

doi: 10.12029/gc20240404004

李晓丹, 王春连, 黄可可, 沈立建, 游超, 蒋徽辉, 赵雨欣. 2025. 中国石膏分布、类型、产业应用现状及找矿前景分析[J]. 中国地质, 52(4): 1247–1267.

Li Xiaodan, Wang Chunlian, Huang Keke, Shen Lijian, You Chao, Jiang Huihui, Zhao Yuxin. 2025. Distribution, origin, industrial application status and prospecting prospect of gypsum in China[J]. Geology in China, 52(4): 1247–1267(in Chinese with English abstract).

中国石膏分布、类型、产业应用现状及找矿前景分析

李晓丹^{1,2,3}, 王春连³, 黄可可^{1,2}, 沈立建³, 游超^{3,4}, 蒋徽辉^{3,5}, 赵雨欣^{1,2,3}

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 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; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 5. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:【研究目的】石膏是中国储量大且分布广的优势非金属矿产之一, 其应用十分广泛。总结分析中国石膏的分布、成因、应用以及找矿前景对于石膏的可持续利用具有重要意义。【研究方法】本文从石膏矿床类型、时空分布、应用等方面入手, 总结前人的研究成果以及收集相关资料, 系统梳理了中国石膏的资源储量和矿山产量, 提供了寻找新的石膏矿床的背景知识。【研究结果】2022 年中国石膏资源保有储量为 17.58 亿 t, 安徽省保有储量最多, 矿床类型为沉积型、后生型和热液型石膏、硬石膏矿床, 其中以沉积型矿床为主。中国石膏资源主要用于建材、工业、农业以及医学等行业。对石膏的再生利用, 有利于缓解中国石膏资源紧张的局面。但是在利用工业副产石膏时产生的问题也不容忽视, 所以也要注重天然石膏的开发、利用与保护。【结论】石膏矿床形成主要受到气候、物源和构造的控制, 封闭、半封闭的盆地, 干旱、半干旱的气候条件以及充足的物质促进了石膏矿床的形成。祁连成矿带、天山—北山成矿带、西昆仑—阿尔金成矿带和长江中下游成矿带是中国石膏重要的成矿远景区。

关键词: 石膏矿床; 资源特征; 矿床分类; 找矿前景; 应用方向; 矿产勘查工程

创 新 点: (1)总结了石膏矿床资源概况、矿床成因分类、关键领域应用等; (2)根据石膏矿床的成因及分布特征, 预测了找矿远景区域。

中图分类号: P619.261 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1247-21

Distribution, origin, industrial application status and prospecting prospect of gypsum in China

LI Xiaodan^{1,2,3}, WANG Chunlian³, HUANG Keke^{1,2}, SHEN Lijian³, YOU Chao^{3,4},
JIANG Huihui^{3,5}, ZHAO Yuxin^{1,2,3}

(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. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 5. Faculty of Land

收稿日期: 2024-04-04; 改回日期: 2024-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A2092、42002106、41907262、41502089)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005、KK2322)及中国地质调查局项目(DD20230056)联合资助。

作者简介: 李晓丹, 女, 1999 年生, 硕士生, 主要从事沉积学方面研究; E-mail: 1394421890@qq.com。

通信作者: 王春连, 男, 1983 年生, 研究员, 主要从事矿床学方面研究; E-mail: wangchunlian312@163.com。

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

[Objective] Gypsum is one of the dominant nonmetallic minerals with large reserves and wide distribution in China, and its application is very wide. It is significant to summarize and analyse the distribution, source, application and prospect of Chinese gypsum for sustainable use. **[Methods]** Starting from the types, temporal and spatial distribution and application of gypsum deposits, this paper summarizes the previous research results and collects relevant data, systematically combs the resource reserves and mine output of gypsum in China, and provides the background knowledge for searching for new gypsum deposits. **[Results]** In 2022, the retained reserves of gypsum resources in China will be 1.758 billion tons, with the largest reserves in Anhui Province. The deposit types are sedimentary, epigenetic and hydrothermal gypsum and anhydrite deposits, among which sedimentary deposits are the main ones. China's gypsum resources are mainly used in building materials, industry, agriculture and medical industries. The regeneration and utilization of gypsum can help alleviate the tense situation of gypsum resources in our country. However, the problems caused by the use of industrial by-product gypsum can not be ignored, so we should also pay attention to the development, utilization and protection of natural gypsum. **[Conclusions]** The formation of gypsum deposits is mainly controlled by climate, provenance and structure. Closed and semi-closed basins, arid and semi-arid climatic conditions and sufficient materials promote the formation of gypsum deposits. Qilian metallogenic belt, Tianshan-Beishan metallogenic belt, West Kunlun Altun metallogenic belt and middle and lower Yangtze metallogenic belt are important metallogenic prospect areas of gypsum in China.

Key words: gypsum deposit; resource characteristics; prospecting prospect; application direction; classification of deposit; mineral exploration engineering

Highlights: (1) The general situation of diatomite deposit resources, the genetic classification of deposit and the application of key fields were summarized. (2) According to the genesis and distribution characteristics of diatomite deposit, we predicted prospecting prospect area.

About the first author: LI Xiaodan, female, born in 1999, master candidate, mainly engaged in the study of sedimentary; E-mail: 1394421890@qq.com.

About the corresponding author: WANG Chunlian, male, born in 1983, researcher, mainly engaged in sedimentology and mineral deposit research; E-mail: wangchunlian321@163.com.

Fund support: Supported by the National Science Foundation of China (No.U20A2092, No.42002106, No.41907262, No.41502089), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No.KK2005, No.KK2322) and the project of China Geological Survey (No.DD20230056).

1 引言

石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和硬石膏(CaSO_4)是由封闭海水、潟湖、盐湖等盐水经过蒸发而析出产生的(郑希民等, 2019)。石膏是分布最广的硫酸盐矿物, 常与方解石、白云石、硬石膏、钙芒硝、石盐等共生, 同时也出现于某些热液矿脉中, 是一种重要的非金属矿产资源。天然石膏及其制品具有质轻、快凝、阻燃、抗噪、抵御电磁辐射等诸多特质, 因此在建筑和建材行业、轻工业、精密铸造、化工行业、农业、医学等众多行业得到了广泛的使用。此外, 膏盐岩可以作为盖岩, 在石油成藏中发挥重要作用(王文楷等, 2017)。

中国具有丰富的石膏资源, 但分布不均, 优质资源有限。当前, 中国已经成为了石膏的主要消费国, 且在今后的发展过程中, 伴随着经济的稳步增长、基建和房地产业的快速发展, 中国石膏产业将会有很大的发展空间(李奇林等, 2022)。同时, 国家关于工业副产石膏的综合利用政策, 也促使石膏资源的利用结构不断调整。如果将工业副产石膏合理利用, 不仅可以满足对石膏的需求, 而且也会避免由工业副产石膏带来的环境污染问题。但是, 目前中国工业副产石膏的资源化利用还存在一些问题, 工业副产石膏中含有多种杂质, 含磷和氟化物对石膏性质的影响需要进一步研究(姜春志和董风芝, 2016)。因此, 对中国石膏资源的分布、成因、应

用、开发利用情况进行深入研究,有利于为石膏资源的合理开发和高效利用提供科学依据。

2 石膏资源概述

2.1 世界资源禀赋

世界石膏资源丰富,分布广泛,已经有 100 多个国家和地区勘探查明了石膏储量,但缺乏较准确的统计数据。根据美国地质调查局(2022)的统计数据,截至 2022 年,中国石膏储量位居第一,为 150000 万 t,占全球已知储量的 41%,其次为美国 70000 万 t,储量较为丰富的还有巴西和加拿大,为 45000 万 t (图 1)。在产量方面,中国石膏 2013—2022 年累计产量远超其他国家,2016 年以前,中国石膏矿山产量较多,2016 年以后,相对减少(图 2)。2022 年全球石膏矿山产量为 15000 万 t,其中美国产量位于全球第一,占全球产量 14%,产量超过 1000 万 t 的国家有美国(2100 万 t)、伊朗(1600 万 t)、中国(1300 万 t)、阿曼(1200 万 t)以及西班牙(1100 万 t)。从成矿时代来看,石膏矿床在世界各地广泛分布,经历了许多地质时期,几乎自元古宙以来各个时期都有石膏矿床形成,但成矿时代主要集中于志留纪、泥盆纪、二叠纪、三叠纪与古近纪(Charola et al., 2007)。目前,澳大利亚马德乌斯盆地分布着全球储量最大的前寒武纪石膏矿床,其沉积厚度可达

260 m(来瑞娟, 2017)。

2.2 中国资源禀赋

中国石膏资源丰富,截至 2019 年,石膏查明资源储量为 825.1 亿 t。根据自然资源部 2022 年数据统计,截至 2022 年,中国石膏保有储量为 17.58 亿 t,安徽保有储量位居第一,达到 3.59 亿 t,占全国总资源保有储量的 20.4%,其次为山东(14.6%)、四川(10.3%)、云南(9.4%)、湖北(8.9%)。其中华东地区石膏保有储量最高,占全国的 35.38%,东北地区石膏资源较缺乏,仅有 1.53%(表 1)。

中国石膏矿床类型丰富,且遍及各地。中国石膏分布于 23 个省、市、自治区。依据《矿产资源储量规模划分标准》对矿床资源储量进行划分,将中国石膏矿床划分了特大型、大型、中型和小型 4 类,大于 3000 万 t 为大型,1000~3000 万 t 为中型,1000 万 t 以下为小型,特大型矿床一般由 3~5 个大型矿床组成。截至 2021 年,中国发现石膏矿床(点) 900 余处(表 1, 图 3),其中特大型 35 处,主要分布在山东、湖北,大型 217 处,中型 173 处、小型 537 处,主要分布在山东、湖南、湖北、四川、宁夏等地。山东石膏矿床分布数量最多,矿床数量达 104 处。安徽石膏矿床中特大型和大型所占比例较大,中小型石膏矿床数量较少。山东枣庄地区、内蒙古鄂托克旗地区、湖北应城地区、江苏南京地

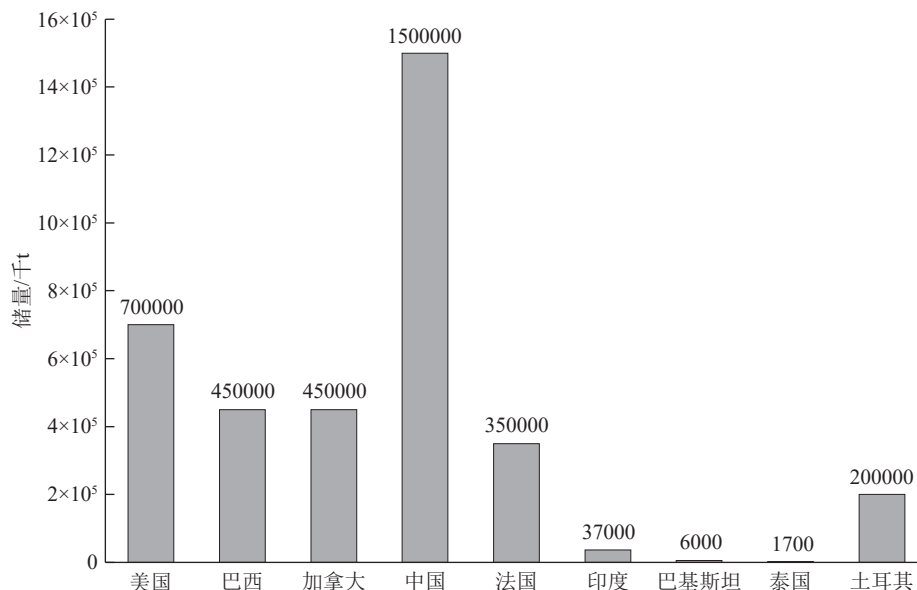


图 1 世界部分国家储量图(据美国地质调查局)

Fig.1 Reserves of some countries in the world (after the United States Geological Survey)

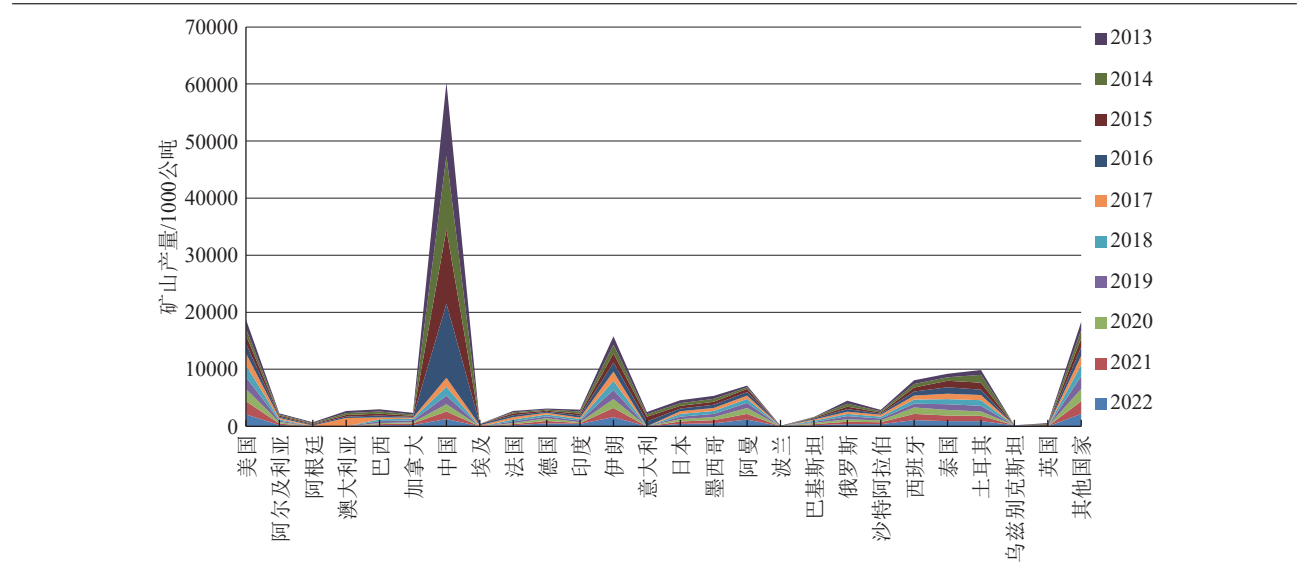


图 2 世界主要国家或地区石膏矿产量的累计面积图(据美国地质调查局)
Fig.2 Cumulative area map of gypsum mine output in major countries or regions of the world
(after the United States Geological Survey)

表 1 中国各省石膏矿床数量及资源总量统计（据自然资源部）

Table 1 Statistics of the quantity and total resources of gypsum deposits in China (after the Ministry of Natural Resources)								
地区	主要地域	特大型	大型	中型	小型	总计	保有资源储量/亿t	资源储量占比/%
华北地区	全国	35	217	173	537	962	17.58	
	河北	0	9	7	16	32	1.16	6.59
	山西	0	5	7	42	54	0.14	0.79
	内蒙古	0	9	8	26	43	0.08	0.45
	总计	0	23	22	84	129	1.38	7.8
东北地区	辽宁	0	2	2	3	7	0.19	1.08
	吉林	1	0	5	28	34	0.08	0.45
	总计	1	2	7	31	41	0.27	1.53
华东地区	江苏	1	15	5	1	22		
	安徽	2	24	9	8	43	3.59	20.42
	江西	0	1	3	14	18	0.06	0.34
	山东	12	29	23	40	104	2.57	14.61
	总计	15	69	40	63	187	6.22	35.38
中南地区	河南	1	2	1	7	11	0.07	0.39
	湖北	6	24	31	34	95	1.56	8.87
	湖南	1	19	12	69	101	0.95	5.4
	广西	2	2	0	10	14	0.04	0.22
	广东	0	5	6	3	14	0.01	0.05
	总计	10	52	50	123	235	2.63	14.96
西南地区	重庆	1	1	0	7	9	0.14	0.79
	四川	0	12	4	45	61	1.81	10.29
	贵州	1	3	2	14	20		
	云南	2	9	2	15	28	1.65	9.38
	总计	4	25	8	81	118	3.6	20.47
西北地区	陕西	1	2	1	6	10	0.76	4.32
	甘肃	1	7	16	25	49	0.33	1.87
	青海	0	10	10	21	41		
	宁夏	1	13	8	43	65	1.27	7.22
	新疆	2	14	11	60	87	1.11	6.31
	总计	5	46	46	155	252	3.47	17.58

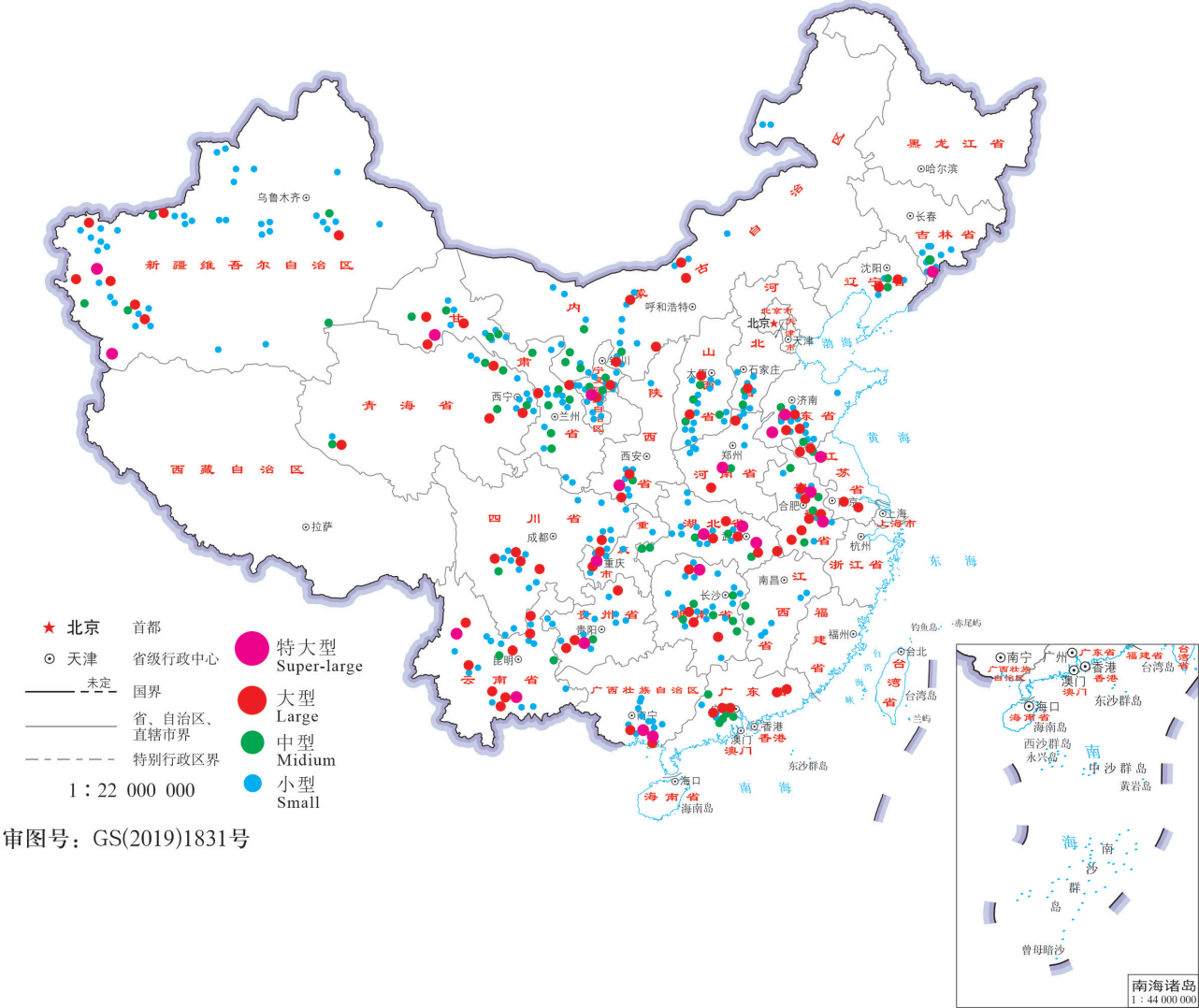


图 3 中国石膏矿床分布(据全国矿产地数据库)
Fig.3 Distribution of gypsum deposits in China (after the National Mineral Resources Database)

区、山东大汶口地区和山西太原地区,是中国重要的石膏矿床分布区。

3 石膏矿床类型及典型矿床

卢志诚(1983)针对中国石膏矿床的成因特征,将其划分为热液型、蒸发型、后生沉积型和机械沉积型。根据《石膏、天青石、硅藻土矿产地质勘查规范》(DZ/T 0325—2018),中国石膏矿床可以分为沉积型、后生型和热液交代型 3 类,其中以沉积型矿床为主。本文采用后者的分类方式进行讨论。根据已有的数据统计(表 2、图 4),中国石膏矿床类型以沉积型为主,分布广泛,在已统计的每个省份都有分布,其占比达 89.5%,后生型和热液型总占比

约 10.5%,且分布范围小。

3.1 沉积型石膏、硬石膏矿床

石膏矿床主要分布在沉积岩系中,与盐类矿床共生,常见于干旱和半干旱地区的蒸发岩序列中。含石膏蒸发岩的起源模型分为两大类(Liu et al., 2018):“潮上萨布哈”和“水下浓缩沉淀”两种模式(图 5)。控制蒸发岩形成及特征的三大主要因素为:气候、物源和构造(Warren, 2010; 刘成林等, 2015)。因此,产生石膏沉淀需要具备以下条件:

一是稳定的沉积环境:将新元古代以来的全球板块构造旋回与蒸发岩的沉积量进行对比,显生宙以来经历了造山、板块拼合和早期陆缘裂解等过程,并在此过程中产生了相当数量的蒸发岩(文国华

表 2 中国已统计的石膏矿床类型数量
(据全国矿产地数据库)

Table 2 The number of gypsum deposit types in China
(after the National Mineral Resources Database)

地区	沉积型/个	后生型/个	热液型/个
河北	15		2
山西	10		3
内蒙古	20		
辽宁	3		
吉林	21		
江苏	17		
安徽	29		12
江西	14		1
山东	61		1
河南	5	1	
湖北	27	1	12
湖南	33	5	
广西	6	6	
广东	13		
重庆	6		1
四川	19		1
贵州	13	3	
云南	28		2
陕西	3		
甘肃	32	1	
青海	30	2	
宁夏	35		
新疆	55		4
全国总计	495	19	39
占比/%	89.5	3.4	7.1

等, 2021)。巨型蒸发矿床的形成通常发生在构造周期的开始或结束(龚大兴, 2016); 几乎所有的大型蒸发岩矿床都沉淀在封闭或半封闭的盆地中(Warren, 2010); 被动大陆边缘稳定的构造环境为蒸发岩的形成提供了长期稳定的条件和充足的空间(Xie et al., 2021)。

二是干燥炎热的气候条件: 古气候条件在蒸发岩的形成中发挥了关键作用(刘成林等, 2015), 蒸发岩通常沉积在干旱气候条件下, 含溶质水的净流入蒸发率高(Yin and Li, 2022), 持续的气候干旱, 有利于盐湖发育和卤水的持续蒸发和浓缩。

三是丰富的物质来源: 海水、陆源物质、火山作用或岩浆作用、天然热水溶液(涉及高温, 丰富的热流和沸腾的泉水)和深部卤水是蒸发岩形成的重要物质来源。通过地幔上升流和能量积累, 裂谷过程和相关的火山活动可能通过来自上地幔和深部地壳的热液和盐水流体的出现产生丰富的物质来源(Xie et al., 2019)。

沉积型石膏、硬石膏矿床是中国最主要的矿床类型, 现有的最具工业意义的石膏矿床都属于沉积型矿床。这类矿床在中国时空分布广, 矿体厚度大, 矿石质量好, 多分布在现代或古代的低纬度地区。早中寒武世、中奥陶世、早石炭世、早中三叠世、白垩纪是沉积类型石膏矿床形成的重要时期(化志新, 2018), 其成矿特征及空间展布特征显著。根据沉积环境的不同, 沉积型石膏、硬石膏矿床可以划分为: 海相沉积石膏矿床和湖相沉积石膏矿床。海相沉积型矿床多发生在早、中三叠世之前, 而从侏罗纪至第四纪则以湖相沉积矿床为主。表 3 列举了中国部分特大型、大型沉积石膏矿床的时空分布。

3.1.1 海相沉积型石膏矿床

海相沉积型石膏矿床常出现在潟湖、海岸萨布哈、潮上带、潮间带和潮下带, 成矿物质除来源于海

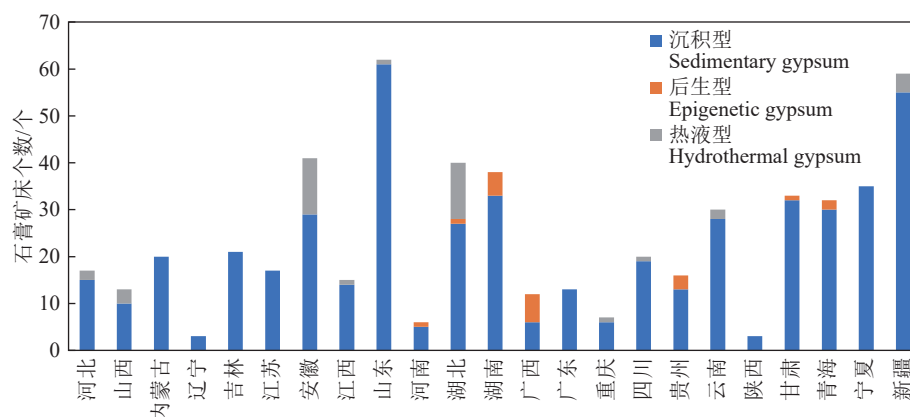


图 4 中国石膏矿床类型的省级分布(据全国矿产地数据库)

Fig.4 Provincial distribution of gypsum deposit types in China (after National Mineral Resources Database)

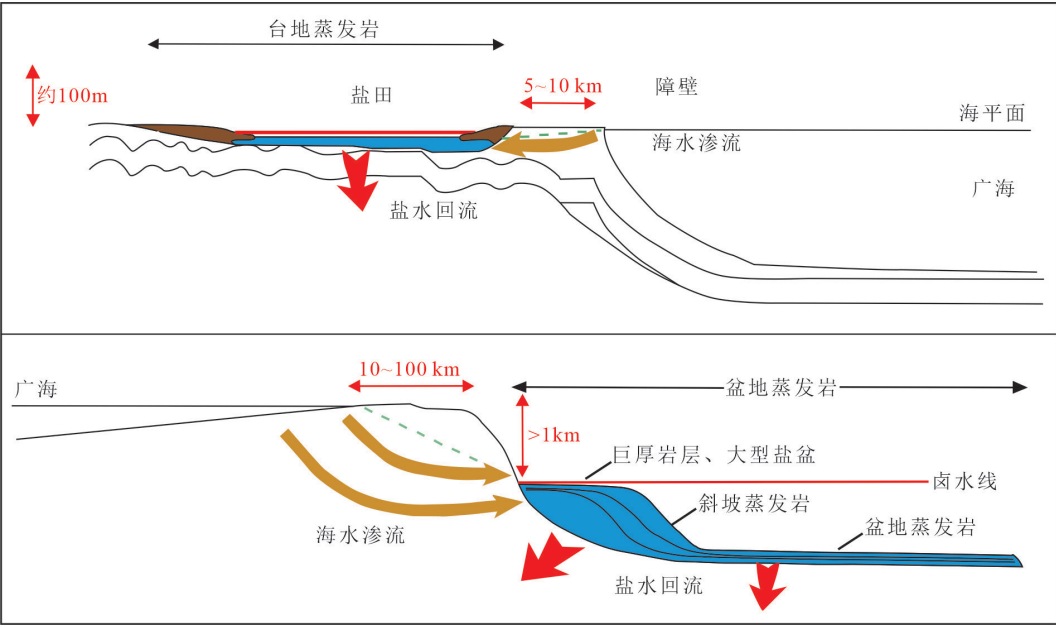


图 5 海相台地蒸发岩、盆地蒸发岩成因示意图(据文国华等, 2021)

Fig.5 Schematic diagram of genesis of marine platform evaporite and basin evaporite (after Wen Huaguo et al., 2021)

表 3 中国部分特大型、大型石膏矿 (据董斌, 1990; 刘晓等, 2020)

Table 3 Some extra-large and large gypsum mines in China (after Dong Bin, 1990; Liu Xiao et al., 2020)				
类型	矿床名称	产地	规模	时代
海相沉积	辛集石膏矿	河南省鲁山县	特大型	早寒武世
	瓦刀子石膏矿	陕西省西乡县	特大型	早三叠世
	河南省袁家庄石膏矿床	河南省汝州市	特大型	早寒武统
	小南海—李家庄石膏矿	河南省安阳县	大型	中奥陶世
	邵阳县常乐石膏矿	湖南省邵阳县	大型	早石炭世
	小红山石膏矿	宁夏回族自治区中卫市	大型	早石炭世
	东京陵石膏矿	辽宁省辽宁市	大型	早寒武世
	阿其克石膏矿	新疆维吾尔自治区洛浦县	大型	早二叠世
湖湘沉积	麻城铺石膏矿	湖北省荆门市	特大型	晚白垩世
	新城石膏矿	甘肃省临潭县	大型	古近纪
	安棚石膏矿	河南省桐柏县	大型	古近纪
	盛家滩石膏矿	湖北省应城市	大型	古近纪
	上五通石膏矿床	湖南省石门县	大型	古近纪
	鲁家沟石膏矿床	甘肃省天祝县	大型	早石炭世
	后河石膏矿	湖北省利川市	大型	早三叠世
	北山寺—洋子山石膏矿	青海省西宁市	大型	古近纪
	八里张石膏矿	安徽省定远县	大型	古近纪
	邹庄石膏矿	江苏省邳州市	大型	古近纪

水外,还与岛弧、海底火山喷发产生的热卤水、生物死亡后产生的硫化氢、陆源物质的供应及古陆的位置等因素密切相关(陈国芳和谢飞跃, 2007)。一般在封闭的沉积盆地内,有礁或其他自然屏障与大洋隔开的局限海或潟湖环境,海水蒸发后留下饱和盐水,各种矿物质按其溶解度可从盐水中依次析出沉淀:首先是碳酸盐,其次是石膏,然后是石盐,最后是带苦味的镁盐渣和钾盐渣(图 6)。

中国海相石膏矿主要产于中—下三叠统、下石炭统、中奥陶统和下寒武统(郑涛, 2013)。三叠系海积石膏矿床是最年轻的,其沉积、成岩、后生变化等过程的地质特征保存相对完好(陶维屏, 1983)。华北中奥陶统为一套海相碳酸盐岩沉积,石膏矿床广泛分布于华北中部地区,它们遍及山西和河北的中南部、山东西部、陕西东部及河南北端(薛平, 1985)。东北地区的石膏主要赋存于下寒武统,主

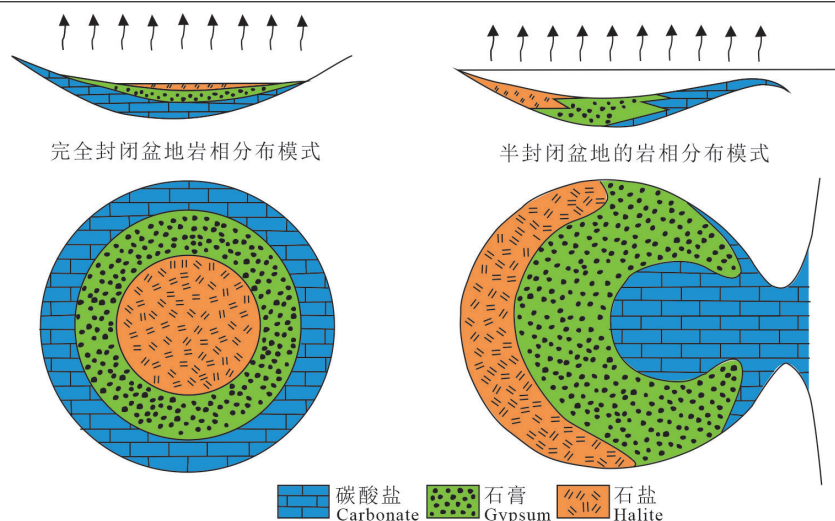


图6 蒸发岩分布类型(据 Schmalz, 1969)

Fig.6 Evaporite distribution types (after Schmalz, 1969)

要分布于辽宁东部和吉林南部,分别产于吉林东热、湾沟、下四平—浑江、抚松地区和辽宁辽阳—本溪地区(郑涛和文灿国, 2013)。西北祁连山地区的石膏赋存于下石炭统,集中于西段疏勒南山城墙沟组上部及东段天祝、景泰一带下石炭统前黑山组。由于洋壳进行扩张和板块的移动,早石炭世早期古特提斯海水经塔里木板块将祁连的边缘活动带淹没,这一过程在祁连的边缘活动带造成了膏盐坪的形成(关绍曾等, 1996)。长江流域主要赋存于下—中三叠统(薛武, 1986),该地区三叠系的石膏资源极为丰富,且分布范围极为广阔,由西而东,即川东、鄂、湘西北部、皖南、苏南(白寿昌, 1984)。川东地区,系指华莹山及其以东四川盆地东部的范围,是中国南方膏盐矿的重要产区(徐兴国和熊昌铨, 1987)。从寒武纪到三叠纪石膏矿床的分布位置自北向南推移,分布面积也越来越广。海相沉积型石膏矿床主要产地有四川渠县、江苏南京、山西太原、甘肃天祝、辽宁辽阳、陕西西乡等地。

3.1.2 湖相沉积型石膏矿床

地史上陆相蒸发岩的形成环境与第四纪陆相蒸发岩环境类似,主要形成于水文地理条件相对封闭(一般是内流环境)的山间盆地及沙漠边缘地区,盆地海拔一般高于海平面。全球大型陆相蒸发岩大多形成于始新世到更新世时期,新近纪冰期环境下雨季和旱季交替为大型陆相蒸发岩的形成创造了有利条件。

陆相蒸发环境包括陆内萨布哈与湖泊。成岩卤水来源复杂,有残留海水、大气降水、河流汇入、深源补给等(Warren, 2016)。物质来源有大陆风化产物、深部来源及局部短暂海水,古构造为盆内次级断块分隔及多级盆地组成,古气候多为半干旱、间有短暂潮湿。湖相沉积过程中,断裂起重要的沟通和补给作用,断裂构造的活动及其发展决定含膏盆地的发生、发展和石膏的形成。北北东向的郯庐、银昆和大兴安岭—太行山—雪峰断裂是控制成膏断陷湖盆形成的主要原因。这三条断裂带与次级断裂交汇形成的陆内裂谷对中国东部地区白垩纪—古近纪盐沉积起着重要的作用。在郯庐断裂以西,有大汶口、枣庄、定远、衡阳等含膏盆地;银昆断裂带有杭锦、同心、大邑、红河等含膏盆地;大兴安岭—太行山—雪峰断裂断层带内有三门峡、泌阳、枣阳、余庆、黄平等含膏盆地(化志新, 2018)。

中国湖相沉积石膏矿床赋存于下—中三叠统、白垩系和古近系,以大、中型为主。湖相沉积石膏矿床明显受到层位的控制,以白垩纪—古近纪中赋存的石膏最具有工业意义,其分布范围几乎遍及全国,较为集中的是东部地区和西北地区(薛武, 1986)。山东大汶口盆地的石膏矿床是古近纪石膏矿床的一个重要赋存区(王艳婷等, 2014),盆地内石膏分布面积约 204 km²,蕴藏着丰富的石膏矿产资源,其经济价值为 667.42 亿 t,资源储量位居全国首位(秦守萍等, 2008)。宁夏地区晚渐新世清水营组

产出的湖相沉积石膏,发育于宁夏中南部的同心—海原成矿区(含贺家口子、泥沟等大型矿床)和宁夏以东的盐池成矿区(含侯家河、陈家圈、石记场等大型矿床)(马智强, 2000)。

3.1.3 典型矿床

(1) 东京陵石膏矿床

东京陵石膏矿为辽宁省辽阳市的灯塔市罗大台镇及辽阳市太子河区东陵镇所辖,西南方向距辽阳市 7 km(直线距离),东北方向距灯塔市 13 km(直线距离),本区的大地构造位置属中朝准地台、胶辽台隆、太子河—浑江台陷、辽宁—本溪凹陷(宋春振, 2009)。该矿区下寒武统馒头组和碱厂组上部为含矿带,储量较大,具有较好的品位,预测出的内蕴经济资源量(333)为 10651 万 t。矿区共为五个膏组(层),其中Ⅱ、Ⅲ膏组因不符合工业指标要求而不具意义,Ⅰ膏组和Ⅳ膏组都赋存于馒头组白云质泥岩下,Ⅴ膏组赋存于碱厂组上部(吴贇, 2019),Ⅳ膏组共有三层矿达到可采标准,Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ膏组介绍见表 4。震旦纪以来本区长期沉降,碱厂期末,滨海潟湖海水渐趋浓缩,盐类浓度增高,分异并沉积了部分石膏、硬石膏,是该区早寒武纪最早的蒸发岩段(裴永万和芦杰, 2007)。在馒头期,基底升降运动强烈,气候炎热,蒸发量较大,沉积了陆源红层为代表的海退式沉积序列。几乎所有的石膏层都被白云石—石膏或砖红色白云质泥岩岩性序列所控制(宋春振, 2009)。矿石的原生结构为纤维状结构和隐晶结构,均匀状构造。次生结构则有鳞片、粒状、斑状变晶结构,以及纤维粒状变晶结构等,角砾状构造,局部见混合型构造(吴贇, 2019)。

(2) 山东大汶口盆地石膏矿床

山东大汶口盆地是古近纪著名的湖相蒸发岩沉积盆地,也是山东地区西部最大的沉积赋矿盆地(朱猛, 2015)。大汶口盆地向东有汶东凹陷、蒙阴凹陷、泰莱凹陷与之相连通(图 7)。盆地拥有大量

的蒸发岩型矿物,如石膏、钾盐和自然硫等(谢丽丽等, 2023)。目前,已探明石膏资源量达 151 亿 t,钾盐 900 万 t(王自具等, 2003; 朱猛, 2015; 石厚礼等, 2016)。在大汶口盆地中,石膏矿层主要赋存于古近系官庄群大汶口组中段中,该地层为一套河湖相碎屑岩—化学岩—碎屑岩沉积(郝瑞娥等, 2023),在膏盐相区中发育,总体上呈椭圆形,从东到东南较为开阔,面积约占盆地总面积的 64%(王自具等, 2003)。岩性为石膏夹泥灰岩、泥岩、页岩。矿石矿物主要为石膏、硬石膏,脉石矿物主要为方解石、黏土质矿物,极少量的石英及微量黄铁矿等(郝瑞娥等, 2023)。

3.2 后生型石膏、硬石膏矿床

后生型石膏、硬石膏矿床是因原生矿体被溶解或随石灰岩的次生改变之后,运移、沉积、充填于含矿岩层的裂隙或洞穴中形成(吕宪河等, 2011),主要分布于广西、湖北、云南、湖南、贵州等地。按其充填形式可以分为层间裂隙、斜交层理和洞穴充填。

3.2.1 层间裂隙充填型

层间裂隙充填型石膏矿床的形成与地层中的裂隙发育程度密切相关。在沉积作用和构造作用的共同影响下,石灰岩等含钙岩石层内会发育出一系列不同方向和规模的裂隙。这些裂隙使得富含硫酸盐的流体能够在岩层间迁移。当这些流体遇到还原条件或其他化学成分发生反应时,便会析出石膏等矿物,逐渐充填在这些裂隙中。

层间裂隙充填型石膏矿床在地质特征上表现为与岩层平行的矿体分布。矿体一般呈薄层状、透镜状或不规则状,石膏形态从粗大的板状、柱状晶体到细小的针状、纤维状晶体。石膏赋存层位为古近系,矿石类型为纤维石膏,矿物组合为纤维石膏、黏土矿物、石英等。其中优质纤维石膏主要分布在湖北应城、荆门,湖南衡阳,广东兴宁,广西钦州等地,储量较少,仅占全国天然石膏总量的百分之几,

表 4 东京陵石膏矿床地质特征 (据张连强和张欢, 2018)

Table 4 Geological characteristics of Tokioling Gypsum Deposit (after Zhang Lianqiang and Zhang Huan, 2018)								
石膏层位	产出层位	矿石类型	形态	岩性		矿物成分		平均品位
				顶板	底板	硬石膏	石膏	
I (I1+I2+I3)	Є ₁ m		稳定层状	砖红色白云质泥岩	紫红色泥白云岩		7.16%	68.41%
IV (IV1+IV2)	Є ₁ m	硬石膏型	较稳定层状	砖红色白云质泥岩	含膏白云岩	>95%	4.5%	64.37%
V	Є ₁ j		稳定层状	石灰岩中			2.3%	89.67%

注: 东京陵石膏矿床勘查显示Ⅱ、Ⅲ膏层不具工业意义。

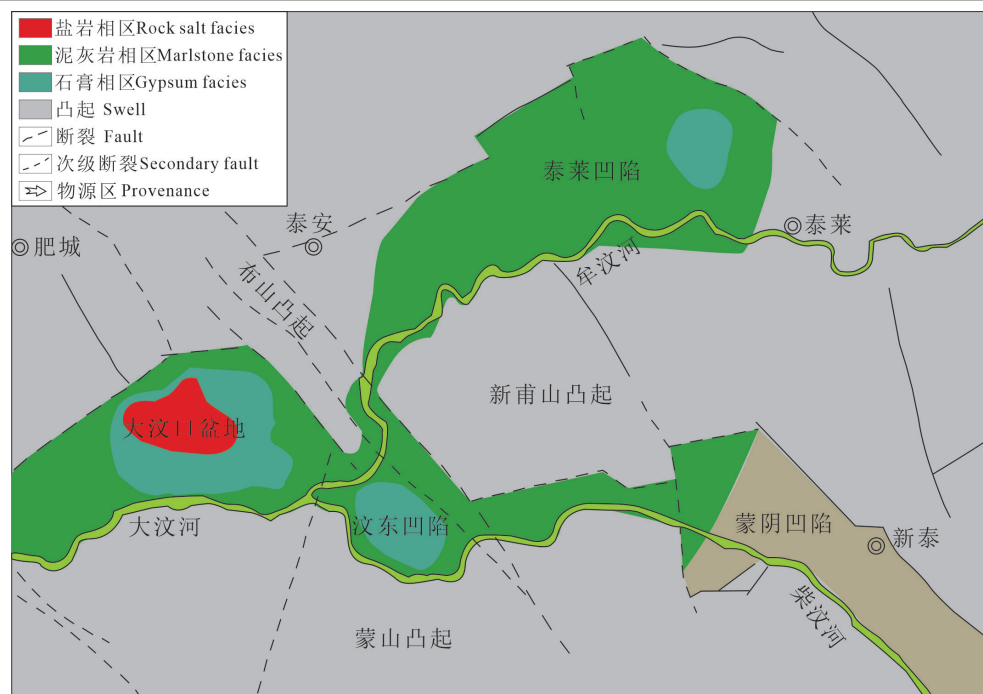


图7 大汶口盆地地质构造图(据朱猛, 2015)

Fig.7 Geological structure map of Dawenkou Basin (after Zhu Meng, 2015)

层间裂隙充填石膏矿床以大、中型为主,如湖北应城云梦石膏矿。

3.2.2 斜交层理裂隙充填型

斜交层理裂隙充填型石膏矿床的形成与构造应力场的作用有着密切的关系。在地层受到不同方向的应力作用时,容易在岩石中形成斜交于层理的裂隙系统。这些裂隙系统使得矿化流体能够在不同的地质层面上进行迁移和沉淀。当含硫酸盐的矿化流体沿着这些斜交裂隙运移时,由于地层中的化学反应或者物理条件的变化,导致石膏等硫酸盐矿物的沉淀。这些矿物随后充填在裂隙中,形成了斜交层理裂隙充填型的矿床。这类石膏矿体赋存于古近系中,矿床规模多为矿点,如贵州黄平旧州红梅。

3.2.3 洞穴充填型

洞穴充填型石膏矿床的形成与岩溶作用密切相关。在石灰岩地区,由于地下水的溶蚀作用,常常会在岩石中形成大小不一的洞穴。这些洞穴为矿化流体提供了存储空间,并在特定的地质条件下,导致石膏等硫酸盐矿物在洞穴中沉淀,从而形成洞穴充填型矿床。

洞穴充填型石膏矿床通常表现为在洞穴内壁

或底部沉积的矿物充填层。矿物层可能呈层状、透镜状或不规则状,矿床的规模通常较小,但由于洞穴内部空间的封闭性,矿物充填往往较为密集,矿床品位相对较高。石膏的形态有晶体簇、纤维状、粉状等。石膏赋存层位为寒武系上统,矿床规模多为矿点,如贵州绥阳双河。

3.2.4 典型矿床

(1) 云应盆地纤维石膏矿

云应盆地是白垩纪以来,受襄(樊)—广(济)断裂带活动形成的箕状断陷—断拗盆地。纤维石膏层脉主要赋矿层位为古近纪始新世膏盐组下含硬石膏岩段,分为上、下两个含矿层(表5)。白色纤维石膏因次生水化作用而富集成层,并以薄层群赋存,单层厚度数厘米至十几厘米,个别厚达20 cm,原生矿物为硬石膏和部分泥质石膏。云应地区同后生沉积纤维石膏层脉矿床的成因模式如图8。纤维状石膏呈乳白色,有时略带淡红,纤维结构,纤维近垂直裂隙壁。脉状、网脉、放射状、薄层状、层状构造。脉体的形成离不开物质基础、成脉空间、热液运移及充填沉淀结晶机制(方明等, 2022)。

(2) 贵州绥阳双河洞石膏晶洞

贵州绥阳双河洞探测长度为257.4 km,有

表 5 云应地区同后生沉积纤维石膏层脉矿床成因 (据方明等, 2022)

层位	岩性	物质来源及基础	成矿机理
E ₂ b 古近系始新统白沙口组	赭红色灰质黏土质粉砂岩、细砂岩为主, 其中夹有较多团块状泥质石膏, 向下逐步变为成分单一的砂岩、含砾砂岩		
E ₂ g ¹⁻¹ 古近系始新统膏盐组下含硬石膏岩段下含矿层	赭红色泥质-细碎屑岩与灰(蓝)色灰云膏粉砂质泥岩不等厚互层, 发育纤维石膏层 75~156 层	蓝灰色含石膏岩石与泥岩呈复薄层, 与中—厚层赭色泥质粉砂岩互层, 存在能干性差异成矿空间	含云质、灰质黏土矿物的分子筛作用, 使承压埋藏卤水中的 Na ⁺ 、K ⁺ 及 Cl ⁻ 等小半径离子流失, Mg ²⁺ 、CO ₃ ²⁻ 先期在通道(穿层裂隙或网脉)中结晶, Ca ²⁺ 、SO ₄ ²⁻ 等大离子在层间裂隙中结晶
E ₂ g ¹⁻² 古近系始新统膏盐组下含硬石膏岩段红层	厚层赭红色泥质粉砂岩为主, 少量的细砂岩、泥岩	与矿液运移: 位态调整、盆地不均沉降重力调整产生层脉为主的成矿空间, 地压使原生沉积物脱(卤)水上移, 承压埋藏卤水参与层间裂隙的生成并结晶成脉	
E ₂ g ¹⁻³ 古近系始新统膏盐组下含硬石膏岩段上含矿层	赭红色泥质-细碎屑岩与灰(蓝)色灰云膏粉砂质泥岩不等厚互层, 发育纤维石膏层 64~136 层		
E ₂ g ² 古近系始新统膏盐组下含钙芒硝岩段	中—厚层赭红色含砾泥质粉砂岩为主夹有细砂岩, 夹灰(蓝)色薄—纹层泥质粉砂岩及团块状、星点状泥质石膏		

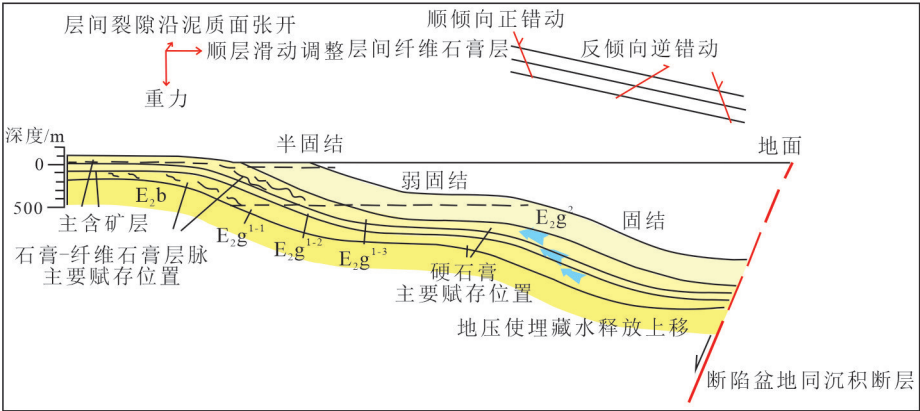


图 8 云应地区纤维石膏矿成矿模式图(据方明等, 2022)

Fig.8 Ore-forming model of fibrous gypsum ore in Yunying area (after Fang Ming et al., 2022)

34 个洞口, 是中国已探明的最长洞(罗书文等, 2019)。石膏晶洞为双河洞系的一支洞, 石膏类洞穴次生化学沉积物分布于石膏晶洞内, 呈现多种形态, 在洞穴内分布极为广泛, 范围较大, 整体纯净透亮, 极其罕见, 也异于其他地区的石膏洞, 洞穴内不可触摸易碎掉落。石膏晶洞位于皮硝洞东南侧的支洞, 洞道相对密闭, 溶洞中含有大量的石膏, 由大量的淋滤次生形成, 构成石膏体(张绍云等, 2017), 其中约 800 m 长的洞顶和洞壁上覆有石膏层, 石膏沉积类型多样, 如石膏、石笋、石钟乳、石柱和石膏卷曲石等。该矿体主要主要在溶洞底部堆积层中富集, 受溶洞底板所限, 矿体厚度为 0~0.53 m, 最厚可以达 3.45 m, 矿体延长 40~150 km, 宽度 10~20 m。石膏矿石类型主要为致密状、土状, 其次为皮壳状,

雪花状和纤维状的较为少见。

3.3 热液交代型石膏、硬石膏矿床

热液交代型石膏矿床主要由内生作用形成, 是岩体中的硫化物和围岩中的硫酸盐发生热液交代作用时, 因为有热水和天然降水的参与, 故而形成晶质石膏及硬石膏。物质来源于深部岩浆和卤水, 与内生金属矿床紧密共生, 在中国主要分布于长江中下游地区。石膏的分布受断裂构造、含钙质的围岩和含有金属硫化物的侵入体及其热液等条件的综合控制(图 9)。根据赋存的位置可以将其分成与中性侵入岩和与中性喷出岩有关的石膏、硬石膏矿床。

3.3.1 与中性侵入岩有关的石膏、硬石膏矿床

矿床形成与深部岩浆侵入体有关, 在岩浆侵入

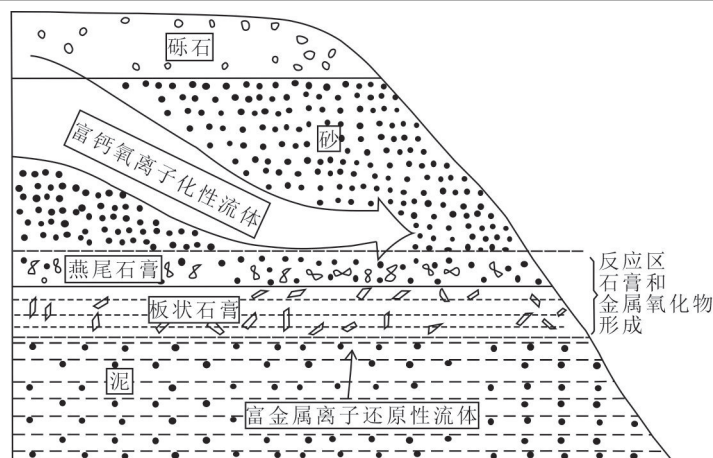


图9 热液型石膏成因模式图(据 Bain, 1990)

Fig.9 Genetic model of hydrothermal gypsum (after Bain, 1990)

过程中,高温的岩浆体可以提供大量的热量和矿化元素。由于岩浆冷却过程中会释放出热液流体,这些流体富含各种矿化元素,包括硫酸盐。当这些热液流体在地壳中上升、迁移和冷却时,它们会与围岩发生交代作用,导致硫酸盐与围岩中的钙离子发生化学反应,形成石膏。由于侵入岩通常在较深的地壳层次形成,与之相关的石膏矿床可能会在深部裂隙充填形成,或者在侵入岩体的接触带附近形成。这些石膏矿床可能与其他类型的矿床,如斑岩型铜矿床、钼矿床等共生。石膏赋存层位为三叠系下统燕山期中性岩浆侵入地层中,矿体沿接触带产出,矿体常呈透镜状(吕宪河等, 2011);矿床规模为中、小型,典型矿床有湖北鄂城程潮、湖北大冶金山店张敬简。

3.3.2 与中性喷出岩有关的石膏、硬石膏矿床

矿床形成与火山活动有关,通常形成于岛弧或其他构造环境下,中性喷出岩可能与地热系统有关,这些地热系统可以产生大量的热液流体。这些流体可能沿着火山管道、裂隙或断层上升,并在较浅的地壳层次与围岩发生交代,形成石膏矿床。石膏赋存层位为燕山期初期(对应于侏罗系)的中性喷出岩,矿床规模以小型为主,典型矿床有安徽马鞍山市向山、安徽卢江罗河。

3.3.3 典型矿床

(1) 鄂城程潮矿区

程潮矿区位于湖北省鄂州,处于丘陵地带,山脊线与构造线方向基本一致,呈北西西—南东东

方向延伸,地势总体趋势是东北高、西南低(邓洋洋等, 2019)。矿区岩浆活动极为强烈,以燕山期岩浆活动为主,严格受印支—燕山运动所形成的构造格局控制。其中活动时期以燕山晚期为主,燕山晚期岩浆活动又主要发生在凹陷带中。程潮铁矿及其外围铁矿床的形成与区域地层、构造及岩浆岩侵入作用有着十分密切关系。本区的硬石膏矿属岩浆期后中低温热液充填交代类,矿体下盘围岩为花岗岩,上盘近矿体围岩为闪长岩,介于上、下盘围岩是角岩和大理岩组成的变质岩带(李伟等, 2016)。鄂州市石膏矿主要与程潮铁矿伴生,现已探明硬石膏矿储量为 3752 万 t。区内主要矿产为硬石膏岩和铁矿,均呈脉状、透镜体状分布于花岗岩与大理岩接触带、花岗岩与角岩接触带、闪长岩与花岗岩接触带附近。矿区典型剖面如图 10 所示(宋许根等, 2018)。硬石膏矿主要发育于矿区的西段,已知的 13 个较大矿体中,又以 1 号、6 号、7 号、9 号及 10 号等五个矿体规模较大,是共生硬石膏的主体。

4 石膏应用

4.1 主要用途

石膏是一种用途广泛的工业材料和建筑材料。可用于水泥缓凝剂、石膏建筑制品、模型制作、医用食品添加剂、硫酸生产、纸张填料、油漆填料等(表 6)。

石膏主要应用于建材行业,是制造水泥、混凝

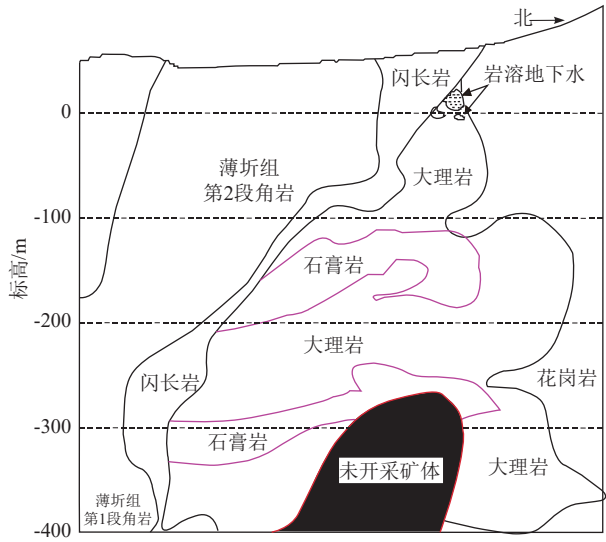


图 10 程潮矿区典型地质剖面图(据宋许根等, 2018)
Fig.10 Typical geological profile of Chengchao mining area
(after Song Xugen et al., 2018)

表 6 石膏主要用途 (据李逸晨, 2019)

Table 6 Main uses of gypsum (after Li Yichen, 2019)	
应用领域	主要用途
建材工业	水泥添加剂
	制造水泥
	作为添加剂或活性激发剂
胶凝材料	石膏及复合胶凝材料
建筑制品	石膏隔墙板复合内板、墙体砌块、空心条板、石膏砖
	装饰石膏板、装饰制品、石膏陶瓷制品
	墙体覆面板、天花板
	粉刷石膏、自流平地面石膏、粘结石膏
	石膏刮墙腻子、石膏嵌缝腻子
化学工业	硫酸联产水泥、油漆腻子及填充料、硫酸氨化肥
	农业
	水稻施肥、改良盐碱土
	工业模具
	精密制造模具、金银饰品及铝合金模具
医药	石膏固定装置
	中药
艺术模型	建筑艺术中装饰工艺
其他	填料、日用化工、轻工食品工业、饲料添加剂

土等建筑材料的原料之一。石膏可用于生产建筑石膏,石膏板和砌块(Jia et al., 2021; Sultana et al., 2022)。它具有能耗低、性价比高、耐火性好、隔热隔音高效等优点(Fantilli et al., 2021; Li et al., 2023),在适当的制备过程中可循环利用。石膏具有很低的导热率和良好的胶结性,在水泥工业中作为缓凝剂和重要的水泥添加剂,有效地控制凝固时间,防止快速凝固,同时还可以改善强度和抗冻性。在化

学工业中可以用来制作硫酸、硫酸铵化肥原料。在医学方面,石膏对体温调节中枢和发汗中枢有一定的抑制作用,因此可以作为解热药用,徐富业教授应用石膏治疗外感高热经验摘要中就有使用石膏治疗外感高热的(黄彬, 2005)。石膏也具有镇痉、抗渗、抗过敏、抗炎的作用。因石膏具有良好的胶凝性,还常用于骨科治疗的固定材料(杨辉, 2022)。石膏及其制品的微孔结构和加热脱水的特性,使得它具有良好的隔音、保温、防火等特性。这在建筑和生物医学用途中尤其广泛,如作为绝缘板和骨植入物(Gao et al., 2021)。

在装饰方面也用途广泛,它具有防火、防潮、隔音、隔热、抗老化、防蛀、防腐、轻质高强等性能,产品光亮洁白,包括高强、防潮、吸音、防辐射。防火又具有环保功能的石膏装饰板、石膏线条、灯盘、门柱、门窗拱眉等装饰制品。石膏在造纸、橡胶、油漆、塑料、纺织、化工工业中用作填料。在生活上用作制豆腐的添加剂,其他用做粉笔、雕塑、美术工艺品等。

在农业上,被用作肥料、脱盐剂和土壤 pH 校正剂。当用作土壤改良剂时,石膏和硬石膏可以产生有益的效果。它们降低含盐土壤的盐度,改善黏土的渗透性,并提供硫、钙和催化支持,从而减少肥料的使用,最大限度地提高作物生产的经济效益。

在工业模具方面,石膏可以用作精密制造模具、金银饰品及铝合金模具,飞机、汽车、机床工业中高标准的模具和日用陶瓷模具、高级卫生陶瓷模具(李逸晨, 2019)。

加强石膏深加工工艺及其产品的应用能缓解中国石膏开发利用程度低的问题,石膏深加工产品有超高强石膏、石膏超细粉和硫酸钙晶须等。超高强石膏材料主要应用于石膏陶瓷母模、精密铸造、工艺美术品和玩具制造、永久建筑模板、装饰板、隔离板以及塑料制品的吸塑模具等方面(段庆奎等, 2001; 李爱玲, 2004; 张凡凡等, 2017)。硫酸钙晶须大规模应用到橡胶、塑料、催化剂以及耐磨材料中,显著提高材料的抗张强度和弹性模量,也能代替石棉(石棉毒性大)用于摩擦材料、建筑材料、密封材料、保温材料等方面。石膏超细粉可作塑料和橡胶的填料,改善高聚物的机械强度、耐热性及变形性,也可作为造纸的白色涂料,

改善纸张质量。

4.2 工业副产石膏应用

对工业副产石膏综合利用不仅可以节约用于填埋的土地资源,有效控制二次污染,也使资源得到了充分的利用。中国对于工业副产石膏利用研究起步较晚,且多为低端利用,低于国际上欧美、日本等地区的石膏利用率。对工业石膏资源利用化提供了更高的要求。工业副产石膏包括脱硫石膏、磷石膏、钛石膏、氟石膏、柠檬石膏等,其中脱硫石膏和磷石膏产量占工业副产石膏总产量的 80% 以上。以下主要介绍磷石膏和脱硫石膏的应用。

磷石膏约占工业副产石膏总产量的 40%, 是工业副产石膏回收处理的重点。2022 年中国磷石膏产量约为 75.1 Mt, 综合利用量为 36 Mt, 综合利用率为 47.9%, 从 2010—2022 年中国磷石膏产量、利用情况及预测图(图 11)可以看出, 由于近年来中国相关产业和环保政策的影响, 综合利用率有了一定的增长(李逸晨, 2019)。Zhou et al.(2020)进行了一项实验研究, 旨在仅使用磷石膏作为原料生产纸和无纤维石膏板, 最终的石膏板具有高的本体密度和高的机械强度, 有潜力成为一种具有良好防火性、成本效益、环保性的新型墙体材料。Mesić et al.(2016)发现 PG 对土壤、水和植物具有有益的影响。Xiao et al.(2022)针对如何从磷石膏中回收石

膏进行了研究。结果表明, 从磷石膏中可以得到纯度为 99% 的石膏, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的回收率达到 80%, 白度为 37.05。该石膏可作为生产 α -半水高强石膏或 β -半水建筑石膏的优质原料。

根据 2010—2019 年脱硫石膏产量和利用情况图(图 12), 可以知道自从 2013 年以来中国脱硫石膏利用率一直在 75% 以上, 2018 年产量为 72 Mt, 利用量为 57.9 Mt, 利用率为近十年来最高的一年, 为 80.5%, 2019 年产量为 71.5 Mt, 利用量为 54.4 Mt, 利用率为 76.1%。作为辅助材料或代替天然石膏, 可广泛用于混凝土、防水材料、水泥缓凝剂、墙体、胶凝材料、路基回填等(Pedreno-Rojas et al., 2020; Liu et al., 2021)。脱硫石膏与天然石膏在物理性质、化学性质和矿物组成方面都相近, 脱硫石膏能够代替天然石膏用作水泥缓凝剂, 适宜掺量可提高水泥的抗压、抗折强度(郭大江等, 2010)。脱硫石膏最重要的特性之一是其高纯度。脱硫石膏的纯度通常超过 90% 天然石膏, 杂质极少。这种高纯度使得脱硫石膏非常适合用于各种制造工艺, 例如水泥和墙板的生产(Maiti et al., 2023)。它可以用于农业和土壤, 作为优质硫和钙资源的来源, 有利于提高植物产量(Tao et al., 2019)和改善土壤盐度(Wang et al., 2021)。利用烟气脱硫石膏合成高附加值材料也是当前研究热点之一。主要合成材料

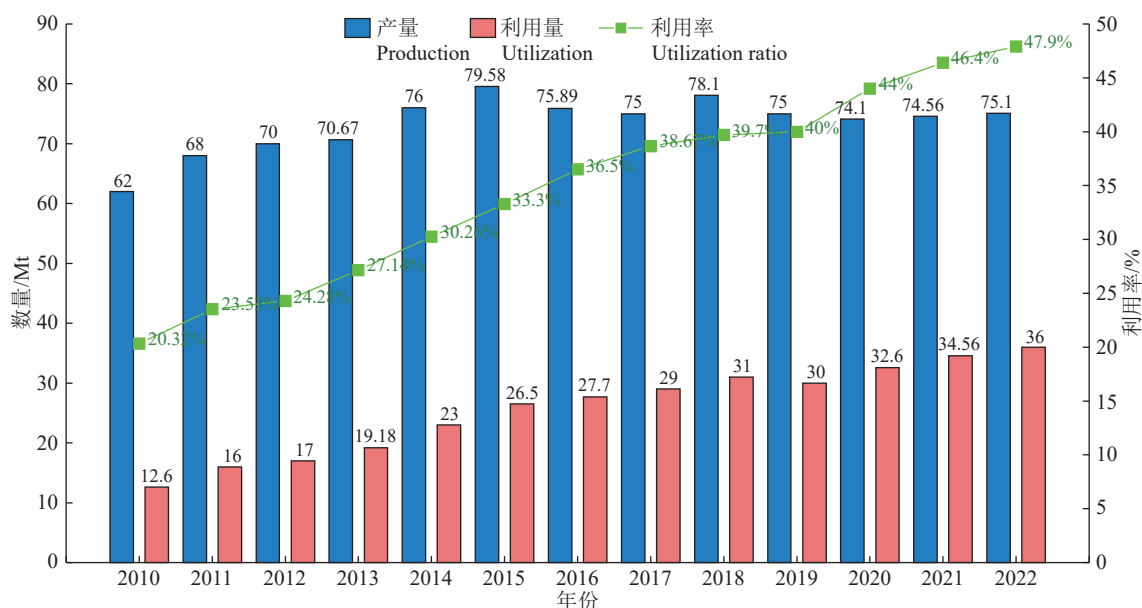


图 11 2010—2022 年中国磷石膏排放和利用情况(据杨再银, 2021)

Fig.11 Emission and utilization of phosphogypsum in China from 2010 to 2022 (after Yang Zaiyin, 2021)



图 12 2010—2019 年中国烟气脱硫石膏排放和利用情况

Fig.12 Emission and utilization of FGD gypsum in China from 2010 to 2019

有 α -半水石膏二水合物、碳酸钙、吸附材料和复合材料(Wang et al., 2019; Yang et al., 2019)。合成材料是实现烟气脱硫石膏高值利用的有效途径。但大多处于实验室规模,工业化生产规模相对较小,因此无法实现脱硫石膏的大规模利用(Liu et al., 2021)。

5 石膏产业现状及找矿利用前景

5.1 石膏产业现状

2022 年,中国石膏进口金额为 5859.43 万美元,出口金额为 3071.72 万美元。根据 2016—2022 年海关总署石膏进出口相关数据(图 13),中国石膏产业进口量大致呈上升趋势,出口量大致呈下降趋势,持续处于贸易逆差状态,表明中国生产的石膏基本为国内所用,说明中国对石膏的需求量在增大,而且对外依存度也在增加,因此要进一步加大找矿力度。

近几年来,随着石膏生产规模的不断扩大。到 2020 年末,已有 47.8 亿 m^2 的石膏板生产规模。另外,公司在石膏产业上的布局也在加快,石膏的生产项目也在陆续投产(表 7)。贵州磷化集团开迪绿色建筑材料有限公司生产的无水石膏项目于 2021 年 6 月 29 号正式投产。年生产无水石膏 30 万 t,年消耗 42 万 t 磷石膏。随着石膏生产项目

的增多,不仅会对天然石膏的需求量增加,也会促使工业副产石膏不断提升利用率,但是工业石膏本身存在的问题暂时无法解决,因此更需要对天然石膏进行合理利用。

5.2 沉积型矿床找矿利用前景

沉积型石膏矿床在中国占比较大,也是最具工业价值的一类矿床,并且其他类型石膏矿床工业利用价值不大,所以,本文仅对沉积型石膏矿床进行找矿利用前景分析。沉积型石膏矿床形成条件主要有:处于封闭、半封闭盆地中;干旱、半干旱的气候条件;充足的物质来源。在上述资源特征的基础上预测中国石膏矿的找矿远景。

中国石膏矿床分布十分广泛,海相沉积型石膏、硬石膏矿床主要分布于辽吉地区、华北地区、西北祁连山地区以及新疆、西藏、四川、云南、湖北、湖南、安徽、江苏及贵州、陕西等省(区);湖相石膏、硬石膏矿床主要分布于东部地区和西北地区,分布于山东、内蒙古、河北等省(区),受裂谷附近的断陷盆地控制,产于古近系—新近系杂色碎屑岩含膏建造中(覃志安和李俊建, 2005)。勘查工作已发现的特大型、大中型矿床主要位于祁连成矿带、天山—北山成矿带、西昆仑—阿尔金成矿带、晋冀成矿区、上扬子东缘、西缘成矿带、长江中下游成矿带,主要分布于山东、湖北、安徽以及湖南。

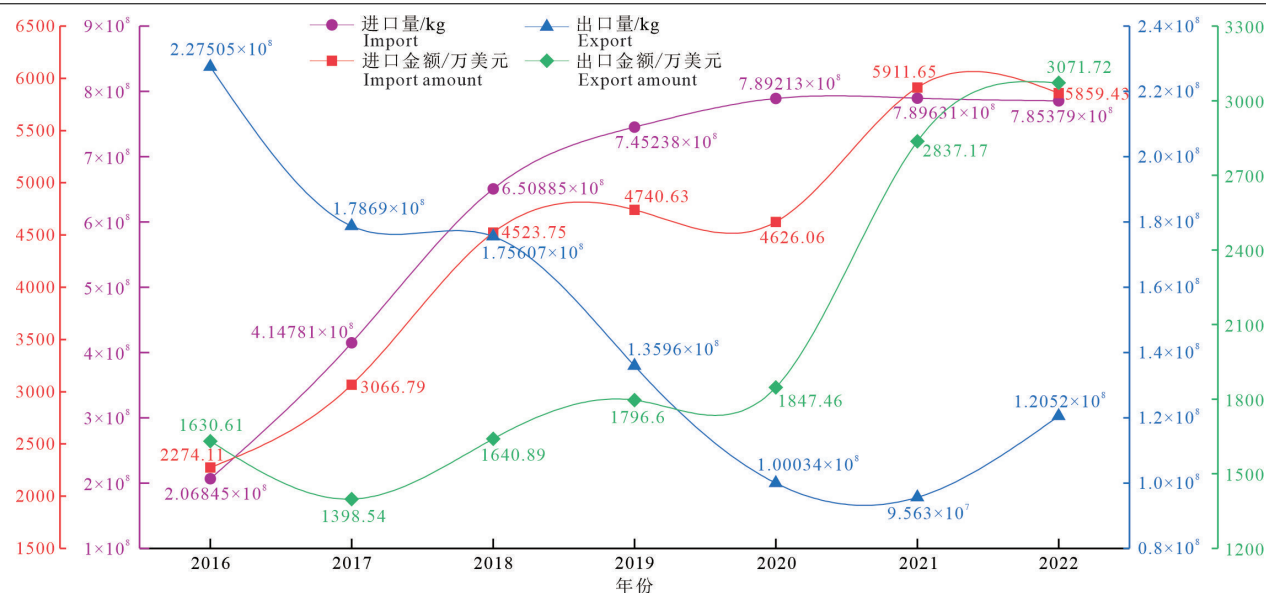


图 13 中国石膏进出口相关数据(据中国海关总署)

Fig.13 Relevant data of gypsum import and export in China (according to the General Administration of Customs of China)

表 7 中国石膏产业主要企业产能

Table 7 Production capacity of major enterprises in Chinese gypsum industry

企业	产品种类	产能
贵州磷化集团(开迪绿色建筑材料有限公司)	无水石膏	30万t/年
北新建材	石膏板	28.24亿m ² /年
东方雨虹	抹灰石击、自流平石膏、嵌缝石膏等	3万t/年
德国必优集团(山东泰阳建材有限公司)	轻质抹灰石膏	20万t/年
宁国恒基伟业建材有限公司	纸面石膏板	4000万m ² /年
圣戈班石膏建材(上海)有限公司	石膏粉	145万t/年
	β半水石膏粉	70万t/年
云南铤淦科技有限公司	石膏砂浆	40万t/年
	石膏砌块	50万m ² /年
	石膏条板	50万m ² /年
瓮福紫金公司	石膏粉	20万t/年
聚义集团(晋宝灵石膏制品有限公司)	天然石膏粉	30万t/年
泰山石膏有限公司	纸面石膏板	20亿m ² /年
三泰控股	磷石膏	200万t/年

其中,大部分山东石膏矿产出于寒武纪、奥陶纪和古近纪,又以古近纪石膏矿石质量最好,古近纪的含膏盆地多被开发利用,主要矿物是石膏,少见硬石膏。山东地区侏罗纪—白垩纪为陆相干旱气候,至始新世早期,干旱气候加剧,成矿物质不断沉淀。晚白垩世以来,鲁西地区以断块隆起为主,兼有隆中有陷,形成一系列内陆断陷盆地。盆地内部沉积构造作用下,形成次一级洼地,为矿床沉积提供良好条件。因此,从成矿时代、气候、构造条件角度分析,在山东,古近纪的内陆断陷盆地是寻找湖相沉积矿床的远景区。

海相碳酸盐岩型石膏矿床的生成严格地受控于地质构造。中奥陶世时山西地区处于陆缘海环境,曾多次发生自北而南的海侵。当海水退却时,西南部的潮上带处于干燥炎热环境,形成了萨勃哈相的石膏沉积(陈国芳和谢飞跃, 2007)。山西省西南部中奥陶世的构造凹陷地带有利于石膏的寻找。在东北地区找矿中,下寒武统馒头组与碱厂组地层发育,岩性以砖红色白云质泥岩、紫红色泥质白云岩、灰色含膏白云岩为主,断裂与褶皱构造不发育,且埋深较深的地区具有石膏找矿前景(吴贇, 2019)。中国华北和东北南部寒武纪海区具块体大

而相对稳定的陆表浅海边缘台地特征。成膏盆地大地构造位置均处于中朝准地台内部拗陷区,如辽东太子河复式向斜中的辽阳凹陷、本溪凹陷、大套峪凹陷、吉林浑江凹陷和柳海辉凹陷,以及具有成矿远景的辽西凹陷和辽南凹陷(罗大有, 1985)。华北一些地区下寒武统馒头组中,以及与太子河区碱厂组相当的层位,如朱砂洞组(河南鲁山、河南袁家庄)、猴家山组(苏北徐州)中,也相继发现了海相蒸发岩层,提供了寻找石膏的依据。长江中下游地区建南、利川、恩施、远安、蒲圻、黄石、贵池、南京无为和常州等 9 个膏盆,皆发现含膏层位,其共同特点是埋藏较浅,而厚度较大,质量较佳。这些含膏盆地都是今后找矿的主要方向(白寿昌, 1984)。湘中地区冷水江盆地、隆回盆地和双峰盆地是有丰富储量的石膏盆地(刘卫红等, 1993)。

6 结论

(1) 中国石膏矿床(点)分布在山东、湖南、湖北、四川和宁夏等地,其中山东石膏矿床分布数量最多。2022 年石膏保有储量为 17.58 亿 t,其中安徽最多,山东、四川、云南和湖北储量也比较丰富。按区域,华东地区储量最高,华北地区石膏资源较缺乏。世界石膏矿床主要分布在二叠系和三叠系。中国储量位居第一,美国、巴西和加拿大储量丰富。2022 年全球石膏矿山产量丰富国家有美国、伊朗、中国、阿曼以及西班牙。

(2) 根据石膏矿床成因,可以把石膏、硬石膏矿床可以分为沉积型、后生型和热液交代型,其中沉积型最为重要,可以分为海相沉积型石膏矿床和湖相沉积型石膏矿床。沉积型石膏矿床受到气候、物源和构造决定。海相沉积矿床的形成年代为早、中三叠世及之前,从侏罗纪至第四纪多为湖相沉积矿床。

(3) 石膏应用广泛,在建筑、医学、装饰、化工、农业和其他方面都有应用,还可以加工为超高强材料,用作石膏晶须,制备超细粉,对工业副产石膏的应用特别是磷石膏和烟气脱硫石膏的应用也有利于缓解中国优质石膏资源紧缺。

(4) 特大型、大中型矿床主要分布于山东、湖北、安徽以及湖南,主要位于祁连成矿带、天山—北山成矿带、西昆仑—阿尔金成矿带、晋冀成矿区、

上扬子东缘、西缘成矿带、长江中下游成矿带。古近纪的内陆断陷盆地是寻找山东地区湖相沉积矿床的远景区。

References

- Bai Shouchang. 1984. Triassic gypsum prospecting direction in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Non-metallic Mines*, (4): 1–4 (in Chinese).
- Bain R J. 1990. Diagenetic, nonevaporative origin for gypsum[J]. *Geology*, 18(5): 447–450.
- Charola A E, Pühringer J, Steiger M. 2007. Gypsum: A review of its role in the deterioration of building materials[J]. *Environmental Geology*, 52: 339–352.
- Chen Guofang, Xie Feiyue. 2007. Discussion on genesis of gypsum deposit in Xishan, Taiyuan[J]. *Taiyuan Science and Technology*, (10): 77–78 (in Chinese).
- Deng Yangyang, Chen Congxin, Xia Kaizong, Zheng Xianwei. 2019. Cause analysis of surface collapse in western Chengchao Iron Mine[J]. *Journal of Rock and Soil Mechanics*, 40(2): 743–758 (in Chinese with English abstract).
- Dong Bin. 1990. Brief analysis of hydrogeological conditions and their effects in the Wutong gypsum mining area, Shimen County[J]. *Hunan Geology*, 9(2): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Duan Qingkui, Dong Wenliang, Wang Huiqin, Wang Liming. 2001. Research and development of α -type ultra-high strength gypsum (K-type gypsum)[J]. *Non-metallic Mines*, (3): 26–27 (in Chinese).
- Fang Ming, Yang Zaixi, Xu Jialin, Leng Fangrui. 2022. Geological characteristics of gypsum ore in Yingcheng Paste mining area, Hubei Province[J]. *Chinese Science and Technology Journal Database (Full-text Edition) Engineering and Technology*, (8): 65–68 (in Chinese with English abstract).
- Fantilli A P, Jóźwiak-Niedźwiedźka D, Denis P. 2021. Bio-fibres as a reinforcement of gypsum composites[J]. *Materials*, 14(17): 4830.
- Gao K, Wang F, Zhang M, Zhang J, Jiao D, Xu Q, Guan J, Zhang X, Liu Z, Zhang Z. 2021. High-strength and multi-functional gypsum with unidirectionally porous architecture mimicking wood[J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 7: 100114.
- Gong Daxing. 2016. The Triassic Salt-forming Environment, Potash-forming Conditions and Genetic Mechanism in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–152 (in Chinese with English abstract).
- Guan Shaozeng, Jiang Zonglong, Wei Dongyan, Yang Liping, Xuan Zhiqiang, Chen Yancheng, Cui Tianxiu, Liu Zhenmin, Deng Xiaolin, Yin Xuemin. 1996. Plate tectonics and salt minerals in China[J]. *Chemical Mineral Geology*, 18(2): 2–10 (in Chinese with English abstract).
- Guo Dajiang, Yuan Yunfa, Hu Haoran, Zhang Bing. 2010. Properties of desulfurized gypsum and its application in Portland cement[J]. *Bulletin of Silicate*, 29(2): 357–360 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Hao Rui'e, Xing Xiangfen, Peng Mingzhang, Zhu Limin, Du Xiaoliang, Liu Haiyan, Li Xiaojing, Wang Meng. 2023. Analysis of engineering geological conditions in Dawenkou Gypsum mine, Shandong Province[J]. *Coal Geology of China*, 35(8): 17–25 (in Chinese with English abstract).
- Hua Zhixin. 2018. Distribution of gypsum deposits and analysis of typical deposits in China[J]. *Natural Science (Abstract Edition)*, (2): 222–223 (in Chinese).
- Huang Bin. 2005. Experience of Professor Xu Fuye in treating exogenous hyperthermia with gypsum[J]. *Chinese Journal of Emergency Medicine*, (9): 868 (in Chinese).
- Jia R, Wang Q, Feng P. 2021. A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field[J]. *Composites Part B: Engineering*, 205: 108540.
- Jiang Chunzhi, Dong Fengzhi. 2016. Comprehensive utilization and research progress of industrial by-product gypsum[J]. *Shandong Chemical Industry*, 45(9): 42–44,47 (in Chinese with English abstract).
- Lai Ruijuan. 2017. Geochemical Characteristics and Development Mechanism of Gypsum (Rock) Minerals in the Jinding Baicaofao Strontium Deposit, Lanping, Northwest Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1–109 (in Chinese with English abstract).
- Li Ailing. 2004 Research progress on the development and utilization of Run-gypsum[J]. *Mineral Resources and Geology*, (5): 498–501 (in Chinese with English abstract).
- Li Qilin, Zhang Xiaolin, Li Zuowu, Zhang Lei. 2022. Geological characteristics and genetic analysis of Kuerchu gypsum mine in Xinjiang[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (4): 53–57 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Gui Qing, Zhu Qiaoqiao, Zheng Xianwei, Zhang Zhiyuan, Han Yingxiao. 2016. Multiple episodes of mineralization in the Chengchao iron deposit, southeastern Hubei: Evidence from magnetite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 471–492 (in Chinese with English abstract).
- Li Yichen. 2019. Development status and trend of gypsum industry[J]. *Sulfuric Acid Industry*, (11): 1–7,13 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Wang X, Yan W L, Ding L N, Liu J X, Wu Z S, Huang H. 2023. Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with basalt, glass, and PVA fibers[J]. *Journal of Building Engineering*, 64: 105640.
- Liu Chenglin, Xuan Zhiqiang, Cao Yangtong, Wang Licheng, Wang Chunlian, Zhao Yanjun, Zhang Hua. 2015. Exploration for potassium in the Chinese landmass: potassic formation and model in the East Tethys Domain of China[J]. *Chemical and Mineral Geology*, (4): 193–197 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Tan X, Li Y, Cao J, Luo B. 2018. Occurrence and conceptual sedimentary model of Cambrian gypsum-bearing evaporites in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 9: 1179–1191.
- Liu S, Liu W, Jiao F, Qin W Q, Yang C R. 2021. Production and resource utilization of flue gas desulfurized gypsum in China: A review[J]. *Environmental Pollution*, (5): 117799.
- Liu Weihong, Li Xiangxi, Zhang Ying. 1993. An approach to the controlling factors of the carboniferous gypsum deposits in central Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 13(4): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiao, Liu Chaoyang, Fan Tianjia, Zhang Xiuyun, Weng Hongbo, Zhang Huan. 2020. Geological characteristics and genesis of the Yuanjiazhuang gypsum deposit, Henan Province[J]. *China Industrial Minerals Journal*, (3): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhicheng. 1983. Genetic types of gypsum deposits in China[J]. *Geological Review*, 29(5): 457 (in Chinese).
- Luo Dayou. 1985. Cambrian gypsum deposit in Liaoji Marine Deposit[J]. *Mineral Deposit Geology*, 4(3): 85–94 (in Chinese with English abstract).
- Luo Shuwen, Li Po, Chen Weihai, Wei Yuelong, Ouyang Zhihong, Deng Yadong, Qin Xingming. 2019. Phylogenetic mechanism and evolution of Shuanghe Karst Cave in Suiyang, Guizhou[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 36(1): 111–118,144 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xianhe, Gao Tingchen, Chen Junkui, Chen Ruibao, Cheng Xingguo, Hu Xiaochuan, Cai Zhongming. 2011. Geological characteristics of gypsum deposit and its indicative significance for sulfide deposit[J]. *Chinese Journal of Geology*, 35(1): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- Maiti S, Jain N, Malik J, Baliyan A. 2023. Light weight plasters containing vermiculite and FGD gypsum for sustainable and energy efficient building construction materials[J]. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 104(3): 603–614.
- Ma Zhiqiang. 2000. Development and utilization of gypsum resources in Ningxia[J]. *China Non-Metallic Mineral Industry Guide*, (6): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- Mesić M, Brezinščak L, Zgorelec Ž, Perčin A, Šestak I, Bilandžija D, Trdenić M, Lisac H. 2016. The application of phosphogypsum in agriculture[J]. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(1): 7–13.
- Pedreño-Rojas M A, Fořt J, Černý R. 2020. Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context[J]. *Journal of Cleaner Production*, 253: 120056.
- Pei Yongwan, Lu Jie. 2007. Geological characteristics of Tokioling gypsum deposit in Liaoyang City[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (4): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- Qin Shouping, Gao Mingbo, Zhu Guoqing, Chen Zhiqiang, Qin Wenjing. 2008. Geological characteristics and genetic analysis of Wujiaxinzhuang gypsum mine in Wenkou Basin, Taian[J]. *Shandong Land and Resources*, 24(4): 29–32 (in Chinese with English abstract).
- Qin Zhi'an, Li Junjian. 2005. Geological characteristics of the Non-

- metal ore deposits in Circum-Bohai-Sea Region[J]. *Geological Survey and Research*, 28(4): 265–271 (in Chinese with English abstract).
- Schmalz R F. 1969. Deep-water evaporite deposition: A genetic model[J]. *AAPG Bulletin*, 53(4): 798–823.
- Shi Houli, Zhang Peng, Jiang Yunyun. 2016. Geochemical characteristics of evaporite in Dawenkou Basin, Shandong Province and its indication for potassium discovery[J]. *Shandong Land and Resources*, 32(6): 41–45 (in Chinese with English abstract).
- Song Chenzhen. 2009. Characteristics of carbonate rocks and gypsum prospecting in Tonkin Ling Gypsum deposit, Liaoning Province[J]. *Liaoning Building Materials*, (5): 13–14 (in Chinese).
- Song Xugen, Liu Xiumin, Chen Congxin, Zheng Xianwei, Xia Kaizong, Yang Kuoyu, Chen Shan. 2018. Preliminary study on surface subsidence mechanism and deformation law of goaf in western mining area of Chengchao Iron Mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(A2): 4262–4273 (in Chinese with English abstract).
- Sultana R, Rashedi A, Khanam T, Jeong B, Hosseinzadeh-Bandbafha H, Hussain M. 2022. Life cycle environmental sustainability and energy assessment of timber wall construction: A comprehensive overview[J]. *Sustainability*, 14(7): 4161.
- Tao Weiping. 1983. Triassic gypsum deposit in Marine deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 172–183 (in Chinese with English abstract).
- Tao J, Wu L, Liu X, Zhang H, Xu Y, Gu W, Li Y. 2019. Effects of continuous application flue-gas desulfurization gypsum and brackish ice on soil chemical properties and maize growth in a saline soil in coastal area of China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 65(1): 82–89.
- Wang B, Pan Z, Du Z, Cheng H, Cheng F. 2019. Effect of impure components in flue gas desulfurization (FGD) gypsum on the generation of polymorph CaCO_3 during carbonation reaction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 369: 236–243.
- Wang Wenkai, Xu Guoming, Song Xiaobo, Long Ke, Chen Ying. 2017. Origin of gypsum salt and its oil-gas significance in Minikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 44(6): 697–707 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Wang Z, Liang F, Liang F, Jing X, Feng W. 2021. Application of flue gas desulfurization gypsum improves multiple functions of saline-sodic soils across China[J]. *Chemosphere*, 277: 130345.
- Wang Yanting, Liu Yankui, Wang Dong, Yu Chao. 2014. Geological characteristics and genetic analysis of Wangzhuang Section of Dawenkou Gypsum mine, Tai'an[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (5): 42–44, 62 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziju, Li Qiang, Li Zongcheng. 2003. Mineral product demand prediction and development suggestions for gypsum mineral resource potential evaluation in Dawenkou Basin, Tai'an City, Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, (5): 23–25 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98: 217–268.
- Warren J K. 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*[M]. Switzerland: Springer.
- Wen Huaguo, Huo Fei, Guo Pei, Ning Meng, Liang Jintong, Zhong Yijiang, Su Zhongtang, Xu Wenli, Liu Sibing, Wen Longbin, Jiang Huachuan. 2021. Research progress and prospect of dolomite-evaporite symbiotic system[J]. *Journal of Sedimentology*, 39(6): 1321–1343 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yun. 2019. Geological Characteristics, Genesis and Metallogenic Prediction of the Gypsum Deposits in Liaoning Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–105 (in Chinese with English abstract).
- Xiao J, Lu T, Zhuang Y, Jin H. 2022. A novel process to recover gypsum from phosphogypsum[J]. *Materials*, 15(5): 1944.
- Xie F Q, Wu Q H, Wang L D, Shi Z X, Zhang C, Liu B, Wang C, Shu Z X, Di H. 2019. Passive continental margin basins and the controls on the formation of evaporites: A case study of the Gulf of Mexico Basin[J]. *Carbonates & Evaporites*, 34(2): 405–418.
- Xie F Q, Sun Y H, Wu J Z, Jia W J. 2021. Nature and formation of evaporites in the passive continental margin period of the Sichuan Basin, China: a review[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(14): 1–13.
- Xie Lili, Meng Fanwei, Zhuo Qigong, Zhang Guoquan. 2023. Geochemical characteristics and genesis of lithic salt in Dawenkou Basin, Shandong Province[J]. *Salt Lake Research*, 31(3): 59–68 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingguo, Xiong Changquan. 1987. Preliminary analysis on preservation and hydration conditions of Lower Middle Triassic gypsum deposit in eastern Sichuan[J]. *Building Materials Geology*, (2): 20–24 (in Chinese).
- Xue Ping. 1985. Study on some metallogenic regularity of Middle Ordovician gypsum deposit in North China[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (4): 26–31, 16 (in Chinese).
- Xue Wu. 1986. Preliminary study on the spatiotemporal distribution and metallogenic characteristics of gypsum minerals in China[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (4): 31–35 (in Chinese).
- Yang B, Dong Y, Wang B N, Yang M M, Yang C J. 2019. A mild alcohol-salt route to synthesize α -hemihydrate gypsum microrods from flue gas desulfurization gypsum in large scale[J]. *Materials Research Express*, 6(4): 045507.
- Yang Hui. 2022. Functions and research progress of common pharmaceutical nonmetallic minerals[J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, (4): 1–3, 7 (in Chinese).
- Yang Zaiyin. 2021. Utilization status of industrial by-product gypsum in China and prospects for the 14th Five-Year Plan[J]. *Sulfuric*

- Acid Industry, (7): 1–4,23 (in Chinese).
- Yin T T, Li S J. 2022. Application of sulfur isotopes for analyzing the sedimentary environment of evaporite in low-altitude intermountain basins: A case study on the Kumishi basin, Northwest China[J]. Carbonates & Evaporites, 37(1): 1–13.
- Zhang Fanfan, Chen Chao, Zhang Xixing, Xiang Lixue. 2017. Performance characteristics and application analysis of gypsum from different sources[J]. Inorganic Salt Industry, 49(8): 10–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianqiang, Zhang Huan. 2018. Geological characteristics and metallogenic regularity of gypsum deposits in Liaoyang Basin, Liaoning Province[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, (1): 47–50 (in Chinese).
- Zhang Shaoyun, Zhou Zhongfa, Tian Zhonghui. 2017. Environmental significance of water chemical characteristics of gypsum geode under paste salt layer[J]. Science Technology and Engineering, 17(16): 13–20 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Tao. 2013. Status quo of gypsum mineral resources in China[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, (23): 115 (in Chinese).
- Zheng Tao, Wen Canguo. 2013. Metallogenic analysis of Cambrian gypsum in Northeast China[J]. Private Science and Technology, (9): 35 (in Chinese).
- Zheng Ximin, Yang Liu, Yi Dinghong, Wang Pu. 2019. Paleogene gypsum and its sulfur isotope distribution in western Qaidam Basin[J]. Sedimentary and Tethian Geology, 39(4): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J, Li X, Zhao Y, Shu Z, Wang Y, Zhang Y, Shen X. 2020. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum[J]. Construction and Building Materials, 243: 118091.
- Zhu Meng. 2015. Discussion on geological origin of salt deposits in Dawenkou Basin, Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 31(1): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 白寿昌. 1984. 长江中下游三叠纪石膏找矿方向[J]. 非金属矿, (4): 1–4.
- 陈国芳, 谢飞跃. 2007. 太原西山石膏矿床成因探讨[J]. 太原科技, (10): 77–78.
- 邓洋洋, 陈从新, 夏开宗, 郑先伟. 2019. 程潮铁矿西区地表塌陷成因分析[J]. 岩土力学, 40(2): 743–758.
- 董斌. 1990. 石门县上五通石膏矿区水文地质条件及其作用浅析[J]. 湖南地质, 9(2): 62–67.
- 段庆奎, 董文亮, 王惠琴, 王立明. 2001. α 型超高强石膏(K型石膏)研究与开发[J]. 非金属矿, (3): 26–27.
- 方明, 杨载熙, 徐加林, 冷方睿. 2022. 湖北省应城膏矿区石膏矿地质特征[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, (8): 65–68.
- 龚大兴. 2016. 四川盆地三叠纪成盐环境、成钾条件及成因机制[D]. 成都: 成都理工大学, 1–152.
- 关绍曾, 江宗龙, 魏东岩, 杨流平, 宣之强, 陈延成, 崔天秀, 刘振敏, 邓小林, 尹学敏. 1996. 中国板块构造与盐类矿产[J]. 化工矿产地质, 18(2): 2–10.
- 郭大江, 袁运法, 胡浩然, 张冰. 2010. 脱硫石膏性能研究及其在普通硅酸盐水泥中的应用[J]. 硅酸盐通报, 29(2): 357–360.
- 郝瑞娥, 邢香粉, 彭明章, 朱礼敏, 杜小亮, 刘海燕, 李晓静, 王猛. 2023. 山东大汶口石膏矿区工程地质条件分析[J]. 中国煤炭地质, 35(8): 17–25.
- 化志新. 2018. 中国石膏矿分布规律及典型矿床分析[J]. 自然科学(文摘版), (2): 222–223.
- 黄彬. 2005. 徐富业教授应用石膏治疗外感高热经验摘要[J]. 中国中医急症杂志, (9): 868.
- 姜春志, 董凤芝. 2016. 工业副产石膏的综合利用及研究进展[J]. 山东化工, 45(9): 42–44,47.
- 来瑞娟. 2017. 滇西北兰坪金顶白草坪锑矿床石膏(岩)矿物地球化学特征及发育机制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1–109.
- 李爱玲. 2004. 天然石膏及其开发利用研究进展[J]. 矿产与地质, 18(5): 498–501.
- 李奇林, 张小林, 李作武, 张磊. 2022. 新疆库尔楚石膏矿地质特征及成因分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 53–57.
- 李伟, 桂青, 朱乔乔, 郑先伟, 张志远, 韩颖霄. 2016. 鄂东南程潮铁矿多世代叠加成矿作用: 磁铁矿证据[J]. 岩石学报, 32(2): 471–492.
- 李逸晨. 2019. 石膏行业的发展现状及趋势[J]. 硫酸工业, (11): 1–7,13.
- 刘成林, 宣之强, 曹养同, 王立成, 王春连, 赵艳军, 张华. 2015. 探索中国陆块找钾—中国东特提斯域成钾作用及模式[J]. 化工矿产地质, (4): 193–197.
- 刘卫红, 李耀西, 张瑛. 1993. 湘中石炭纪石膏矿床的控制因素探讨[J]. 岩相古地理, 13(4): 12–18.
- 刘晓, 刘朝阳, 范天甲, 张秀云, 翁红波, 张焕. 2020. 河南袁家庄石膏矿床地质特征及成因[J]. 中国非金属矿工业导刊, (3): 37–41.
- 卢志诚. 1983. 中国石膏矿床成因类型[J]. 地质论评, 29(5): 457.
- 罗大有. 1985. 辽吉海积寒武纪石膏矿床[J]. 矿床地质, 4(3): 85–94.
- 罗书文, 李坡, 陈伟海, 韦跃龙, 欧阳志宏, 邓亚东, 覃星铭. 2019. 贵州绥阳双河溶洞系统发育机理与演化研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 36(1): 111–118,144.
- 吕宪河, 高廷臣, 陈俊魁, 陈瑞宝, 程兴国, 胡小川, 蔡仲明. 2011. 石膏矿床的地质特征及对硫化矿床的指示意义[J]. 地质学报, 35(1): 11–14.
- 马智强. 2000. 宁夏石膏资源开发利用[J]. 中国非金属矿工业导刊, (6): 31–34.
- 裴永万, 芦杰. 2007. 辽阳市东京陵石膏矿床地质特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 59–62.
- 秦守萍, 高明波, 朱国庆, 陈志强, 秦文静. 2008. 泰安汶口盆地吴家新庄石膏矿地质特征及成因分析[J]. 山东国土资源, 24(4): 29–32.
- 覃志安, 李俊建. 2005. 环渤海地区非金属矿地质特征[J]. 地质调查与研究, 28(4): 265–271.
- 石厚礼, 张鹏, 姜赞赞. 2016. 山东省大汶口盆地蒸发岩地球化学特征及找钾标志[J]. 山东国土资源, 32(6): 41–45.

- 宋春振. 2009. 辽宁东京陵石膏矿床碳酸盐岩特征与石膏找矿[J]. [辽宁建材](#), (5): 13-14.
- 宋许根, 刘秀敏, 陈从新, 郑先伟, 夏开宗, 杨括宇, 陈山. 2018. 程潮铁矿西区采空区地表塌陷机制与变形规律初探[J]. [岩石力学与工程学报](#), 37(A2): 4262-4273.
- 陶维屏. 1983. 中国海积三叠纪石膏矿床[J]. [地质学报](#), (2): 172-183.
- 王文楷, 许国明, 宋晓波, 隆轲, 陈颖. 2017. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及其油气地质意义[J]. [成都理工大学学报\(自然科学版\)](#), 44(6): 697-707.
- 王艳婷, 刘彦奎, 王东, 于超. 2014. 泰安市大汶口石膏矿王庄矿段地质特征及成因分析[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (5): 42-44, 62.
- 王自具, 李强, 李宗成. 2003. 山东省泰安市大汶口盆地石膏矿资源潜力评价矿产品需求预测及开发建议[J]. [山东国土资源](#), (5): 23-25.
- 文华国, 霍飞, 郭佩, 甯濛, 梁金同, 钟怡江, 苏中堂, 徐文礼, 刘四兵, 温龙彬, 蒋华川. 2021. 白云岩—蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. [沉积学报](#), 39(6): 1321-1343.
- 吴赞. 2019. 辽宁省石膏矿地质特征、成因及成矿预测[D]. 长春: 吉林大学, 1-105.
- 谢丽丽, 孟凡巍, 卓勤功, 张国权. 2023. 山东大汶口盆地石盐地球化学特征及其成因[J]. [盐湖研究](#), 31(3): 59-68.
- 徐兴国, 熊昌铨. 1987. 川东下中三叠统石膏矿床的保存和水化条件初步分析[J]. [建材地质](#), (2): 20-24.
- 薛平. 1985. 华北中奥陶世石膏矿床的某些成矿规律研究[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (4): 26-31, 16.
- 薛武. 1986. 我国石膏矿产时空分布概况及成矿特点初探[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (4): 31-35.
- 杨辉. 2022. 常见药用非金属矿物的功能及研究进展[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (4): 1-3, 7.
- 杨再银. 2021. 中国工业副产石膏利用现状及“十四五”展望[J]. [硫酸工业](#), (7): 1-4, 23.
- 张凡凡, 陈超, 张西兴, 相利学. 2017. 不同来源石膏的性能特点与应用分析[J]. [无机盐工业](#), 49(8): 10-13.
- 张连强, 张欢. 2018. 辽宁省辽阳盆地石膏矿地质特征及成矿规律[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (1): 47-50.
- 张绍云, 周忠发, 田衷琿. 2017. 膏盐层下石膏晶洞水化学特征的环境指示意义[J]. [科学技术与工程](#), 17(16): 13-20.
- 郑涛. 2013. 中国石膏矿产资源现状[J]. [黑龙江科技信息](#), (23): 115.
- 郑涛, 文灿国. 2013. 东北寒武纪石膏成矿分析[J]. [民营科技](#), (9): 35.
- 郑希民, 杨柳, 易定红, 王朴. 2019. 柴达木盆地西部古近系石膏及其硫同位素分布特征[J]. [沉积与特提斯地质](#), 39(4): 65-70.
- 朱猛. 2015. 山东省大汶口盆地盐类矿床的地质成因探讨[J]. [山东国土资源](#), 31(1): 27-30.