

doi: 10.12029/gc20231012003

张怡婷, 钟怡江, 王春连, 李梦凡, 张述鹏. 2025. 中国重晶石矿床分布特征、成因类型、资源应用现状及其展望[J]. 中国地质, 52(2): 495–512.
Zhang Yiting, Zhong Yijiang, Wang Chunlian, Li Mengfan, Zhang Shupeng. 2025. Distribution characteristics, genesis types, current status of resource application of barite deposits in China and its prospects[J]. Geology in China, 52(2): 495–512(in Chinese with English abstract).

中国重晶石矿床分布特征、成因类型、资源应用现状及其展望

张怡婷^{1,2,3,4}, 钟怡江^{1,2,3,4}, 王春连⁵, 李梦凡^{1,2,3,4}, 张述鹏^{1,2,3,4}

(1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中石油集团碳酸盐岩储层重点实验室成都理工大学分室, 四川 成都 610059; 4. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要:【研究目的】重晶石作为中国优势矿种, 存在开发利用率低等问题。为保障中国重晶石资源安全, 寻找更多的重晶石资源, 本文对支撑石油勘探工业发展和拓宽应用领域具有重要意义。【研究方法】本文总结了重晶石的成矿时代、成矿特征、矿床成因类型和成矿物质来源, 系统梳理了中国重晶石的分布情况、资源现状以及应用情况, 为我国今后对重晶石的开采和应用方面提供了参考。【研究结果】中国重晶石矿床的成因类型可分为沉积型、火山沉积型、热液型、层控热液型、风化残坡积型。根据成矿流体来源重晶石可分为海底热液重晶石和生物重晶石这两个端元。全球重晶石已探明储量大约 7.4 亿 t, 中国有贵州、广西、湖南和福建等 26 个省份产出重晶石, 作为我国关键矿产之一, 是全世界第二大生产国, 品位高且出口量大, 被广泛应用于油气工业、高新材料、医疗、军事和环保等领域。【结论】中国重晶石矿床主要形成于古生代和中生代的江南地区、秦岭地区和黔—桂地区, 且以沉积型矿床为主。重晶石成矿流体来源类型繁多, 通过地球化学标志可判断出成矿物质来源于海底热液, 而通过生物标志化合物和偏重的硫同位素可得出生物成因结论。重晶石作为重要的高新材料之一, 在未来集约化、高效和绿色的产业发展机制中, 需注重提高重晶石的精深加工水平、发展战略性新兴产业和拓宽重晶石的应用领域。中国重晶石矿找矿远景应着重加强寻找扬子地台南缘的超大型和大型重晶石矿点, 对类似于甘青宁重晶石成矿区等低品位重晶石矿和伴生重晶石矿床的寻找也不容忽视, 以及不断探索开发华北和新疆等地区, 去寻找更丰富的重晶石资源。

关键词: 重晶石; 矿床类型; 成矿模式; 资源特征; 应用; 找矿潜力; 矿产勘查工程

创 新 点: (1) 总结了我国重晶石矿床的成因类型、成矿特征、成矿背景等方面; (2) 分析了目前我国重晶石资源现状以及应用情况, 以及找矿潜力和开发利用方向, 提高重晶石资源的综合利用率。

中图分类号: P619.251 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0495-18

Distribution characteristics, genesis types, current status of resource application of barite deposits in China and its prospects

ZHANG Yiting^{1,2,3,4}, ZHONG Yijiang^{1,2,3,4}, WANG Chunlian⁵, LI Mengfan^{1,2,3,4},
ZHANG Shupeng^{1,2,3,4}

收稿日期: 2023-10-12; 改回日期: 2024-02-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005)和中国地质调查局项目(DD20230056、DD20190606、DD20221684、DD20230291)联合资助。

作者简介: 张怡婷, 女, 1998 年生, 硕士生, 研究方向为碳酸盐岩沉积学; E-mail: 1258872149@qq.com。

通信作者: 钟怡江, 男, 1983 年生, 副教授, 主要从事碳酸盐岩沉积学研究; E-mail: zhongyijiang2012@cdut.edu.cn。

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Branch of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 5. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Barite, as a dominant mineral resource in China, faces challenges such as low utilization efficiency. To ensure the security of China's barite resources, it is essential to further explore and develop barite reserves. This effort is of significant importance for supporting the development of the petroleum exploration industry and broadening its application fields.

[Methods] This paper summarizes the metallogenic epochs, characteristics, genetic types, and material sources of barite deposits. Meanwhile, it systematically reviews the distribution, resource status, and applications of barite in China. This work provides a reference for future mining and application of barium sulfate in China. **[Results]** The genetic types of barite deposits in China can be classified into sedimentary, volcanic-sedimentary, hydrothermal, stratified hydrothermal, and weathering residual-slope accumulation types. Based on the sources of metallogenic fluids, barite can be divided into two end-members: submarine hydrothermal barite and biogenic barite. Globally, the proven reserves of barite are approximately 740 million tons. In China, barite is produced in 26 provinces, including Guizhou, Guangxi, Hunan, and Fujian. As one of China's critical minerals, it ranks as the world's second-largest producer, characterized by high-grade deposits and significant export volumes. Barite is widely used in various fields such as the oil and gas industry, advanced materials, medical treatment, military, and environmental protection sectors.

[Conclusions] Barite deposits in China primarily formed during the Paleozoic and Mesozoic eras, with key regions including the Jiangnan, Qinling, and Guizhou–Guangxi areas, dominated by sedimentary-type deposits. The sources of barite metallogenic fluids for barite are diverse. Geochemical signatures indicate that the metallogenic materials originate from submarine hydrothermal fluids, while biomarker compounds and heavier sulfur isotopes indicate a biogenic origin. As one of the crucial advanced materials, barite requires a focus on enhancing its deep processing capabilities, developing its strategic emerging industries, and expanding its application fields within the framework of future intensive, efficient, and green industrial development mechanisms. The future prospecting potential for barite in China should focus on the following aspects to discover more abundant barite resources: Firstly, emphasis should be placed on exploring super-large and large barite deposits in the southern margin of the Yangtze Platform. Secondly, the exploration of low-grade barite deposits and associated barite deposits, similar to those in the Gansu–Qinghai–Ningxia barite metallogenic region, should not be overlooked. Finally, continuous exploration and development in regions such as North China and Xinjiang.

Key words: barite; deposit type; metallogenic model; resource characteristic; application; prospecting potential; mineral exploration engineering

Highlights: (1) This study summarized the genetic type, metallogenic characteristics, and metallogenic background of barite ore; (2) We analyzed the current resource status and application of barite in China, as well as the potential for finding minerals and the direction of development and utilization, and improved the comprehensive utilization rate of barite resources.

About the first author: ZHANG Yiting, female, born in 1998, master candidate, majors in carbonate sedimentology; E-mail: 1258872149@qq.com.

About the corresponding author: ZHONG Yijiang, born in 1983, associate professor, mainly engaged in carbonate sedimentology; E-mail: zhongyijiang2012@cdut.edu.cn.

Fund support: Supported by Basic Research Funds of Public Welfare Research Institutes of the Central Government (No.KK2005) and the projects of China Geological Survey (No.DD20230056, No.DD20190606, No.DD20221684, No.DD20230291).

1 引 言

“重晶石(Barite)”是硫酸钡(BaSO_4)的矿物学

名称,该名字起源于希腊单词“barus”(重的),以呼应其为最重的非金属矿物的地位。在自然界中,重晶石晶体常以粒状、结晶块状、结核状、莲座状的

集合体形式产出,也常呈现为细晶质的致密(细—厚)层状。重晶石的高比重(密度达 4.5 g/cm^3)特征使其在石油和天然气钻探行业中成为了不可替代的加重材料,这主导着全球重晶石的勘探、扩张和贸易。此外,重晶石还具有化学惰性强、稳定性高、耐酸碱、难溶于水、无毒、无磁性、低硬度、高白度、能吸收 X、 γ 射线等理化性能,从而被广泛应用于石油、化工、建材、医药等多个领域,并为国防工业和战略性新兴产业的发展提供重要的矿产原料,与国家安全和经济健康息息相关,分别于 2017 年和 2018 年被欧盟和美国纳入了关键矿产名单中。除了产业价值,重晶石还是研究全球气候环境演变的重要分析对象:重晶石广泛形成于海洋环境 (Goldberg and Arrhenius, 1958; Bishop, 1988; Clark et al., 1990; Bernstein et al., 1992; Jewell et al., 2000; Ganeshram et al., 2003; Griffith and Paytan, 2012), 记录了钡元素生物地球化学过程的重要信息,常作为重建地质历史时期海洋生产力的有力指标 (Goldberg and Arrhenius, 1958; Bishop, 1988; Clark et al., 1990; Shimmield and Mowbray, 1991; Dymond et al., 1992; Francois et al., 1995; Prakash Babu et al., 2002), 对重塑地球古气候古环境演变具有重要价值。

目前全球重晶石资源丰富,已探明储量大约 7.4 亿 t^①,但主要集中分布于中国、哈萨克斯坦、印度、美国、土耳其、摩洛哥、俄罗斯、伊朗、阿尔及利亚等国家。20 世纪 70—80 年代,世界重晶石资源勘探普遍获得成功,之后,源于全球原油生产规模扩张、美国油气钻井项目大幅缩减、中国重晶石出口量增长等因素的影响,中国常年以来在重晶石的生产量和供给量上位居世界第一,对全球重晶石市场意义重大。2022 年世界上最大的三个重晶石生产国是印度(32%)、中国(24%)和摩洛哥(17%)(% 表示占世界重晶石生产量的百分比)。鉴于资源所具有的遏制力、稀缺性和影响力原则,姜雅等 (2021) 建议在《全国矿产资源规划(2021—2025)》中将重晶石列为关键矿产之一。本文在大量地质勘查、科研、生产和开发利用等方面资料的基础上,对中国重晶石矿产的赋存特征、地质背景、形成机理、生产开发利用现状以及未来发展趋势进行了全面的评述,旨在为中国重晶石行业的发展提供有益

参考。

2 中国重晶石矿床的时空分布及古地理背景

中国的重晶石资源丰富,其地理分布广泛,全国 26 个省(区)均有重晶石矿床的存在(余文波等, 2022),但重要矿集区多分布于扬子板块南缘的江南地区和黔—桂地区以及扬子板块北缘的秦岭地区(Wang and Li, 1991),体现了中国大地构造格局对重晶石矿床地理分布的控制。重晶石成矿的地质时代跨度大,从距今 29 亿年前的新元古代开始,一直到新近纪的地层中都有重晶石矿的产出(图 1)。中国南方下寒武统的海相黑色岩系中钡元素的大量富集被认为是该时期地层中大规模产出重晶石矿的主要控制因素(范德廉等, 1987)。从新元古代至志留纪,秦岭地区位于靠近扬子板块与华北板块之间缝合带的被动大陆边缘裂谷带,并在以裂陷盆地为主的深水还原环境中沉积了大量海相黑色页岩和硅质岩岩系(刘思聪等, 2021)。该套地层中广泛发育层状或近层状毒重石—重晶石矿床(点),并呈近东西向展布于从甘肃、陕西经四川沿着湖北和河南的边界延伸至安徽的狭长地带中,典型矿床包括甘肃文县东风沟重晶石矿、四川省城口巴山毒重石矿、湖北省随州市柳林重晶石矿等。江南成矿带位于扬子板块内部并靠近扬子板块南缘,其南部与华南褶皱带相结合。从新元古代至早寒武世,江南成矿带总体上属于与加里东构造旋回早期强烈的板内拉张活动有关的陆缘槽状深水断陷盆地,沉积了大规模的黑色岩系(但层厚薄于秦岭地区),夹杂出现含磷结核、磷矿层、硅质放射虫等远洋凝缩沉积物(赵代珍, 1986; 褚有龙, 1989; 高怀忠, 1998),且富含有机质的现象(如含有石煤一类的高碳质页岩)十分普遍,表现出滞流、缺氧的古地理环境特征。江南成矿带的矿区跨越广西、贵州、湖南、江西、安徽等多省,以贵州地区的储量最为丰富,其中的天柱大河边重晶石矿床迄今为全球探明储量最大的重晶石矿床(Han et al., 2015)(图 2)。

3 重晶石矿床类型

自 20 世纪 50 年代以来,国际上对于重晶石矿

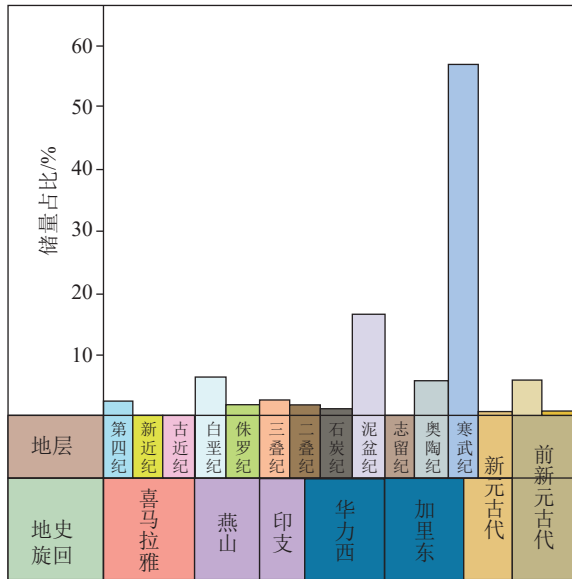


图1 中国重晶石矿床主要形成时代及不同地层储量占比直方图(据 Li et al., 2023)

Fig.1 Histogram of major metallogenic age of barite deposits in China and the percentage of reserves in each stratum (after Li et al., 2023)

床类型的划分,论述较多,且侧重点各有不同。具有代表性的分类方案包括:依据成因将重晶石矿床

分为沉积型、热液型和风化残坡积型(Clark et al., 1990; Jewell et al., 2000; Hanor et al., 2000);依据构造背景可将重晶石矿床分为大陆边缘型和克拉通裂谷型矿床(Turner, 1992; Cansu and öztürk, 2020);根据钡的来源将重晶石分为沉积重晶石、成岩重晶石和热液重晶石(Griffith and Paytan, 2012),以及按照矿体形状把矿床分为层状、脉状、残余状矿床(Penaloza et al., 2023)。在上述的几套方案中,以成因分类应用最为广泛,且以此为基础,有学者根据不同的研究需求划分出众多亚类(Brobst, 1958; Clark et al., 1990; Turner, 1992; Jewell et al., 2000; Jébrak et al., 2011; Bulatovic, 2015; Alaminia and Sharifi, 2018; Zhou et al., 2018)。

中国重晶石矿床在产出形态、成因、成矿构造背景及形成环境等方面较复杂,长期以来没有统一的重晶石矿床分类标准。针对这一问题, Li et al.(2023)以矿体产状特征、成矿机制、含矿岩系和地质背景为依据,将中国的重晶石矿床划分为沉积型、热液型、层控热液矿脉型、火山沉积型和风化残坡积型五种类别,并结合矿床自然分布的具体情

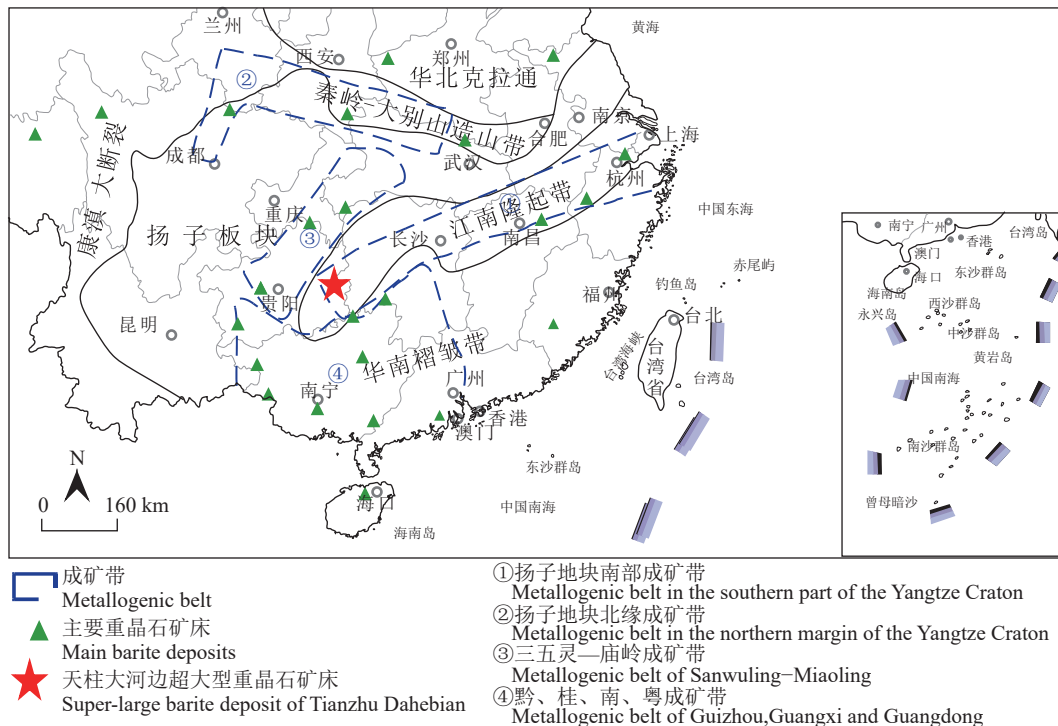


图2 中国南方重晶石矿分布图(据李文炎和余洪云, 1991; Wang and Li, 1991; 宣之强, 1999; 李春阳等, 2010)

Fig.2 Distribution of barite mines in the South China (after Li Wenyan and Yu Hongyun, 1991; Wang and Li, 1991; Xuan Zhiqiang, 1999; Li Chunyang et al., 2010)

况对各类别矿床的占比进行了统计。结果表明, 中国的重晶石矿床类型以沉积型为主, 占国内总储量的 69.16%, 其余依次为火山沉积型(11.45%)、层控热液矿脉型(10.84%), 而热液型和风化残坡积型的占比较低, 分别为 6.93% 和 1.72%。这个分类方案是对国际上主流的成因分类方案的修改和细化, 便于更有效地指导国内矿床的地质研究、矿床勘查、开采及评价。以下就以此分类方案为框架, 针对中国重晶石矿床的成矿特征展开论述, 相对应的具有代表性的矿区的成矿模式见图 3。

3.1 沉积型重晶石矿床

无论是从储量还是产量上来说, 沉积型重晶石矿床是中国以及全球重晶石的主要来源, 同时也是中国重晶石的主要出口类型(Clark et al., 2004)。此类矿床规模多为大中型, 是最具商业价值的矿床, 为中国目前重晶石矿产行业的主要开采类型及勘探目标。沉积型重晶石矿床以层状、似层状、透镜状沉积物的形式产出于沉积岩系中, 具有层位稳定, 与顶、底板地层的产状保持一致, 沉积构造发育的特征。矿体可由一层至多层组成, 单层厚度可变

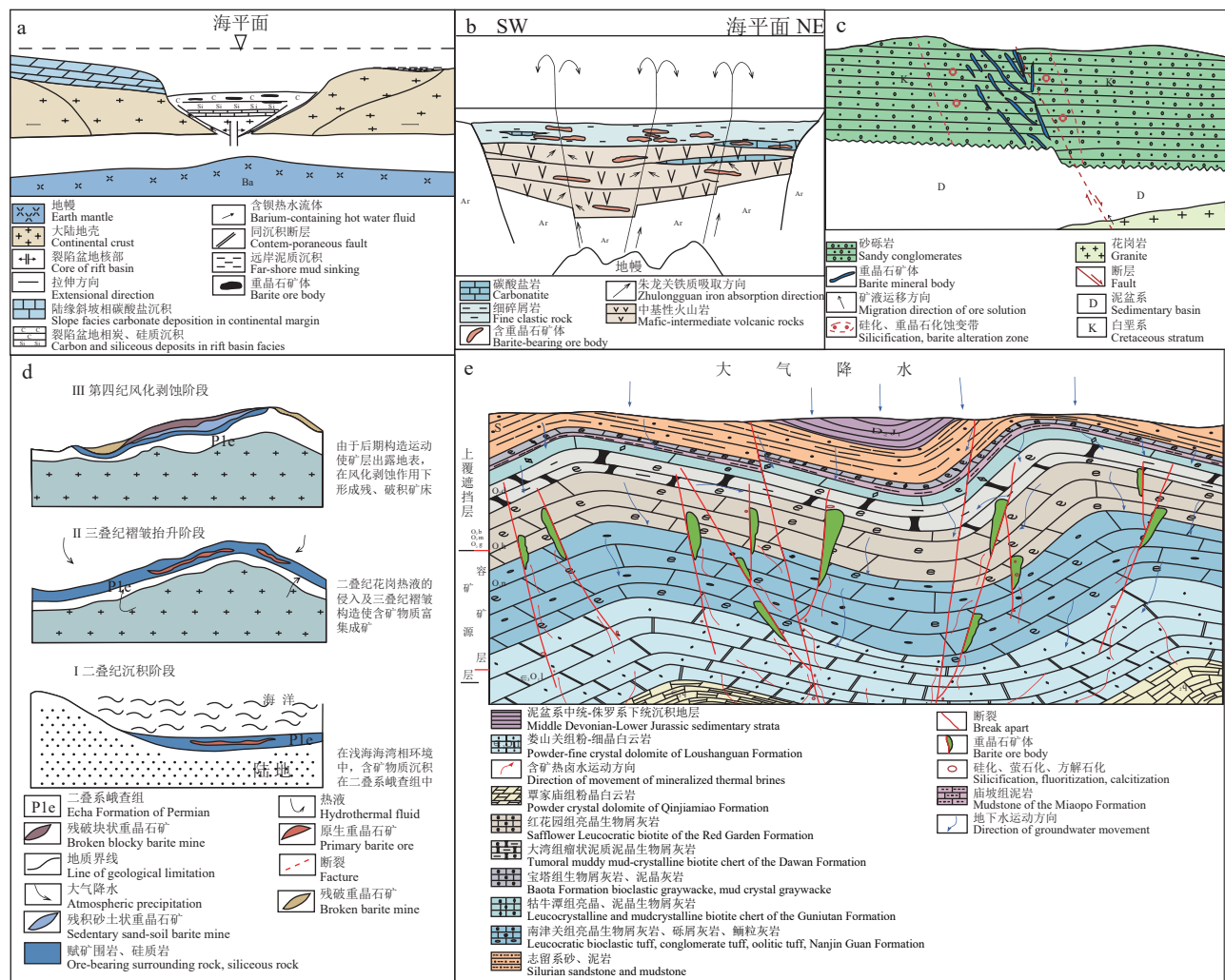


图 3 典型重晶石矿成矿模式图

a—沉积型(据田升平等, 2014); b—火山沉积型(据田江涛等, 2017); c—热液型(据田升平等, 2014); d—风化残坡积型(据田升平等, 2014); e—层控热液型(据何钦和张扬, 2018)

Fig.3 Map of typical barite metallogenic model

a—Sedimentary type (after Tian Shengping, 2014); b—Volcanic-sedimentary type (after Tian Jiangtao et al., 2017); c—Hydrothermal type (after Tian Shengping, 2014); d—Weathering residual slope type (after Tian Shengping, 2014); e—Stratified hydrothermal type (after He Qin and Zhang Yang, 2018)

化在厘米级至上百米,平面延展可达几平方千米。矿石品位稳定、质纯、 BaSO_4 含量一般可达 60%~80%(李占远, 2004; 张福良和卢晓亚, 2017; 何建平, 2020), 矿物组合中常见方铅矿、闪锌矿、磷矿、黄铁矿、石煤和钼冰长石等共生矿产(汤继新和陈圣新, 1989; 黄燕, 2011; 韩善楚等, 2013; 齐兵德等, 2018; 郭素雄和杨进军, 2022; 杨瑞东等, 2023)。新晃贡溪—天柱大河边超大型重晶石矿床(图 3a)、三江板必重晶石矿床、随州柳林重晶石矿、永安李坊矿区等皆是沉积型重晶石矿床的代表(李春阳等, 2010), 其赋矿地层通常为富含有机质的暗色硅质岩、千枚岩、页岩、磷质岩、粉砂岩及其组合岩相, 显示出封闭—半封闭的低能缺氧环境以及沉积期间较高的生物生产力, 为重晶石矿床的形成创造了条件。从含矿岩系的地层年龄和岩性上来说, 这些重晶石矿床与全球其他地区的同类型重晶石矿床大体一致。

3.2 火山沉积型重晶石矿床

火山沉积型重晶石矿床一般是指产于火山岩系中的沉积型层状矿床, 其物质来源往往与岩浆活动有关(如火山喷发物), 而成矿作用则发生在沉积过程中(图 3b)。此类重晶石的伴生矿物往往种类丰富, 如石英、萤石等非金属矿, 以及闪锌矿、方铅矿、铁矿等金属矿(张福良和卢晓亚, 2017)。中国已知的火山沉积型重晶石矿床主要分布在祁连造山带新元古代变质岩系中, 为元古宙弧—盆中的基性—超基性岩浆作用的产物。代表性矿床如甘肃南桦树沟(镜铁山)的重晶石矿, 该矿区中的重晶石与铁矿共生, 一般呈透镜体或条带状夹于铁矿层中。此外, 四川白玉岷村、新疆喀来子等地也存在火山沉积型重晶石矿床。其中, 白玉岷村的重晶石矿产于晚三叠世岛弧裂陷中的火山喷流—沉积过程中(王国洪等, 2020)。

3.3 热液型重晶石矿床

此类重晶石矿床是指含成矿物质的热液流体沿断层、裂缝、节理、层理面、破碎带(角砾岩)和溶解通道等结构流动, 并随着环境物理化学条件的改变, 以充填形式发生沉淀或交代作用, 从而形成脉状为主的重晶石及其伴生矿物。含矿热液大多来源于深部, 包括岩浆热液、火山—次火山热液、变质热液以及构造热液等。与沉积型矿床多形成于寒

武纪不同, 热液型矿床在奥陶纪、泥盆纪和三叠纪的地层中较常见(Li et al., 2023)。并且与沉积型矿床相比, 热液型矿床的规模相对较小, 多为中、小型, 中国热液型重晶石矿的围岩岩性多样, 并对最终充填物中的矿产相产生影响。以碳酸盐岩为宿主的热液重晶石矿床见于广西象州潘村(李春阳等, 2010)、鄂西南庄、贵州铜仁市沿河县等地(田升平等, 2014; 张建忠等, 2014; 文国江等, 2022), 常伴生萤石、黏土矿等; 而在碎屑岩地层中发育的重晶石矿则常与铅、锌、铜、辰砂等矿产共生, 典型代表如湖南谭子山地区充填于古近系—新近系红色砂、砾岩断裂中的热液重晶石矿脉(图 3c)。

3.4 层控热液型重晶石矿床

在热液重晶石矿床中, 相当一部分产于沉积岩区, 且矿脉分布具有明显的层控特征, 这类矿石建造的物质与热量来源与岩浆活动无直接联系, 而是与沉积岩区内的水—岩相互作用密切相关, 从而被归为层控热液矿脉型矿床。如在鄂西南庄地区, 重晶石矿脉的产出地层基本为下奥陶统的碳酸盐岩, 区域性断裂切割了其上覆的中奥陶统大湾组灰岩及下伏的上寒武统娄山关组白云岩地层, 却极少形成矿脉(何钦和张扬, 2018)(图 3e)。层控热液脉状重晶石矿床的成矿作用一般有如下几种: (1) 下渗水循环溶解作用。大气水沿裂隙、断层等下渗的过程中, 由于深度的增加而升温, 从而溶解围岩中含盐组分形成热卤水, 最终运移至有利位置富集成矿; (2) 含不同成矿组分流体的混合作用, 如下渗的海水(含 SO_4^{2-}) 与深部流体的混合; (3) 成矿物质的析出作用, 如含有氯化物的卤水浸出下伏岩层中的钡元素, 并在运移过程中遇到有利的物理化学条件(如向上覆地层的运移受阻等)下沉淀富集成矿。

3.5 风化残坡积型重晶石矿床

此类矿床往往出露于地表浅部, 系富含成矿物质的母岩经风化、侵蚀、淋滤作用再沉积形成的重晶石矿床(田升平等, 2014)。此类矿床主要分布于中国南方, 并且基本都处于层状或脉洞充填状重晶石矿床的成矿带, 成矿时代均为第四系(李春阳等, 2010)。风化残坡积型矿床的时空分布特征一方面体现出原生重晶石矿床为风化残坡积型矿床提供了母岩基础, 另一方面也显示出第四系以来华南的亚热带季风气候有利于母岩的风化及重晶石的浸

出。风化残坡积型重晶石矿床规模一般较小,多产于地形低缓的丘陵、台地、及山间洼地的残丘上,开采便利。重晶石通常呈半透明或不透明的致密细粒块状赋存在灰白色—灰黑色的疏松黏土残余物中。矿层由重晶石、石英、方解石、白云石、金属矿物(铁铜铅镍)及其氧化产物、以及未风化的岩石碎片组成(李文炎和余洪云, 1991)。典型的风化残坡积型重晶石矿见于海南省儋州市冰岭重晶石矿,含矿物质经过构造运动富集成矿,使矿层暴露于地表后,在水、大气和生物介质等的侵蚀作用下,二氧化硅及碳酸盐成分流失,造成土壤层中重晶石的富集,随后在重力作用下迁移至洼地(图 3d)。

4 重晶石矿床成矿流体来源

尽管钡和硫都是地壳的主要组成元素,但由于重晶石在氧化条件下的溶解度极低($\log K = 10^{-9.96}$) (Falkner et al., 1993),大多数天然流体中很难共存有 Ba^{2+} 和氧化态的硫,因而重晶石矿床的形成往往是不同来源和性质的流体之间相互作用的结果,尤其以富钡而贫硫酸盐的上升热液与浅部富硫酸盐而贫钡的低温流体的混合最为常见。由此可见,追踪成矿物质来源及其富集机理对于揭示重晶石的成因具有至关重要的作用。为此,研究者们借助多种岩石学、矿物学、流体包裹体和地球化学技术($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{138/134}\text{Ba}$, 微量及稀土元素等)

来辨识重晶石的成矿物质来源、沉淀环境以及全球海水组成的长周期性变化(Hanor et al., 2000),表 1 列举了中国典型重晶石矿床的同位素组成。概括地说,重晶石的成矿流体来源类型繁多,包括岩浆热液、地下水、海水、变质水、建造水等,且多数情况下涉及多种流体的参与。但无论最终形成哪一种类型的矿床(沉积型、热液型、风化残坡积型),流体在演化至成矿的漫长时期中,都发生过至少一次钡的富集过程。对富钡机理的解释一般基于两种端元模型,即热液模型和生物(海洋)模型(图 4)。近年来对一些现代海洋的实例研究证明,重晶石的形成可以是热液和生物两种作用叠加的结果(Hein et al., 2007; 林秋伶等, 2023),但单独的生物作用很难形成具有工业规模和纯度的重晶石矿床(Clark et al., 2004)。海水硫酸盐是重晶石矿床中硫的主要来源,此外,一些沉积重晶石中含有经硫酸盐还原菌改造后的硫,而在一些与火山或深部岩浆活动有关的矿区,硫同位素分布显示出幔源硫同位素组成的特征(李波等, 2007),表明部分硫的来源与地幔源硫的混入有关。

4.1 海底热液重晶石

重晶石形成的热液模型大都强调广泛的海底热液活动背景,常与同沉积断裂活动有关。热液沿活跃的海底断裂带流动,并从海底喷口排出(Poole, 1988)。这些热液中富含大量受岩浆的热量影响并

表 1 中国一些典型重晶石矿床中重晶石及其伴生矿物的 Sr、S、C、O 同位素组成

Table 1 Sr, S, C, O isotopic compositions of barite and its associated minerals in some typical barite deposits in China

矿区	测试矿物类型	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	数据来源
平利县神仙台	重晶石, 白云石	0.707556~0.708155	20.6~24.8	20.6~24.8		Xu et al., 2016
湖北赤炎	重晶石、毒重石	0.708459~0.708780	43.7~48.3	18.7~24.2		Xu et al., 2016
湖北竹山县文峪河	重晶石、毒重石、钡方解石		26.2~30.5	9.9~15.3	-20.4~-13.9	石龙, 2007
陕西紫阳黄柏树湾	毒重石、钡方解石	0.708272~0.708869		16.5~21.6	-16.6~-11.6	Lu et al., 2003
重庆市城口巴山	重晶石、毒重石、钡方解石	0.708266~0.708504	29.8~37.0	12.8~19.1	-18.9~-10.8	范德廉等, 2004
山西柳林	重晶石		31.8~40.1			Wang and Li, 1991
贵州镇宁	重晶石	0.70863~0.70898				高军波等, 2012
						夏菲等, 2004;
贵州天柱大河边	重晶石	0.708310~0.708967	29.5~57.4	16.7~18		Johnson et al., 2009;
						Han et al., 2015;
						温汉捷等, 2017
贵州施秉县顶罐坡	重晶石		16.13~28.82			李春阳等, 2010
湖北柳林	重晶石	0.708570~0.708810				方旭等, 2013
鄂西地区南庄坪	重晶石		23~36			何钦和张扬, 2018
陕西安康	重晶石、毒重石	0.708027~0.708447	30.5~54.2	9.9~18	-27.3~-11.8	叶连俊, 1998; Wu et al., 2015
广西象州	重晶石、白云石		11.77~30.09			贺胜辉等, 2014
湖南新晃	重晶石		33.04~41.02			彭军等, 1999; 孙学通, 2004
陕西略阳东沟坝	重晶石		16.9~20.3			汪东波和李树新, 1991

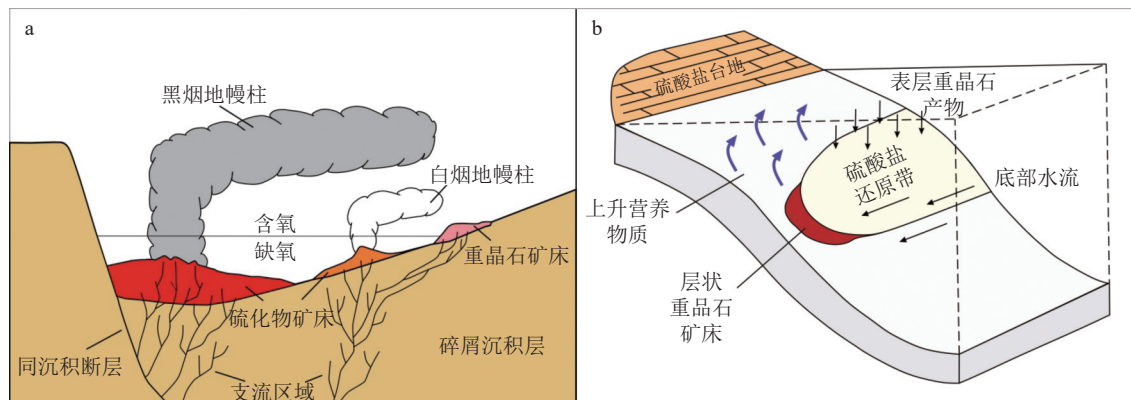


图4 成矿流体来源模型

a—热液模型(据 Koski and Hein, 2004); b—生物模型(据 Jewell and Stallard, 1991; Koski and Hein, 2004; 答博文等, 2017)

Fig.4 Source model of ore-forming fluid

a—Hydrothermal model (after Koski and Hein, 2004); b—Biological model (after Jewell and Stallard, 1991; Koski and Hein, 2004; Zan Bowen et al., 2017)

与岩浆及其沉积物反应而获取的矿物质(包括钡)。当海底喷出的富钡热液与海水中的硫酸盐相结合,则会在海底的缺氧低洼地带沉淀出规模不同晶体形态的重晶石。由于重晶石的溶解度极低,在含钡的热液流体与海水混合的大范围内均可发生沉淀,在热液喷口的任何生长阶段均可发生沉淀(Jamieson et al., 2016),并常常伴生因海底喷流、喷气作用而形成的多种金属经济类矿床,如铁、锌、铅、镍钼硫化物矿床等(范德廉等, 1973; 韩善楚等, 2013)。值得注意的是,随着近年来有关热水系统研究的不断深入,一些研究实例提出了与上述成因机制不同形式的热液模型的变体(刘灵等, 2019),同时也越来越注意生物与热液的复合作用(吴朝东等, 1999)。

过去的大量研究提供了多方面的证据支持中国许多重晶石矿床与活动热液系统之间的成因联系。譬如,圈闭于矿物中的流体包裹体的形成温度符合低温热液喷流温度的范围(刘家军等, 2010; 吴胜华, 2010);矿物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于同期海水,反映出幔源物质的加入(夏菲等, 2004);呈网脉状或脉状的矿体结构,这往往被视作地层下部含矿流体的上升通道(杨瑞东等, 2007a);围岩具有显著的热液蚀变特征,如硅化、黄铁矿化、钠长石化等;重晶石矿体中伴有热水喷流沉积的特征矿物,如方铅矿(郭甲一等, 2022);重晶石矿体及其围岩中发育与现代海底热(液)水喷口生物类群相似的生物化石(杨瑞东等, 2007b);稀土和微量元素等地球化学特征,包括Ce负异常, Eu正异常,低Th/U比值, V、Co、Ni、

Cu等微量元素的富集等显示重晶石矿体具有热水成因特征(吴朝东等, 1999; Jiang et al., 2006; 邹灏等, 2016)。例如,通过Eu异常判断出贵州云洞和大河边重晶石矿床均存在热液作用,并提供了 Ba^{2+} (王富良等, 2020);新晃—天柱地区重晶石矿床的Ce负异常反映了重晶石的形成环境为缺氧还原环境, Eu正异常则表明钡源主要为海底富钡流体热液, $\delta^{34}\text{S}$ 的高值说明硫是由海水提供且受到硫酸盐还原菌的作用(孙泽航等, 2015),新疆热液型重晶石矿床均是由富钡热液流体向上运移时沉淀而成(田江涛等, 2017)。

4.2 生物重晶石

在重晶石形成的生物(海洋)模型中,一系列的生物作用可以诱导钡元素的活化、富集和迁移,从而沉淀出重晶石(图4b)。这些生物的作用一方面来自于生物的生命活动,如一些浮游和底栖动物可以在细胞内或胞外聚合物中合成重晶石(Swinbanks and Shirayama, 1986; Martinez-Ruiz et al., 2019)。同时,许多海洋生物(如等幅骨虫)将海水中的钡大量固定在其壳体中,使得这些海洋生物的钡含量远高于海水(Fisher et al., 1991),并为后期的溶解—再沉淀过程形成重晶石贡献钡源;另一方面,浮游生物和藻类等生物体能够富集海水中的钡,是重晶石形成的主要Ba源,在降解过程释放的 Ba^{2+} 会促进重晶石过饱和的微环境形成,促使重晶石从水柱中沉淀出来(Bishop, 1988; Ganeshram et al., 2003),这种重晶石沉淀的机制可以发生在有机物聚集和/或

降解的任何水深,包括具有高生物生产率的上升流海域,如在现代加利福尼亚、秘鲁、智利、厄瓜多尔等沿海地区,强盛的寒流流经和沿海上升流等环境条件促进了大陆架表面生物的高生产力,并导致了高含钡沉积物的形成(Torres et al., 1996; Klump, 1999)。在更深的水域,钡的分布与有机质含量高的区域相关(Dymond et al., 1992),有机质沉降颗粒在大量厌氧细菌的参与下被溶解,并释放出钡,随后再富集沉淀形成重晶石(van Beek et al., 2007; Xiao et al., 2022)。

近年来,中国许多重晶石矿床的形成被证明与生物作用相关。例如,Crockford et al.(2019)对中国南方地区马里诺冰期后发育的重晶石矿床进行了钡同位素测定,发现其值范围接近现代海水值,显示这些重晶石中钡的来源与海水之间存在亲缘性;韩善楚等(2014)在贵州天柱大河边早寒武世重晶石矿床的矿石与围岩中普遍检出了丰富的生物标志化合物,并认为低等菌藻类在成矿过程中发挥了重要作用。在塔里木盆地阿克苏地区下寒武统尤尔吐斯组,重晶石的锶同位素比值与同时期海水值相接近,而硫同位素值则较同时期海水的硫酸盐值显示偏重,证明成矿的硫源是经细菌硫酸盐还原作用(BSR)的改造后提供(Zhou et al., 2015)。在徐家坝剖面,硫同位素高于同时期海水的特征被认为是由于有机质丰富和缺氧环境促使硫酸盐还原菌的繁殖,在硫酸盐细菌的还原作用下生物钡的溶解再次活化为重晶石矿床提供了钡源(胥博文等, 2017)。

5 开发及应用现状

5.1 资源开发现状

作为全球重晶石主要的生产国和第二大消费国,中国的重晶石采矿业发达,以出口贸易为主。USGS^①数据显示,2022 年全球重晶石产量为 790 万 t,其中中国产量约为 190.0 万 t(表 2),占世界总产量的 24% 左右(图 5a)。中国 2022 年出口量约为 72.2 万 t,是全球最大的出口国,美国是最大的出口方,占出口总量约 44%。受 COVID-19 疫情的影响,2020 年全球重晶石的生产和消费量骤然下降。相应地,自 2020 年以来,中国的重晶石出口规模整体缩减,其中 2020 年出口量仅为 54.1 万 t,是近八年来的最低水平(图 6,表 3)。中国重晶石广泛

分布于 26 个省及自治区,且以南方居多(表 4)。其中贵州重晶石储量居全国之冠,经过多年来的开采和消耗,仍占全国重晶石储量的 40%(图 5b)。广西是中国重晶石最大的生产基地,也是出口量和内销量最大的省份。自 1995 年以来的年产量一直超百万吨,矿区主要分布于象州、武宣、三江、永福等地(关师羽, 1985)。除上述产区外,湖南、湖北、四川、陕西、福建也是重晶石矿的主要开采地区。

5.2 传统领域方面的应用

重晶石销量中 80%~90% 为石油和天然气行业的钻井活动所消耗,在过去 80 多年来一直作为防止钻井过程中井喷事故发生而添加在钻井泥浆中作为加重材料的首选矿石(Al Jaber et al., 2023)。以防止钻井过程中井喷事故的发生。为了应对 4.2 比重的钻井级重晶石资源量迅速消耗的现状,美国石油学会于 2010 年发布了采用 4.1 比重重晶石的替代方案。有研究注意到使用 4.1 比重的重晶石作为替代加重剂对钻井液的性能影响最小(Bruton et al., 2006);也有学者提出将普通重晶石粉和微锰粉混合使用也能大大提高钻井液的性能(岳超先等, 2017)。除了应用于钻井加重剂外,重晶石在化工、建材、机械、医疗、军事、航空、汽车等领域都有着广泛的用途。首先,重晶石是制造各种钡化工产品的主要来源,这些化工产品被广泛用作涂料、纺织、塑料、橡胶、油脂、荧光粉、屏蔽材料等产品的填料、添加剂、凝结剂或加重剂(杨琳丽, 1989)。

近年来,随着高品位易选的重晶石矿开采的逐渐枯竭,加大了对低品位重晶石矿的开采利用,并开发研究提纯和改性处理以符合钡化学品的生产规范的高要求(Ebunu et al., 2021)。而随着环境保

表 2 2022 年全球重晶石产量(数据来源: USGS, 2023^①)

Table 2 Global barite production 2022 (Data source: USGS, 2023^①)

国家	重晶石产量/kt
中国	1900
印度	2600
伊朗	220
哈萨克斯坦	500
墨西哥	320
俄罗斯	150
摩洛哥	1300
土耳其	300
其他国家	580

护力度的加大,钡化工行业的工艺方法也在传统生产化学品的基础上变得越来越多,越来越先进和成熟,在提高了效率的同时还降低了对环境的污染和能源的损耗。再者,由于重晶石可以有效地吸收X射线和 γ 射线,常被用作医用防护服中隔离层和

外防护层的材料,以及用作电子信号屏蔽材料的涂料。在建筑行业,以重晶石为重要骨料制作的高密度混凝土结构具有特殊的防辐射性能(Akkurt et al., 2010),且射线衰减能力随重晶石浓度的增加而增加(Demir et al., 2011),因而被广泛用于屏蔽医院、

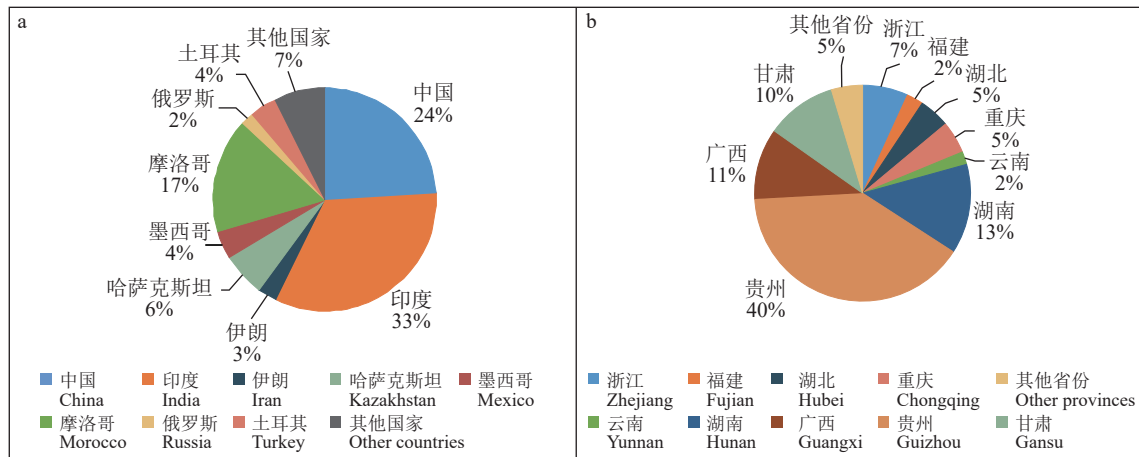


图 5 2022 年全球重晶石产量占比图(a)和 2022 年中国重晶石资源储量占比图(b)(数据来源: USGS, 2023^①、自然资源部信息中心^②)

Fig.5 Proportion of global barite production in 2022 (a) and proportion of barite resource reserves of China in 2022(b) (Data source: USGS, 2023^①, Information Center of the Ministry of Natural Resource^②)

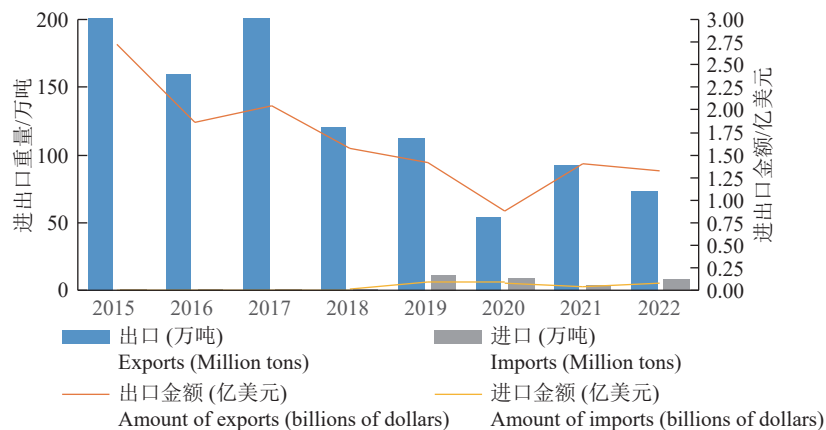


图 6 2022 年中国重晶石进出口量变化(数据来源: 中华人民共和国海关总署^③)

Fig.6 Changes in China's barite import and export in 2022 (Data source: General Administration of Customs of the People's Republic of China^③)

表 3 2015—2022 年中国重晶石进出口情况 (数据来源: 中华人民共和国海关总署^③)

Table 3 China barite import and export 2015–2022 (Data source: General Administration of Customs of the People's Republic of China^③)

进出口量	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
出口重量 (万吨)	207.26	159.56	201.67	120.96	112.61	54.13	92.27	72.21
出口金额 (亿美元)	2.73	1.86	2.04	1.59	1.42	0.88	1.40	1.30
进口重量 (万吨)	0.67	0.44	1.10	1.51	11.82	8.73	3.50	7.98
进口金额 (亿美元)	0.009	0.01	0.01	0.02	0.10	0.09	0.04	0.09

表 4 2022 年全国各省份重晶石资源储备量 (数据来源: 自然资源部信息中心^②)

Table 4 National barite resource reserves in various provinces of 2022 (Data source: Information Center of the Ministry of Natural Resource ^②)	
省份	资源储备量/万t
浙江	732.79
福建	268.16
湖北	495.27
重庆	518.59
云南	206.85
湖南	1443.69
贵州	4293.25
广西	1142.89
甘肃	1133.53
其他省份	500.56

核电站、研究单位的辐射实验室等机构中射线设备带来的辐射危害。重晶石其他的一些具体应用还包括用作胃肠道 X 射线双重造影剂、用于制造轴承合金、铺路材料、隔音材料、离合器片、交通锥和制动衬片等(Ebunu et al., 2021)。

5.3 高新材料领域的应用

目前重晶石在高新材料方面领域的应用主要是将重晶石进行化学、物理或者表面处理, 改变其结构、性质或功能, 可以使重晶石在特定的应用中表现出更好的性能, 以适应特定的应用需求, 比如表面改性、掺杂改性、纳米颗粒制备等。在重晶石表面涂覆有机改性剂, 以增加其与其他材料的相容性和亲和力, 从而用于聚合物复合材料中。譬如添加到橡胶中来增加耐磨性和拉伸性以及降低成本, 添加到油漆涂料中可以提高其稳定性等等(王威和欧阳兆辉, 2005); 也有引入改性过的 SnO₂ 或者 Sb₂O₃ 作为包裹层包裹着重晶石, 将此作为浅色导电涂层, 这样的导电涂料电阻率较小, 广泛应用于军事、医疗、电子产品等, 以减少电磁干扰、抗静电等影响(张慧慧, 2007; 王洋等, 2020); 通过改性, 可以使重晶石更适用于废水处理、污染物吸附等环境应用, 例如重晶石对 Cr 的长期吸收是通过具有重晶石结构的 Ba(CrO₄,SO₄) 固溶体的外延过度生长而发生的, Ba(CrO₄,SO₄) 在重晶石上的沉淀会导致有毒的铬酸盐浓度显著降低(Prieto, 2002; Prieto et al., 2016), 从而提高水环境的质量。

除改性后的重晶石广泛应用于材料以外, 还常常把重晶石作为钡的来源, 合成钡铁氧体材料。钡铁氧体磁性材料(BaFe₁₂O₉)是中国最早产业化的永

磁产品, 由于其优异的磁性、光学和电磁特性, 适用于 5G 技术、传感器、隐形技术、光纤、记录介质、永磁体、生物医学等应用(Hessien and Khedr, 2008; 徐鹏金, 2023)。其次钡铁氧体磁性材料已被证明具有水和空气净化的光催化剂的潜力; 将钡铁氧体磁性材料通过纳米技术制成六铁氧体钡纳米片用于生物医学应用, 比如药物运输、抗菌活性等(Tkachenko et al., 2014; Misbah et al., 2022; Himanshi et al., 2023; Sharma et al., 2023)(表 5)。

尽管中国重晶石资源丰富, 但产业长期以生产初级原料型产品出口为主, 存在粗放开采和开发利用的附加值低等问题, 严重威胁中国重晶石资源安全。随着科学技术的发展, 重晶石产业迎来了高纯化、超微细化、高性能复合化的新发展。如近年来相关纳米材料和填充凝胶材料等产品的研制(胡佩伟等, 2008; 赵义和彭会清, 2015), 显著提升了中国重晶石的利用价值。未来, 需注重提高重晶石的精深加工水平、发展战略性新兴产业、拓宽重晶石的应用领域, 从而构建我国集约、高效和绿色的重晶石产业发展机制。

6 展 望

6.1 找矿潜力

综上所述, 沉积型重晶石矿床主要形成于寒武纪, 主要是在扬子地台南缘成矿带、扬子地台北缘成矿带和秦岭成矿带等, 均发现了规模大且数量多的矿床点, 比如贵州天柱大河边重晶石矿床(超大型)、广西三江重晶石矿床和湖北随州柳林重晶石矿床等。火山沉积型重晶石矿床的成矿时代主要是前寒武纪, 大多为伴生矿床, 我国主要有甘肃肃南桦树沟(镜铁山)铁-重晶石矿床(超大型)和四川白玉岬村银多金属-重晶石矿床等, 大多出现在甘青宁重晶石成矿区(李文炎和余洪云, 1991; 李春阳等, 2010)。层控热液型重晶石矿床大多发现于晚寒武世和早奥陶世的地层中, 该矿床成矿物质来源多样, 矿床主要分布在秦岭以南以及大巴山、武陵-苗岭重晶石成矿带和黔桂湘鄂重晶石成矿区(潘忠飞等, 2023), 典型矿床有湖北南庄坪重晶石矿床和贵州施秉县顶罐坡重晶石矿床等。热液型重晶石矿床的成矿时代为古生代以及中生代白垩纪, 比如湖南衡南谭子山重晶石矿床和广西象州县潘

表 5 重晶石的应用领域
Table 5 Application fields of barite

应用领域	主要用途
石油工业	重晶石是石油和天然气行业最重要的加重剂材料，高密度、化学性质稳定等特点的重晶石应用于钻井泥浆中，可以有效地防止喷井事故的发生
钡化工产品	重晶石中钡含量较高，可作为钡化工产品的钡源；这些化工产品广泛用于电子工业、医药行业、光学玻璃、各类材料的填料、添加剂等方面
防辐射材料	将重晶石加入混凝土中以增加房子对X射线和γ射线的屏蔽性能，可应用于医院、核电站、辐射实验室等；将其作为防护服的原材料之一可防止医护人员、科研人员等受到辐射的危害
钡铁氧体材料	改性后的重晶石作为钡铁氧体材料里钡的来源，该材料适用于通讯设备、军事等，还可应用于药物运输、抗菌活性等的生物医学应用；除此之外，还可以净化水和空气中的污染物
高新材料	将重晶石改性后应用于各种复合材料、导电材料、磁性材料、耐高温材料等，例如增加橡胶的耐磨性、涂料的稳定性等；还能用于导电涂料来减少军事、医疗、电子产品中电磁的干扰；此外还可以作为废水中的吸附剂
其他	吸附铬酸盐来减少水环境污染
其他	胃肠道X射线双重造影剂、颜料、塑料等

村重晶石矿床等,该类型的矿床主要分布在黔桂湘粤重晶石成矿区、天山重晶石成矿带和郯庐重晶石成矿带(李春阳等,2010)。风化残坡积型重晶石矿床是由原生重晶石矿床后期形成的,数量较少,规模较小,中国最主要的风化残坡积型重晶石矿床是海南省冰岭重晶石矿床和广西象州县寺村重晶石矿床(田升平等,2014)。

目前,中国重晶石矿床数量多,规模从超大型—小型广泛分布,且品位普遍偏高,产量多,具有较大的找矿潜力。在扬子地台南缘,贵州、湖南和广西分布着各种类型的矿床,尤其是天柱县大河边重晶石矿床是世界超大型重晶石矿床(王文杰等,2023),其次还有贡溪超大型矿床、大河边超大型矿床和云洞大型矿床等,把该区域作为寻找沉积型超大型和大型重晶石矿床和热液型重晶石矿床的重点远景区,提高矿床规模级别以及寻找更多品位高的重晶石(刘灵等,2015;杨瑞东等,2023)。火山沉积型、层控热液型和热液型重晶石矿床在我国也有较多矿点,在类似于甘青宁重晶石成矿区等地区的重晶石矿可以继续深入勘探工作,着重提高低品位重晶石矿的综合利用回收和对伴生重晶石矿床的开发利用(李文炎和余洪云,1991)。最后,加强对新疆地区、华北和东北地区的重晶石的勘探工作,在已有矿山的基础上在外围和深部寻找新的矿体(田江涛等,2017;党智财等,2021)。

6.2 开发利用方向

由于重晶石的主要用途是应用于石油工业,深受美国和欧盟国家等的重视。随着全球疫情的结束,重晶石作为对全球经济重要的矿产之一,其开

发利用方向将不仅限于石油工业、钡化合物、防辐射材料和其他材料等。之后我们需要考虑低品位重晶石如何提高其利用率,避免全国出现重优质资源而忽视低品位重晶石的现象,加强重晶石最终产品的回收利用率,按照国家提出的对低品位萤石重晶石共生矿综合利用技术来支撑氟钡新材料产业发展。同时需要提高重晶石的应用价值,通过改性或者精加工等,使其作为高新材料、纳米材料 and 新能源材料等应用于军事、医用、环境和新能源等方面,使其成为无法替代的性价比最优材料,在未来的国际贸易市场中发挥更大的作用。中国重晶石储量丰富,供给充足,产量大,但是开发利用仍然存在很大程度的不足,科学规划开采方向,将勘探开发利用绿色化,构建安全的供应链和产业链,提高重晶石精深加工的能力,加大重晶石材料化的应用。

7 结 论

本文通过对中国重晶石矿床的时空分布、矿床分类、成矿流体来源以及资源应用现状进行综述研究,得出以下结论:

(1)中国重晶石矿床分布广泛,成矿时代多形成于古生代和中生代,尤其是早寒武世更是重晶石的主要成矿期,且主要形成于江南地区、秦岭地区和黔—桂地区的黑色岩系中;重晶石矿床类型主要分为沉积型、火山沉积型、热液型、层控热液型和风化残坡积型。其中沉积型矿床具有规模大、矿石储量多等特点,是中国最重要的重晶石矿床类型。

(2)重晶石的钡和硫的来源具有多样性,以海底热液和生物两端元为主;通过Ce负异常、Eu正异

常、低 Th/U 比值、V, Co, Ni, Cu 等微量元素的富集等地球化学标志可判断出成矿物质来源于海底热液, 而通过生物标志性化合物和偏重的硫同位素可得出生物成因结论。

(3) 现今全球已探明的重晶石资源为 7.4 亿 t, 重晶石作为我国的优势矿种, 有 26 个省(区)产出重晶石, 以南方居多, 尤其是贵州拥有 60% 的重晶石储量, 普遍具有产量大以及品位高等特点, 其产量、储量以及出口量等在国际上具有重要的影响力。

(4) 重晶石密度高和化学性质稳定等优越性能使其被高效应用于石油、化工、材料、军事、环境和医疗等领域, 特别是改性后的重晶石被广泛应用于高新材料方面, 包括钡铁氧体材料和导电涂料等。为了提升我国重晶石的利用价值, 未来需注重提高重晶石的精深加工水平、发展战略性新兴产业和拓宽重晶石的应用领域, 从而构建我国集约、高效和绿色的重晶石产业发展机制。

(5) 中国重晶石矿具有较好的找矿潜力。应着重加强寻找扬子地台南缘的超大型和大型重晶石矿点, 提升矿床等级; 同时着重提高对低品位重晶石矿和伴生重晶石矿床的开发利用; 最后不断探索开发华北和新疆等地区, 去寻找更丰富的重晶石资源。

注释

① USGS. 2023. Minerals Commodity Summaries[R]. Reston, Virginia, United States Geological Survey.

② 自然资源部信息中心. 2022. 中国矿产资源储量(2022)[R].

③ 中国海关总署. 2022. 中国海关进出口数据 [DS/OL]. <http://www.customs.gov.cn>

References

- Akkurt I, Akyildirim H, Mavi B, Kilincarslan S, Basyigit C. 2010. Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 52(7): 620–623.
- Al Jaber J, Bageri B, Elkatatny S, Patil S. 2023. Primary investigation of barite-weighted water-based drilling fluid properties[J]. *Acs Omega*, 8(2): 2155–2163.
- Alaminia Z, Sharifi M. 2018. Geological, geochemical and fluid inclusion studies on the evolution of barite mineralization in the badroud area of Iran[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 613–626.
- Bernstein R E, Byrne R H, Betzer P R, Greco A M, Helgeson H C. 1992. Morphologies and transformations of celestite in seawater; the role of acantharians in strontium and barium geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(8): 3273–3279.

- Bishop J K B. 1988. The barite–opal–organic carbon association in oceanic particulate matter[J]. *Nature*, 332(6162): 341–343.
- Brobst D A. 1958. Barite resources of the United States[J]. U. S. Geological Survey Bulletin, 1072: 67–130.
- Bruton J R, Bacho J P, Newcaster J. 2006. The future of drilling-grade barite weight material: A case for a substitute specification[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Bulatovic S M. 2015. Chapter 34–Beneficiation of Barite Ores[M]. Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice, 129–141.
- Cansu Z, öztürk H. 2020. Formation and genesis of Paleozoic sediment-hosted barite deposits in Turkey[J]. *Ore Geology Reviews*, 125: 103700.
- Chu Youlong. 1989. Genetic types of barite deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 8(4): 91–96 (in Chinese with English abstract).
- Clark S H B, Poole F G, Wang Z. 2004. Comparison of some sediment-hosted, stratiform barite deposits in China, the United States, and India[J]. *Ore Geology Reviews*, 24(1): 85–101.
- Clark S, Gallagher M J, Poole F G. 1990. World barite resources: A review of recent production patterns and a genetic classification[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B–Applied Earth Science*, 99B: 125–132.
- Crockford P W, Wing B A, Paytan A, Hodgskiss M S W, Mayfield K K, Hayles J A, Middleton J E, Ahm A C, Johnston D T, Caxito F, Uhlein G, Halverson G P, Eickmann B, Torres M, Horner T J. 2019. Barium–isotopic constraints on the origin of post–Marinoan barites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 519: 234–244.
- Dang Zhicai, Li Junjian, Fu Chao, Ni Zhenping, Peng Yi, Song Lijun, Wang Liying. 2021. The characteristics of barite deposits and prospecting direction in north China[J]. *North China Geology*, 44(3): 65–69 (in Chinese with English abstract).
- Demir F, Budak G, Sahin R, Karabulut A, Oltulu M, Un A. 2011. Determination of radiation attenuation coefficients of heavy weight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663MeV γ -rays[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 38(6): 1274–1278.
- Dymond J, Suess E, Lyle M. 1992. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 7(2): 163–181.
- Ebunu A I, Olanrewaju Y A, Ogolo O, Adetunji A R, Onwualu A P. 2021. Barite as an industrial mineral in Nigeria: Occurrence, utilization, challenges and future prospects[J]. *Heliyon*, 7(6): e7365.
- Falkner K K, Klinkhammer G P, Bowers T S, Todd J F, Lewis B L, Landing W M, Edmond J M. 1993. The behavior of barium in anoxic marine waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 537–554.
- Fan Delian, Yang Xiuzhen, Wang Lianfang, Chen Nansheng. 1973. Petrological and geochemical characteristics of a nickel molybdenum multi element bearing lower Cambrian black shale from a certain district in South China[J]. *Geochimica*, (3): 143–164 (in Chinese with English abstract).
- Fan Delian, Ye Jie, Yang Ruiying, Huang Zhongxiang. 1987. The geological events and ore mineralization nearby the precambrian–Cambrian boundary in Yangtze platform[J]. *Acta*

- Sedimentologica Sinica, 5(3): 81–95 (in Chinese with English abstract).
- Fan Delian, Zhang Tao, Ye Jie, et al. 2004. Black Rock Series and Related Deposits in China[M]. Beijing: Science Press, 457 (in Chinese).
- Fang Xu, Xu Tianliang, Han Ling, Wang Chunmei, Xu Peng, Qu Jing, Cai Lijuan. 2013. Geological characteristics and metallogenic model of Liulin barite ore district in Shuizhou city, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 27(5): 615–619 (in Chinese with English abstract).
- Fisher N S, Guillard R R L, Bankston D C. 1991. The accumulation of barium by marine phytoplankton grown in culture[J]. *Journal of Marine Research*, 49(2): 339–354.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, Ravizza G E. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleo productivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289–303.
- Ganeshram R S, François R, Commeau J, Brown-Leger S L. 2003. An experimental investigation of barite formation in seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(14): 2599–2605.
- Gao Huaizhong. 1998. The biochemical sedimentary metallogenic model of baritic and witheritic deposits in Lower Cambrian in China[J]. Mineral and Petrology, 18(2): 71–78 (in Chinese).
- Gao Junbo, Yang Ruidong, Tao Ping, Wei Huairui, Liu Kun. 2012. Hydrothermal venting–flowing sedimentation characteristics of Devonian barite deposits from Leji, Zhenning County, Guizhou Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 30(3): 422–430 (in Chinese with English abstract).
- Goldberg E D, Arrhenius G O S. 1958. Chemistry of Pacific pelagic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 13(2): 153–212.
- Griffith E M, Paytan A. 2012. Barite in the ocean—occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications[J]. *Sedimentology*, 59(6): 1817–1835.
- Guan Shiyu. 1985. Discussion on the development and utilization of barite ore in Guangxi[J]. Geology in China, (7): 17–18 (in Chinese).
- Guo Jiayi, Chen Jianguang, Sun Hongtao, Xie Baiyang, Jiang Zhiye. 2022. Discussion on the characteristics and genesis of Baotou barite deposit in Dengfeng, Henan[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, (1): 49–52, 77 (in Chinese with English abstract).
- Guo Suxiong, Yang Jinan. 2022. Analysis of geological characteristics and prospecting potential of the barite mine in Liangtingao, Guzhang, Hunan[J]. Geology of Chemical Minerals, 44(1): 18–22 (in Chinese with English abstract).
- Han S C, Hu K, Cao J, Pan J Y, Xia F, Wu W F. 2015. Origin of Early Cambrian black–shale–hosted barite deposits in South China: mineralogical and geochemical studies[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 106: 79–94.
- Han Shanchu, Hu Kai, Cao Jian. 2013. First discovery of zoned hyalophane in the barite deposits hosted in early Cambrian black shales of south China and its geological implications[J]. Geological Review, 59(6): 1143–1149 (in Chinese with English abstract).
- Han Shanchu, Hu Kai, Cao Jian. 2014. Organic geochemistry of barite deposits hosted in the Early Cambrian black shales from the Tianzhu County, Guizhou[J]. *Geochimica*, 43(4): 386–398 (in Chinese with English abstract).
- Hanor J S, Alpers C N, Jambor J L, Nordstrom D K. 2000. Barite–celestine geochemistry and environments of formation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40(1): 193–275.
- He Jianping, Li Yuanjia, Zhou Ziqin. 2020. Geological characteristics and deposit genesis of the Dahuoluo barite mine in Subei county, Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 36(11): 15–18 (in Chinese).
- He Qin, Zhang Yang. 2018. Geological characteristics and metallogenic model of Nanzhuangping barite deposit in western of Hubei Province[J]. Resource Environment and Engineering, 32(4): 528–532 (in Chinese with English abstract).
- He Shenghui, Rong Huifeng, Chen Xiansheng. 2014. Geochemical characteristics of a copper–lead–zinc–barite deposition Guangxi and their geological implications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(3): 447–452 (in Chinese with English abstract).
- Hein J R, Zierenberg R A, Hannington J B M A. 2007. Barite–forming environments along a rifted continental margin, southern California borderland[J]. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(11/13): 1327–1349.
- Hessien M M, Khedr M H. 2008. Catalytic activity and magnetic properties of barium hexaferrite prepared from barite ore[J]. Materials Research Bulletin, 42(7): 1242–1250.
- Himanshi, Jasrotia R, Prakash J, Verma R, Thakur P, Kandwal A, Wan F, Thakur A. 2023. Synthesis, characterization, and applications of doped barium hexaferrites: A review[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 667: 415202.
- Hu Peiwei, Yang Huaming, Hu Yuehua, Huo Jiancheng. 2008. Preparation and application progress of barite mineral materials[J]. Materials Review, 22(S2): 191–194 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yan. 2011. Sedimentary Geochemistry of the Ferrous System of the Cambrian Niuheitang Formation in Zhangjiajie, Hunan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–62 (in Chinese with English abstract).
- Jamieson J W, Hannington M D, Tivey M K, Hansteen T, Williamson N M B, Stewart M, Fietzke J, Butterfield D, Frische M, Allen L, Cousens B, Langer J. 2016. Precipitation and growth of barite within hydrothermal vent deposits from the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173(1): 64–85.
- Jébrak M, El Wartiti M, Marcoux E, Zaharoui M. 2011. The Bouznika Cambrian barite deposit (Morocco), an early mineralization on the Iapetus margin[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 60(3): 53–62.
- Jewell P W, Glenn C R, Prevot–Lucas L, Lucas J. 2000. Bedded barite in the geologic record[J]. Special Publication–Society for Sedimentary Geology, 66: 147–161.
- Jewell P W, Stallard R F. 1991. Geochemistry and pale oceanographic setting of central Nevada bedded barites[J]. *The Journal of Geology*, 99(2): 151–170.
- Jiang S, Chen Y, Ling H, Yang J, Feng H, Ni P. 2006. Trace and rare–earth element geochemistry and Pb–Pb dating of black shales and intercalated Ni–Mo–PGE–Au sulfide ores in Lower Cambrian strata, Yangtze platform, South China[J]. *Mineralium Deposita*,

- 41(5): 453–467.
- Jiang Ya, Wang Ting, Long Tao. 2021. Research on listing barite as a strategic mineral resource[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 297–302 (in Chinese with English abstract).
- Johnson C A, Emsbo P, Poole F G, Rye R O. 2009. Sulfur and oxygen–isotopes in sediment–hosted stratiform barite deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society*, 73(1): 133–147.
- Klump J. 1999. Biogenic Barite as a Proxy of Paleo Productivity Variations in the Southern Peru–Chile Current[D]. Germany: University Bremen, 1–109.
- Koski R A, Hein J R. 2004. Chapter H: Stratiform barite deposits in the roberts mountains allochthon, Nevada: A review of potential analogs in modern sea–floor environments[J]. *Geological Survey Bulletin*, 17.
- Li Y, Zou H, Said N, Liu H. 2023. A new classification of barite deposits in China[J]. *Ore and Energy Resource Geology*, 14: 100019.
- Li Bo, Huang Zhilong, Xu Cheng. 2007. Sulfur isotope geochemistry of the mianning REE deposit, Sichuan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3): 430–433 (in Chinese with English abstract).
- Li Chunyang, Tian Shengping, Niu Guizhi. 2010. Discussion on China barite–concentrating area and the resource potential[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 32(2): 75–86 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyan, Yu Hongyun. 1991. Barite Deposits of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–105(in Chinese).
- Li Zhanyuan. 2004. Distribution of barite resources and development prospects in China[J]. *China Non–Metallic Minerals Industry*, (5): 86–88 (in Chinese).
- Lin Qiuling, Li Xiaohu, Meng Xinwei, Wang Hao, Ding Yi, Fan Zedong. 2023. Geochemical characterization of barite from modern submarine hydrothermal field and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Geology*, 58(3): 1091–1117 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Wu Shenghua, Liu Zhenjiang, Su Wenchao, Wang Jianping. 2010. A discussion on the origin of Witherite deposits in large–scale barium metallogenic belt, southern Qinling mountains, China: Evidence from individual fluid inclusion[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 222–238(in Chinese with English abstract).
- Liu Ling, Shi Qingpeng, Wen Xingqiao, Xu Dongpo, Wang Wenjie. 2015. Metallogenic condition and prospecting potential analyses of Tianzhu barite deposit in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 32(4): 262–266 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ling, Yang Honghui, Shi Qingpeng. 2019. Geological characteristics and metallogenic regularity of hydrothermal barite ore–concentrating district in Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 36(3): 207–214 (in Chinese with English abstract).
- Liu Sicong, Ning Shuyuan, Zheng Deshun. 2021. Petrogenesis and sedimentary environment of black rock series of the Lower Cambrian Shuigoukou Formation in south Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 549–564 (in Chinese with English abstract).
- Lu Z C, Liu C Q, Liu J J, Zhao Z Q. 2003. Carbon, oxygen and boron isotopic studies of Huangbai–shuwan Witherite deposit at Ziyang and Wenyuhe Witherite deposit at Zhushan[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 46(12): 1273–1291.
- Martínez–Ruiz F, Paytan A, González–Muñoz M T, Jroundi F, Abad M M, Lam P J, Bishop J K B, Horner T J, Morton P L, Kastner M. 2019. Barite formation in the ocean: origin of amorphous and crystalline precipitates[J]. *Chemical Geology*, 511: 441–451.
- Misbah, Bibi I, Majid F, Kamal S, Jilani K, Taj B, Nazeer Z, Iqbal M. 2022. Enhanced visible light–driven photocatalytic degradation of crystal violet dye using Cr doped BaFe₁₂O₁₉ prepared via facile micro–emulsion route[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(6): 101533.
- Pan Zhongfei, Fu Yong, Guo Chuan, Shi Chunhua, Liu Ling, Liu Yang, Long Zhen, Luo Peiqi, Liu Guodong, Yao Lan, Yang Ying, Yang Qianmin. 2023. Geological characteristics, mineralization and metallogenic mechanism of barite mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 42(1): 90–115 (in Chinese with English abstract).
- Penaloza I, Tita A, Mcnew E, Chu P. 2023. Barite resources, production and recovery using froth flotation: A review[J]. *Minerals Engineering*, 203: 108327.
- Peng Jun, Xia Wenjie, Yi HaiSheng. 1999. Geological and geochemical characteristics and analysis of genesis of the Gongxi barite deposit, Xinhuang County, Hunan Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 26(1): 92–96 (in Chinese with English abstract).
- Poole F G. 1988. Stratiform Barite In Paleozoic Rocks of the Western United States[M]. Zachrisson E. Proceedings of the Seventh Quadrennial IAGOD Symposium. Stuttgart, Germany: E. Schweizerbar’sche Verlagsbuchhandlung, 309–319.
- Prakash Babu C, Brumsack H J, Schnetger B, Böttcher M E. 2002. Barium as a productivity proxy in continental margin sediments: A study from the Eastern Arabian sea[J]. *Marine Geology*, 184(3): 189–206.
- Prieto M E A F. 2002. Sorption of chromate ions diffusing through barite–hydrogel composites: Implications for the fate and transport of chromium in the environment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(5): 783–795.
- Prieto M M G U, Heberling F, Rodríguez–Galán R M, Brandt F. 2016. Crystallization behavior of solid solutions from aqueous solutions: an environmental perspective[J]. *Progress in Crystal Growth & Characterization of Materials*, 62(3): 29–68.
- Qi Bingde, Zhou Yunlong, Ma Lanlan. 2018. Discussion on the genesis and metallogenic model of barite and lead–zinc deposition Shibing–Yuqing Area, Guizhou[J]. *World Nonferrous Metals*, (13): 293–294 (in Chinese with English abstract).
- Sharma I, Kumari T, Thakur N, Sharma P, Batoo K M, Verma R. 2023. Citrate precursor route for Y³⁺ substituted M–type Ba–hexaferrite: Synthesis, the effect of doping on structural, optical, magnetic and anti–bacterial properties[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 302: 127664.
- Shi Long. 2007. Discussion on Forming Conditions and Process of the Barite–Witherite Deposits in Lower Cambrian, Northern Daba Mountains, China[D]. Beijing: China University of Geosciences,

- 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Shimmield G B, Mowbray S R. 1991. The inorganic geochemical record of the northwest Arabian Sea: A history of productivity variation over the last 400 k.y. from sites 722 and 724[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 117.
- Sun Xuetong. 2004. Submarine–hydrothermal Exhalative Ore Layers in Black Shales from South China and Associated Fossils—Insights into a Lower Cambrian Facies and Bio–evolution [D]. Nanjing : Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Sun Zehang, Hu Kai, Han Shanchu, Liu Yin. 2015. Trace and rare earth elements and sulfur isotope analysis of barite deposits in west Hunan and east Guizhou[J]. *Geological Journal of China Universities*, 21(4): 701–710 (in Chinese with English abstract).
- Swinbanks D D, Shirayama Y. 1986. High levels of natural radionuclides in a deep–sea infaunal xenophyophore[J]. *Nature*, 320(6060): 354–358.
- Tang Jixin, Chen Shengxin. 1989. Barite mineral resources and development and utilization in China[J]. *Geology in China*, (6): 24–25 (in Chinese).
- Tian Jiangtao, Tang Yi, Wang Cheng, Li Tao, Li Dahai. 2017. Analysis of geological characteristics and mineralization pattern of barite ore in Xinjiang[J]. *West–China Exploration Engineering*, 29(6): 124–128 (in Chinese).
- Tian Shengping, Han Yuchuan, Xiong Xianxiao. 2014. Mineralization Patterns of Barite Ores in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 108(in Chinese).
- Tkachenko M V, Khovik L P O, Kamzin A S, Keshri S. 2014. Polyfunctional bioceramics based on calcium phosphate and M–type hexagonal ferrite for medical applications[J]. *Technical Physics Letters*, 40(1): 4–6.
- Torres M E, Bohrmann G, Suess E. 1996. Authigenic barites and fluxes of barium associated with fluid seeps in the Peru subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(3): 469–481.
- Turner R J W. 1992. Bedded barite deposits in the United States, Canada, Germany, and China: Two major types based on tectonic setting[J]. *Economic Geology*, 87(1): 198–200.
- van Beek P, François R, Conte M, Reyss J L, Souhaut M, Charette M. 2007. $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ and $^{226}\text{Ra}/\text{Ba}$ ratios to track barite formation and transport in the water column[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(1): 71–86.
- Wang Z C, Li G Z. 1991. Barite and witherite deposits in Lower Cambrian shales of South China: Stratigraphic distribution and geochemical characterization[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 86(2): 354–363.
- Wang Dongbo, Li Shuxin. 1991. Genesis of gold, silver, lead, zinc, pyrite–barite deposits in Donggouba, Lvyang[J]. *Northwestern Geology*, 12(3): 25–32 (in Chinese).
- Wang Fuliang, Huang Yi, Fu Yong, Long Keshu, Wen Xingqiao. 2020. A study of the enrichment mechanism of Early Cambrian barite in eastern Guizhou: Constraint from sulfur isotope[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(5): 686–698 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guohong, Chen Yuanshou, Yang Peng, Li Chengjie. 2020. Characteristics of barite ore bodies in Gacun silver–polymetallic ore district, Sichuan[J]. *World Nonferrous Metals*, (15): 96–97 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Ouyang Zhaohui. 2005. Study and application on surface modification of barite powder[J]. *China Non–Metallic Minerals Industry*, (6): 37–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjie, Liu Ling, Yang Guilong, Shi Rui, Li Yonggang. 2023. Metallogenic model and prospecting potential of Dahebian barite deposit in Tianzhu county[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 41(2): 72–76 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Huang Cong. 2020. Status quo and materialized application of barite resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 40(6): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Wen Guojiang, Jin Bo, Xie Jiangtao. 2022. The geology feature and preliminary analysis of Yangjiaba barite deposit in Yanhe, Guizhou[J]. *Yunnan Geology*, 41(1): 93–97 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Zhou Zhengbing, Liu Ling, Qin Chaojian, Huang Yuancheng, Wen Xingqiao, Shi Qingpeng, Xu Dongbo, Wang Wenjie. 2017. The discovery of the Dahebian Pb–Zn deposit in Tianzhu area of Guizhou Province and its prospecting significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(7): 1288–1293 (in Chinese with English abstract).
- Wu S H, Liu J J, Zhai D G. 2015. Factors controlling precipitation of barite and witherite and genesis of the Ankang–Xunyang barium deposits, Shaanxi, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 836–851.
- Wu Chaodong, Yang Chengyun, Chen Qiyang. 1999. The hydrothermal sedimentary genesis of barite deposits in west Hunan and East Guizhou[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 35(6): 774–785 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shenghua. 2010. Ore Fluid Geochemistry and Metallogenic Metallogenic Mechanism of the Large Barium Metallogenic Belt of the South Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–132(in Chinese with English abstract).
- Xia Fei, Ma Dongsheng, Pan Jiayong, Sun Zhanxue, Cao Shuanglin, Nie Wenming, Wu Kai. 2004. Strontium isotopic evidence for the hot–water sedimentary genesis of the Tianzhu Dahebian and Yuping barite deposits, Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2592–2595 (in Chinese).
- Xiao C, Wang Y, Tian J. 2022. Formation of marine barite in the deep–sea environment: evidence from sinking particles in the challenger deep, Mariana Trench[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 50: 102159.
- Xu L G, Lehmann B, Mao J M, Zheng W, Ye H S, Li H Y. 2016. Strontium, sulfur, carbon, and oxygen isotope geochemistry of the Early Cambrian Strata–bound barite and Witherite deposits of the Qinling–Daba region, northern margin of the Yangtze Craton, China[J]. *Economic Geology*, 111(3): 695–718.
- Xu Pengjin. 2023. Barite high value application research progress[J]. *China Powder Industry*, (3): 12–14 (in Chinese).
- Xuan Zhiqiang. 1999. Origination and ore–forming prospects of barite deposits in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 21(1): 24–30 (in Chinese with English abstract).
- Yang Linli. 1989. Development and utilization of barium minerals[J].

- Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (5): 40–45 (in Chinese).
- Yang Ruidong, Bao Miao, Wei Huairui, Wang Wei, Wang Qiang. 2007b. Discovery and significance of hot water biota in barite deposits at the base of the Cambrian system, Tianzhu, Guizhou[J]. Progress in Natural Science, 17(9): 1304–1309 (in Chinese).
- Yang Ruedong, Li Xinzhen, Mo Hongcheng, Zhou Dengfeng, Sun Baichuan, Gao Junbo, Chen Jun. 2023. Metallogenic regularity and model of Cambrian barite deposits in the western Hunan and eastern Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 43(2): 173–184 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Wei Huairui, Bao Miao, Wang Wei, Wang Qiang. 2007a. Submarine hydrothermal venting–flowing sedimentary characters of the Cambrian Shanggongtang and Dahebian barite deposits, Tianzhou Guizhou Province[J]. Geological Review, 53(5): 675–680 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lianjun. 1998. Mineralization of Biological Organic Matter and the Context of Mineralization[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Yu Wenbo, Yang Dingzhong, Zhang Xiyue, Sun Hongjuan, Zeng Li. 2022. Mineralogical characteristics and application of barite in Guizhou Province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 42(4): 143–152 (in Chinese with English abstract).
- Yue Chaoxian, Xiong Hanqiao, Su Xiaoming, Zhuang Yan, Xu Peng. 2017. Effects of types of weighting agents on the performance of oil base drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 34(1): 83–86 (in Chinese with English abstract).
- Zan Bowen, Liu Shugen, Ran Bo, Ye Yuehao, Yang Di, Huang Rui, Xia Guodong, Jiao Kun. 2017. An analysis of barite concretions from Lower Silurian Longmaxi Formation on the northern margin of the Yangtze block and their genetic mechanism[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 36(2): 213–226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuliang, Lu Xiaoya. 2017. Exploitation and utilization status and suggestions of barite resource in China[J]. Modern Mining, 33(9): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huihui. 2007. Preparation and Characteristic of Composite Conductive Powders and Coating with Barite Matrix[D]. Changsha: Central South University, 1–104(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianzhong, Zuo Yalin, Chen Yuanxing. 2014. Geological characteristics of fluorite–barite ore in northern area of Yanhe, Guizhou, and analysis of prospect finding[J]. Western Prospecting Engineering, 26(10): 153–155 (in Chinese).
- Zhao Daizhen. 1986. Geological features and minerogenic conditions of the Gongxi barite deposit at Xinhuang County[J]. Hunan Geology, 5(4): 1–11 (in Chinese).
- Zhao Yi, Peng Huiqing. 2015. Development and application progress of barite mineral ore[J]. China Non–Metallic Minerals Industry, (6): 3–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X Q, Chen D Z, Dong S F, Zhang Y Q, Guo Z H, Wei H Y, Yu H. 2015. Diagenetic barite deposits in the Yurtus formation in Tarim Basin, NW China: Implications for barium and sulfur cycling in the earliest Cambrian[J]. Precambrian Research, 263: 79–87.
- Zhou Z B, Wen H J, Qin C J, de Fourestier J, Liu L, Shi Q P. 2018. The genesis of the dahebian Zn–Pb deposit and associated barite mineralization: Implications for hydrothermal fluid venting events along the Nanhua basin, South China[J]. Ore Geology Reviews, 101: 785–802.
- Zou Hao, Dan Yong, Zhang Shouting, Fang Yi, Cao Huawen, Li Dong. 2016. Geochemical evidence for sources of ore–forming material of barite–fluorite deposits in Pengshui area, southeast Chongqing[J]. Geotectonics and Metallogeny, 40(1): 71–85 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 褚有龙. 1989. 中国重晶石矿床的成因类型[J]. 矿床地质, 8(4): 91–96.
- 党智财, 李俊建, 付超, 倪振平, 彭翼, 宋立军, 周继华, 王丽瑛. 2021. 华北地区重晶石矿资源特征及找矿方向[J]. 华北地质, 44(3): 65–69.
- 范德康, 杨秀珍, 王连芳, 陈南生. 1973. 某地下寒武统含镍钼多元素黑色岩系的岩石学及地球化学特点[J]. 地球化学, (3): 143–164.
- 范德康, 叶杰, 杨瑞英, 黄忠祥. 1987. 扬子地台前寒武–寒武纪界线附近的地质事件与成矿作用[J]. 沉积学报, 5(3): 81–95.
- 范德康, 张焱, 叶杰等著. 2004. 中国的黑色岩系及其有关矿床[M]. 北京: 科学出版社, 457.
- 方旭, 许天良, 韩岭, 王春梅, 徐鹏, 渠婧, 蔡丽娟. 2013. 湖北省随州市柳林重晶石矿区金桥岭矿段地质特征及成矿模式[J]. 资源环境与工程, 27(5): 615–619.
- 高怀忠. 1998. 中国早寒武世重晶石及毒重石矿床的生物化学沉积成矿模式[J]. 矿物岩石, 18(2): 71–78.
- 高军波, 杨瑞东, 陶平, 魏怀瑞, 刘坤. 2012. 贵州镇宁乐纪泥盆系重晶石矿热水沉积特征[J]. 沉积学报, 30(3): 422–430.
- 关师羽. 1985. 谈广西重晶石矿的开发利用[J]. 中国地质, (7): 19–20.
- 郭甲一, 陈建光, 孙红涛, 谢白杨, 姜治业. 2022. 河南登封白土沟重晶石矿矿床地质特征及成因探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊, (1): 49–52, 77.
- 郭素雄, 杨进军. 2022. 湖南古丈凉亭坳重晶石矿地质特征与找矿潜力分析[J]. 化工矿产地质, 44(1): 18–22.
- 韩善楚, 胡凯, 曹剑. 2013. 华南早寒武世黑色岩系重晶石矿床环带钡冰长石新发现及其意义[J]. 地质论评, 59(6): 1143–1149.
- 韩善楚, 胡凯, 曹剑. 2014. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究[J]. 地球化学, 43(4): 386–398.
- 何建平, 李元家, 周子琴. 2020. 甘肃省肃北县大豁落重晶石矿地质特征及矿床成因[J]. 甘肃科技, 36(11): 15–18.
- 何钦, 张扬. 2018. 鄂西地区南庄坪重晶石矿地质特征及成矿模式[J]. 资源环境与工程, 32(4): 528–532.
- 贺胜辉, 荣惠锋, 陈贤胜. 2014. 广西某铜铅锌重晶石矿地球化学特征及其地质意义[J]. 物探与化探, 38(3): 447–452.
- 胡佩伟, 杨华明, 胡岳华, 霍成立. 2008. 重晶石矿物材料的制备技术与应用进展[J]. 材料导报, 22(S2): 191–194.
- 黄燕. 2011. 湖南张家界地区寒武系牛蹄塘组黑色岩系沉积地球化学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1–62.
- 姜雅, 王婷, 龙涛. 2021. 关于将重晶石列为战略性矿产的原则分析[J]. 地球学报, 42(2): 297–302.
- 李波, 黄智龙, 许成. 2007. 四川冕宁稀土矿床硫同位素地球化学[J]. 矿物学报, 27(3): 430–433.
- 李春阳, 田升平, 牛桂芝. 2010. 中国重晶石矿主要矿集区及其资源

- 潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 32(2): 75–86.
- 李文炎, 余洪云. 1991. 中国重晶石矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1–105.
- 李占远. 2004. 我国重晶石资源分布与开发前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, (5): 86–88.
- 林秋伶, 李小虎, 孟兴伟, 王浩, 丁一, 樊泽栋. 2023. 现代海底热液区重晶石的地球化学特征及其影响因素[J]. 地质科学, 58(3): 1091–1117.
- 刘家军, 吴胜华, 柳振江, 苏文超, 王建平. 2010. 南秦岭大型钼成矿带中毒重石矿床成因新认识——来自单个流体包裹体证据[J]. 地质前缘, 17(2): 222–238.
- 刘灵, 石庆鹏, 文星桥, 徐东波, 王文杰. 2015. 贵州天柱重晶石矿床成矿条件及找矿潜力分析[J]. 贵州地质, 32(4): 262–266.
- 刘灵, 杨宏伟, 石庆鹏. 2019. 贵州热液型重晶石矿集区地质特征及成矿规律[J]. 贵州地质, 36(3): 207–214.
- 刘思聪, 宁淑媛, 郑德顺. 2021. 南秦岭地区下寒武统水沟口组黑色岩系成因及其沉积环境[J]. 地质学报, 95(2): 549–564.
- 潘忠飞, 付勇, 郭川, 施春华, 刘灵, 刘阳, 龙珍, 罗培麒, 刘国栋, 姚兰, 杨颖, 杨黔闽. 2023. 重晶石成矿地质特征、成矿作用及成矿机制[J]. 矿床地质, 42(1): 90–115.
- 彭军, 夏文杰, 伊海生. 1999. 湖南新晃贡溪重晶石矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 成都理工大学学报, 26(1): 92–96.
- 齐兵德, 周云龙, 马兰兰. 2018. 贵州施秉—余庆地区重晶石矿及铅锌矿床成因及成矿模式讨论[J]. 世界有色金属, (13): 293–294.
- 石龙. 2007. 北大巴山下寒武统重晶石—毒重石矿床形成条件与成矿过程分析[D]. 北京: 中国地质大学, 1–83.
- 孙学通. 2004. 早寒武世热水沉积成矿作用地球化学研究——以新晃重晶石矿床与遵义钼—钨矿床为例[D]. 南京: 南京大学.
- 孙泽航, 胡凯, 韩善楚, 刘寅. 2015. 湘黔新晃—天柱重晶石矿床微量稀土元素和硫同位素研究[J]. 高校地质学报, 21(4): 701–710.
- 汤继新, 陈圣新. 1989. 我国重晶石矿产资源及开发利用[J]. 中国地质, (6): 24–25.
- 田江涛, 唐毅, 王成, 李涛, 李大海. 2017. 新疆重晶石矿地质特征及成矿规律分析[J]. 西部探矿工程, 29(6): 124–128.
- 田升平, 韩豫川, 熊先孝等编著. 2014. 中国重晶石矿成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 108.
- 汪东波, 李树新. 1991. 略阳东沟坝金、银、铅、锌、黄铁矿—重晶石型矿床的成因[J]. 西北地质, 12(3): 25–32.
- 王富良, 黄艺, 付勇, 龙克树, 文星桥. 2020. 黔东早寒武世早期重晶石富集机制研究——来自硫同位素的约束[J]. 地球学报, 41(5): 686–698.
- 王国洪, 陈元寿, 杨鹏, 李承杰. 2020. 四川呷村银多金属矿区重晶石矿体特征[J]. 世界有色金属, (15): 96–97.
- 王威, 欧阳兆辉. 2005. 重晶石矿粉表面改性研究与应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, (6): 37–39.
- 王文杰, 刘灵, 杨贵龙, 石睿, 李永刚. 2023. 天柱县大河边重晶石矿床成矿模式及找矿潜力[J]. 中国资源综合利用, 41(2): 72–76.
- 王洋, 黄聪, 李珍. 2020. 重晶石资源现状及材料化应用[J]. 矿产保护与利用, 40(6): 26–32.
- 文国江, 金波, 谢江涛. 2022. 贵州沿河杨家坝重晶石矿地质特征及成矿模式浅析[J]. 云南地质, 41(1): 93–97.
- 温汉捷, 周正兵, 刘灵, 秦朝建, 黄远成, 文星桥, 石庆鹏, 徐东波, 王文杰. 2017. 贵州天柱大河边铅锌矿床的发现及其意义[J]. 地质通报, 36(7): 1288–1293.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999. 新晃贡溪—天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 35(6): 774–785.
- 吴胜华. 2010. 南秦岭大型钼成矿带成矿流体地球化学与成矿机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 夏菲, 马东升, 潘家永, 孙占学, 曹双林, 聂文明, 吴凯. 2004. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据[J]. 科学通报, 49(24): 2592–2595.
- 徐鹏金. 2023. 重晶石高值化应用研究进展[J]. 中国粉体工业, (3): 12–14.
- 宣之强. 1999. 我国重晶石矿床成因及成矿远景综述[J]. 化工矿产地质, 21(1): 24–30.
- 杨琳丽. 1989. 钼矿物的开发利用[J]. 矿产综合利用, (5): 40–45.
- 杨瑞东, 魏怀瑞, 鲍森, 王伟, 王强. 2007a. 贵州天柱上公塘—大河边寒武纪重晶石矿床海底热水喷流沉积结构、构造特征[J]. 地质论评, 53(5): 675–680.
- 杨瑞东, 鲍森, 魏怀瑞, 王伟, 王强. 2007b. 贵州天柱寒武系底部重晶石矿床中热水生物群的发现及意义[J]. 自然科学进展, 17(9): 1304–1309.
- 杨瑞东, 李鑫正, 莫洪成, 周登峰, 孙百川, 高军波, 陈军. 2023. 湘西黔东寒武纪重晶石矿成矿规律与成矿模式[J]. 矿物学报, 43(2): 173–184.
- 叶连俊. 1998. 生物有机质成矿作用和成矿背景[M]. 北京: 海洋出版社.
- 余文波, 杨鼎忠, 张曦月, 孙红娟, 曾鹏. 2022. 贵州省重晶石矿的矿物学特征及开发利用建议[J]. 矿产保护与利用, 42(4): 143–152.
- 岳超先, 熊汉桥, 苏晓明, 庄严, 徐鹏. 2017. 加重剂类型对油基钻井液性能的影响评价[J]. 钻井液与完井液, 34(1): 83–86.
- 笕博文, 刘树根, 冉波, 叶玥豪, 杨迪, 黄瑞, 夏国栋, 焦堃. 2017. 扬子板块北缘下志留统龙马溪组重晶石结核特征及其成因机制分析[J]. 岩石矿物学杂志, 36(2): 213–226.
- 张福良, 卢晓亚. 2017. 我国重晶石资源开发利用现状及建议[J]. 现代矿业, 33(9): 1–4.
- 张慧慧. 2007. 重晶石基复合导电粉末及涂层的制备与表征[D]. 长沙: 中南大学.
- 张建忠, 左亚林, 陈远兴. 2014. 贵州沿河北部地区萤石—重晶石矿地质特征及找矿前景分析[J]. 西部探矿工程, 26(10): 153–155.
- 赵代珍. 1986. 新晃县贡溪重晶石矿床地质特征及形成条件[J]. 湖南地质, 5(4): 1–11.
- 赵义, 彭会清. 2015. 重晶石矿物的开发与应用研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, (6): 3–6.
- 邹灏, 淡水, 张寿庭, 方乙, 曹华文, 李冬. 2016. 重庆东南部彭水地区重晶石—萤石矿床的成矿物质来源探讨: 地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 40(1): 71–85.