. 云南地质, 35(2): 167-174.
- 余静. 2016. 兰坪金顶跑马坪铅锌矿床硫酸盐-碳酸盐-硫化物共(伴)生机制(硕士论文)[D]. 导师: 薛传东. 昆明: 昆明理工大学. 78页.
- 张治波. 2018. 兰坪盆地蒸发岩的地球化学特征及其与金属成矿关系探讨(硕士论文)[D]. 导师: 朱志军. 南昌: 东华理工大学. 95页.
- 郑海峰, 郭福生, 朱志军, 姜勇彪. 2012. 云南金顶铅锌矿碳、氧、硫同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 资源调查与环境, 33(4): 218-224.
- 周维全, 周全立. 1992. 兰坪铅锌矿床铅和硫同位素组成研究[J]. 地球化学, 2: 141-148.
- 朱朝良. 2009. 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, 4: 55-57.
- 朱创业, 武文慧. 1999. 华蓥山锗成矿带稳定同位素特征及成矿机理探讨[J]. 地球化学, 28(2): 197-202.
- 朱乔乔, 谢桂青, 韩颖霄. 2017. 湖北狮子立山锗(铅锌)矿区石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. 岩石学报, 33(11): 3484-3494.
- 朱志军, 郭福生. 2018. 滇西兰坪盆地金顶铅锌矿区石膏的地球化学特征及其指示意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4): 226-235.

<http://www.kcdz.ac.cn/>