

doi: 10.12029/gc20230516002

刘丽红, 韩淼, 田亚, 姜鹏鹏, 张岩, 姜磊, 刘亚雷. 2025. 白云岩矿的特征、成因类型、分布及开发利用价值[J]. 中国地质, 52(3): 932–944.

Liu Lihong, Han Miao, Tian Ya, Jiang Kunpeng, Zhang Yan, Jiang Lei, Liu Yalei. 2025. Characteristics, types, distributions and utilization value of dolomite deposit[J]. Geology in China, 52(3): 932–944(in Chinese with English abstract).

白云岩矿的特征、成因类型、分布及开发利用价值

刘丽红¹, 韩淼¹, 田亚¹, 姜鹏鹏¹, 张岩², 姜磊³, 刘亚雷¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 非常规油气重点实验室, 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:【研究目的】白云岩不仅可以作为良好的油气储层, 同时也是一种非常重要的非金属矿产。白云岩矿是冶炼金属镁的重要原材料。中国是全球最大的镁资源储量国, 也是全球第一的镁产量国, 因此, 镁资源也是重要的关键矿产资源。研究白云岩矿的特征、成因、分布及开发利用价值, 有利于保障国家关键矿产安全。【研究方法】通过搜集国内外相关文献, 系统总结了白云岩矿的特征、成因、分布以及开发利用价值。【研究结果】白云岩主要由白云石组成, 三方晶系, 常呈菱面体晶形。按照其成因类型, 白云岩可分为原生白云岩、成岩白云岩和后生白云岩。一般认为, 白云岩主要为交代成因, 并对原始灰岩结构有不同程度的保留, 并在不同期次的白云石化进程或胶结过程中遭到破坏。【结论】我国白云岩几乎在各个地质时代都有分布, 但绝大多数位于地下深处, 仅有部分出露地表, 满足矿山开采需求。白云岩在元古界和古生界分布最为广泛, 中生界和新生界仅在局部地区发育。白云岩可用作冶金溶剂($MgO \geq 15\%$)及耐火材料($MgO \geq 18\%$)、提炼金属镁($MgO \geq 19\%$)、制造水泥($MgO > 18\%$)和建筑材料、医药生产泻利盐、农用化肥($MgO > 20\%$)和饲料等, 是一种用途非常广泛的非金属矿产。中国白云岩矿产资源丰富, 冶金用白云岩矿产资源储量为 18.75 亿 t, 而白云岩矿也是冶炼金属镁的重要原材料。中国是全球最大的镁资源储量国, 占全球总储量的 20% 以上, 也是全球第一的镁产量国, 2022 年全国原镁产量为 89.36 万 t, 出口量突破 50 万 t, 因此, 镁资源也是重要的关键矿产资源。镁产业的快速发展也会增大对白云岩矿产资源的需求。

关键词: 白云岩矿; 矿物特点; 成因类型; 分布特征; 利用价值; 矿产勘查工程

创 新 点: (1) 白云岩往往作为油气储层开展研究, 而作为非金属矿产的研究则相对较少, 本文系统研究了白云石作为非金属矿产的特点、成因类型、分布及其开发利用价值; (2) 对白云岩矿的发展前景进行了展望。白云岩矿是冶炼金属镁的重要原材料, 而我国是全球第一的镁产量国, 因此, 对白云岩矿的资源需求也在逐年增大。

中图分类号: P619.234 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0932-13

Characteristics, types, distributions and utilization value of dolomite deposit

LIU Lihong¹, HAN Miao¹, TIAN Ya¹, JIANG Kunpeng¹, ZHANG Yan², JIANG Lei³, LIU Yalei¹

(1. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Resources, National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Mineral Resources Research Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

收稿日期: 2023-05-16; 改回日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802173)、中国地质调查局项目(DD20221674, DD20230042, DD20230311)、中国地质调查局油气资源调查中心科技创新基金项目(油科创[2023]-YC02)联合资助。

作者简介: 刘丽红, 女, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积学研究; E-mail: liulihong713@163.com。

通信作者: 韩淼, 男, 1988 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事石油地质研究; E-mail: hanmiao@mail.cgs.gov.cn。

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

[Objective] Dolomite not only serves as an excellent oil and gas reservoir but also represents a critical non-metallic mineral resource. Dolomite ore is a vital raw material for producing metallic magnesium. China is the world's largest holder of magnesium resource reserves and the top producer of magnesium globally. Consequently, magnesium resources are considered a key strategic mineral. Investigating the characteristics, genesis, distribution, and development value of dolomite deposits is essential for safeguarding national mineral resource security. **[Methods]** By compiling relevant domestic and international literature, this study systematically summarizes the characteristics, genetic mechanisms, distribution patterns, and utilization value of dolomite deposits. **[Results]** Dolomite is primarily composed of the mineral dolomite, which crystallizes in the trigonal system and often exhibits rhombohedral crystal forms. Based on genetic classification, dolomite can be categorized into primary dolomite, diagenetic dolomite, and epigenetic dolomite. It is widely accepted that dolomite forms predominantly through metasomatic processes, retaining varying degrees of the original limestone structure, which may be disrupted during multiple phases of dolomitization or cementation. **[Conclusions]** In China, dolomite deposits are distributed across nearly all geological eras, though the majority are located at significant depths, with only a fraction exposed at the surface, meeting mining requirements. Dolomite is most extensively developed in the Proterozoic and Paleozoic strata, while occurrences in the Mesozoic and Cenozoic are restricted to localized regions. Dolomite has diverse industrial applications, including use as a metallurgical flux ($\text{MgO} \geq 15\%$), refractory material ($\text{MgO} \geq 18\%$), raw material for magnesium extraction ($\text{MgO} \geq 19\%$), cement production ($\text{MgO} > 18\%$), construction materials, pharmaceutical production of Epsom salts, agricultural fertilizers ($\text{MgO} > 20\%$), and animal feed additives. As a multifunctional non-metallic resource, China boasts abundant dolomite reserves, with metallurgical-grade dolomite resources totaling 1.875 billion tons. As the world's largest magnesium reserve holder (accounting for over 20% of global reserves) and top producer, China produced 893600 tons of primary raw magnesium in 2022, with exports exceeding 500000 tons. Magnesium resources thus hold strategic importance, and the rapid growth of the magnesium industry is expected to drive increased demand for dolomite mineral resources.

Key words: dolomite deposits; mineral characteristics; genetic types; distribution features; utilization value; mineral exploration engineering

Highlights: (1) While dolomite has predominantly been studied as an oil and gas reservoir, research focusing on its role as a non-metallic mineral resource remains relatively limited. This paper systematically investigates the characteristics, genetic classifications, distribution patterns, and development potential of dolomite as a non-metallic mineral resource. (2) The study provides a forward-looking perspective on the development prospects of dolomite deposits. As a critical raw material for magnesium smelting, dolomite ore holds growing strategic importance in China—the world's largest magnesium producer. Consequently, the demand for dolomite resources continues to rise annually, driven by the expanding magnesium industry.

About the first author: LIU Lihong, female, born in 1982, Ph.D., senior engineer, engaged in sedimentology and petroleum geology; E-mail: liulihong713@163.com.

About the corresponding author: HAN Miao, male, born in 1988, Ph.D., professor level senior engineer, engaged in sedimentology and petroleum geology; E-mail: miaomiaoqing@cgs.mail.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41802173), the projects of China Geological Survey (No. DD20221674, No. DD20230042, No. DD20230311) and Science and Technology Innovation Project of Oil & Gas Survey, China Geological Survey (No. 2023YC02).

1 引言

白云岩是主要由白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)组成的碳酸盐岩,是除石灰岩外的另一大类碳酸盐岩,可单独产出,也可与石灰岩或砂岩等共生,或者在石灰岩中以斑块、条带形式存在。白云岩在野外露头常呈明显的“刀砍纹”,滴稀盐酸不起泡,同时茜素

红不能染成红色,因此,这也是区分白云岩和灰岩的重要方法。白云岩从太古宙到全新世都有分布,据报道,最老年龄为 37 亿年,主要发育于元古界和古生界,并在较大的时间尺度上呈现出“越古老越常见”的趋势(Mckenzie and Vasconcelos, 2009; Eriksson et al., 2013),在元古宙达到极盛状态,而在全新世以来,其含量就很低了。由于在地表常温常

压条件下很难形成白云石,因此,在现代海洋中缺乏大规模的白云岩沉积。因此,多种交代白云石化模式被提出,包括渗透回流、蒸发泵、混合水、海水热对流以及埋藏模式等,以及最近盛行微生物白云石化模式(Jiang et al., 2019)。由于白云岩的成因机制对储集物性影响较大,因此在油气勘探领域中研究较多。而作为非金属矿产,这里仅简单地将其划分为原生白云岩、成岩白云岩和后生白云岩,便于白云岩矿的野外识别及开采。

白云岩不仅可以作为重要的油气储层,同时也是重要的层控贱金属矿床的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床的主岩,在冶金、医药、化工、食品、石油、农业等领域具有广泛的应用价值(刘昌寅和褚强, 1993; 厉建华和胡福培, 2009; 杨合群等, 2015; 宋澄生, 2020),是一种重要的非金属矿产。随着经济发展,社会对白云岩矿产需求越来越大,因此,迫切需要加快白云岩矿的勘探与研究,并寻找更多的白云岩资源。

白云石是冶炼金属镁的重要原材料,中国含镁白云岩矿丰富(杨合群等, 2015),白云石资源遍及中国各省区,主要分布在山西、河北、宁夏、吉林、河南、辽宁、内蒙古等地。中国的镁产量也占据着世界 95% 的市场,尤其是欧洲国家对中国镁资源具有强烈的依赖性,因此,对白云岩矿产资源的需求也在逐渐增大。本文对白云岩矿的特征、成因类型、分布及其开发利用价值进行了梳理,旨在指导白云岩矿的勘查,同时有利保障国家关键矿产安全。

2 白云岩的组成矿物特征

白云岩呈灰白色,有时略带浅黄、浅褐、浅绿色,或含有机质时呈灰黑色。玻璃光泽,性脆,硬度 3.5~4,密度 2.8~2.9 g/cm³,随着 Fe 含量增加比重增大。矿物成分以白云石为主,理论化学成分(重量百分比)CaO₃ 为 0.41%,MgO 为 21.86%,CO₂ 为 47.73%,成分中的 Mg 可被 Fe、Mn 等元素类质同像置换。属三方晶系,常呈完好的菱面体晶形。菱面体晶面常弯曲成马鞍状。集合体呈粒状、块状和土状。常发育简单双晶或聚片双晶。在自然界中,由于白云岩常沿节理面受到风化作用,因此常布满沿解理面发育的“刀纹”,是野外区别于灰岩的直接证据。白云岩常由灰岩交代形成,因此常保留原始灰

岩的颗粒幻影结构,如鲕粒、内碎屑、藻粘结结构等。白云岩在后期重结晶或胶结过程中原始结构常遭到破坏,原始结构不保留的白云岩常呈晶粒结构,包括粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩以及巨晶白云岩。白云岩在形成过程中由于受到不同地质作用和环境的影响,所以常常混入一些方解石、石膏、黏土矿物等杂质。白云石中由于含有离子半径更小的 Mg 离子,因此化学键强度更大,滴稀盐酸不起泡,这也是区分白云岩和灰岩最直接有效的方法。但是,粉末状白云岩遇稀盐酸剧烈起泡,或者块状白云岩遇到浓度较高的盐酸同样可破坏 Mg-O 键而剧烈起泡,并放出 CO₂ 气体。同时也可以利用茜素红染色技术区分白云石和方解石,通常方解石可以染成红色,而白云石不变色。

正白云石(化学计量的有序白云石)(图 1)晶格有序,完全由 Mg²⁺组成的阳离子单层与完全由 Ca²⁺离子组成的单层相间排列。如果结晶完全,白云石结构中的 Ca²⁺和 Mg²⁺可按 50:50(化学计量)平衡。然而,大多数现代白云石有序度很低,且富钙(有的学者称之为“原白云石”)。这些晶体相对不稳定,可通过“熟化”或经由新生变形成较稳定的有序白云石晶体(彼得等, 2010)。

白云岩经区域变质形成白云石大理岩,其化学式与理论化学成分和白云岩相同,矿物组成以重结晶的白云石为主,含有少量蛇纹石、透闪石、透辉石、方解石等变质矿物。岩石呈粒状、致密块状,玻璃光泽,颜色白至灰白色,性脆、解理面光滑,硬度 3.5~4,密度 2.87 g/cm³。

3 白云岩的成因类型

白云岩按成因类型可分为原生白云岩、成岩白云岩和后生白云岩,成岩白云岩和后生白云岩又称为交代白云岩或次生白云岩。按结构可分为原始结构保存的白云岩和原始结构不保存的白云岩(表 1),原始结构保存的白云岩又可以根据原始灰岩的结构分为异化粒白云岩、鲕粒白云岩、碎屑白云岩、生物礁白云岩等。异化粒白云岩又称粒屑白云岩,根据异化粒种类不同又可分为内碎屑白云岩、球粒白云岩、包粒白云岩、团块白云岩等。碎屑白云岩又可根据碎屑的形状和大小分为砾状白

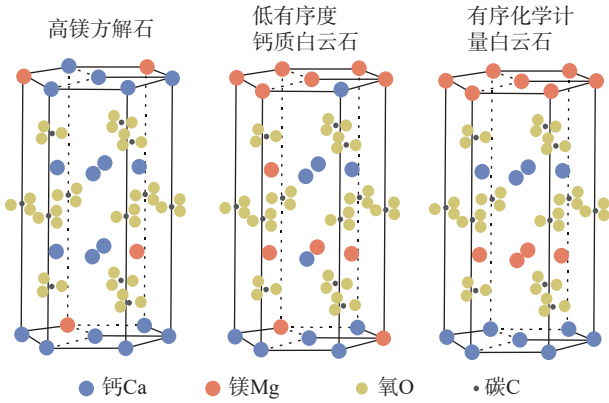


图 1 Mg 支撑的三种碳酸盐矿物的模型
图示比较了高镁方解石、钙质白云石和有序排列的化学计量白云石的晶体结构差异。a—自然形成的方解石,其晶格内部 Mg 对 Ca 的随机取代为 0~32%(摩尔比);b—含钙的有序度差的白云石晶格中含 55%~60%(摩尔比)Ca,其 Ca 和 Mg 没有完全分离成单独的层。无序的钙质白云石在成岩过程中新生变形成更稳定的近化学计量的有序白云石;c—有序排列的化学计量白云石,其 Ca/Mg 约为 50 : 50, Mg 与 Ca 阳离子层呈交替状近完美排列(彼得等,2010)

Fig.1 Three structural models of Mg-dominated carbonate minerals
Fig. 1 Illustrates the structural differences among high-magnesium calcite, calcium-rich disordered dolomite, and ordered stoichiometric dolomite. a- High magnesium calcite, naturally occurring calcite, Mg randomly substitutes for Ca (0~32%) (molar ratio) in natural calcite lattices.; b-Calcareous dolomite. The lattice contains approximately 55%~60% Ca (molar ratio). Ca and Mg are not fully segregated into distinct layers. During diagenesis, such disordered calcium-rich dolomite undergoes recrystallization to form more stable, near-stoichiometric ordered dolomite; c- Ordered stoichiometric dolomites. The Ca/Mg ratio is approximately 50 : 50, and Mg and Ca cation layers are nearly perfectly arranged in an alternating pattern (Peter et al., 2010)

表 1 白云岩结构类型划分方案 (Bissell and Chilingar, 1967; 黄思静, 2010; 刘丽红等, 2023)

Table 1 Dolomite classification according to structure types (Bissell and Chilingar, 1967; Huang Sijing et al., 2010; Liu Lihong et al., 2023)

结构类型	二级类型		三级类型	
原始结构保存的白云岩	异化粒白云岩 (粒屑白云岩)		内碎屑白云岩	
			球粒白云岩	
			包粒白云岩	
			团块白云岩	
	鲕粒白云岩			
	碎屑白云岩		砾状白云岩	
			角砾状白云岩	
			砂状白云岩	
			粉砂状白云岩	
	生物礁白云岩		凝块石白云岩	
泡沫绵石白云岩				
叠层石白云岩				
核形石白云岩				
原始结构不保存的白云岩	>4 mm 巨晶	4~1 mm 极粗晶	1~5 mm 粗晶	0.5~0.25 mm 中晶
	0.25~0.05 mm 细晶	0.05~0.01 mm 粉晶	0.01~0.001 mm 微晶	<0.001 mm 泥晶

云岩、角砾状白云岩、砂状白云岩和粉砂状白云岩。它常在白云岩中呈厚度不大的夹层,是在蒸发潮坪环境由于干裂、潮流活动形成的。原始结构不保存的白云岩又可以根据晶体大小分为泥晶、微晶、粉晶、细晶、中晶、粗晶、极粗晶、巨晶白云岩(表 1)。结构分类在石油地质行业中应用较广,作为非金属矿产,本文主要介绍其成因类型。

3.1 原生白云岩

原生白云岩是指在半咸水或高盐度泻湖、蒸发潮坪或内陆咸水湖泊中直接沉淀而成的白云岩。由于白云石很难在地表条件下实验室人工合成,因此,现代的原生白云岩很少见。通常将准同生作用下形成的白云岩看作是原生白云岩(张永生等, 2006)。在高盐度泻湖、潮坪环境,蒸发作用强烈, Ca²⁺ 逐渐析出, 剩余卤水中 Mg/Ca 比值逐渐升高, 而发生白云石化。更多学者认为微生物作用下形成的白云岩为原生白云岩(陈娅娜等, 2017; 钱一雄等, 2021)。微生物作用破坏 Mg²⁺ 离子的水合作用, 克服白云石化的 Mg²⁺ 的动力学障碍而形成白云岩 (Morrow, 1982; 刘丽红等, 2021)。原生白云岩通常呈泥微晶结构, 发育水平纹层, 横向分布稳定, 生物化石较少, 有序度较低, 常与石膏、硬石膏伴生。

3.2 成岩白云岩

成岩白云岩是指碳酸钙沉积物与渗透咸水中

的硫酸镁或氯化镁反应,方解石被白云石交代形成的白云岩,白云石常呈自形—半自形菱面体结构,具有雾心亮边,主要是由于白云石交代方解石时由于交代不彻底在白云石核心保留较多方解石或其他杂质包裹体形成污浊的核心,而亮边包裹体较少,通常呈环带状(刘丽红等,2020)。成岩白云岩通常呈似层状、透镜状或斑块状产于灰岩中,沿一定层位分布,与灰岩接触界线不整齐,横向上渐变为白云质灰岩或灰质白云岩。成岩白云岩常保留被交代灰岩的原始结构,包括泥晶或微晶结构、粒屑结构和生物礁结构等(黄思静等,2010)。原始结构不保存的白云岩主要为结晶白云岩,呈晶粒结构,根据晶体大小可进一步划分其类型(表1)(黄思静等,2010)。

3.3 后生白云岩

后生白云岩是一种在后生阶段,石灰岩中的方解石被白云石交代而形成的白云岩。交代作用由于富含镁的深部地下水在石灰岩裂隙中不断循环发生。后生白云岩中的白云石通常晶体粗大,干净透明,不具有环带结构,晶面弯曲呈马鞍形(李明隆等,2020)。后生白云岩的分布具有一定的局限性,常呈透镜状、脉状或枝状产出。通常由于深部热液流体沿灰岩裂隙或断层流动产生,因此延伸不远,不显层理,无一定层位。由于形成与深部热液流体有关,因此常与萤石、地开石、重晶石等重金属矿物共生(Liu et al., 2017)。

4 白云岩产出层位及分布

白云岩自古元古代就开始出现,在古代沉积地层中,白云岩普遍存在,但是现代白云岩相对稀少,进入显生宙以来,白云岩的总体百分比低于灰岩,其丰度走势图呈现出幕式的变化趋势(图2)(Eriksson et al., 2013),比如在早奥陶世、早中志留世和三叠纪的海相地层中,白云岩都非常普遍,所占百分比高;而在石炭纪、二叠纪,白云岩所占百分比低,在全新世的沉积物中,其含量更低(图3)(Mckenzie and Vasconcelos, 2009)。中国是世界上少有的几乎在各个历史时期都有白云岩分布的国家(何治亮等,2020),虽然白云岩在我国地层分布非常广泛,但是作为一种矿产资源开采必须满足露天开采条件,需要出露地表,并且未被其他地层覆

盖。因此,本文主要总结能够满足露天开采的白云岩矿产资源分布情况(表2)。

4.1 元古界白云岩分布

白云岩在元古界长城系高于庄组就已经普遍发育,在山西省灵丘县和河北省承德县都有出露,白云岩主要以泥粉晶白云岩为主。

到了中元古代蓟县纪,白云岩在多个层系发育,尤其是在华北地区的雾迷山组和龙家园组多有报道,同时在西北地区的卡瓦布拉克岩组也有发育,该地区白云岩已变质为细粒白云石大理岩。

新元古代震旦纪是白云岩发育的又一重要时期,塔里木盆地的奇格布拉克组和中、上扬子地区的灯影组都发育微生物白云岩,是震旦系底部的标志层,同时也是重要的油气储层。同时在土门群的

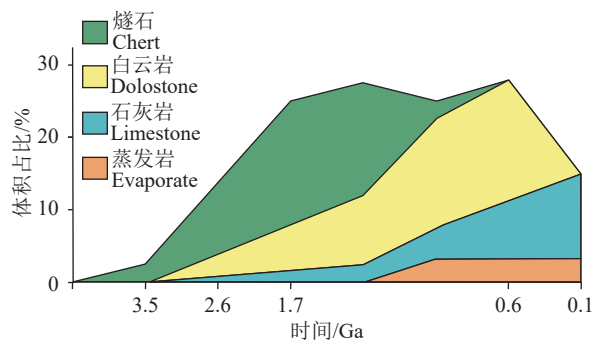


图2 地史早期不同类型的非陆源碎屑岩在沉积岩中的相对含量随时间的粗略分布图,显示元古宙白云岩相对于灰岩在体积上的优势(Eriksson et al., 2013)

Fig.2 Rough distribution of the relative contents of different types of non-terrigenous clastic rocks in sedimentary rocks over time in early geological history, showing the preponderance of Proterozoic dolomite relative to limestone in volume (Eriksson et al., 2013)

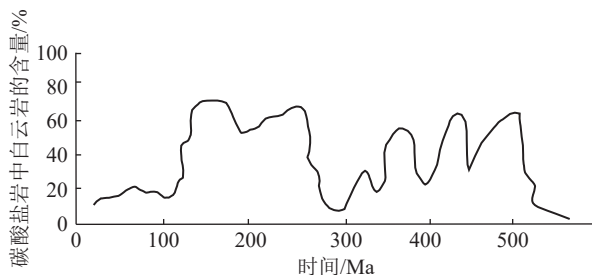


图3 显生宙海相碳酸盐岩中白云岩丰度随时间的演化趋势(Mckenzie and Vasconcelos, 2009)

Fig.3 Evolution of dolomite abundance over time in Phanerozoic Marine carbonate rocks(Mckenzie and Vasconcelos, 2009)

表 2 中国典型露天白云岩矿的分布层位及地区

Table 2 Typical outcrop dolomite distribution formations and regions in China

地层			白云岩类型	分布地区
新生界	新近系	盐水坑组	冷泉白云岩	台湾高雄甲仙乡
	古近系	潜江组	微生物白云岩	江汉盆地（未出露）
中生界	白垩系	库克拜组	微晶白云岩	塔里木盆地西北缘乌恰库孜贡苏剖面
	侏罗系	布曲组	原始结构保存的白云岩、结晶白云岩	姜塘盆地南坳陷
	三叠系	雷口坡组	藻白云岩	川东北立溪崖、上寺等剖面
		嘉陵江组	泥晶白云岩、粒屑白云岩	湖北当阳三桥大沟
		飞仙关组	结晶白云岩、鲕粒白云岩	川东北、川北地区
上古生界	二叠系	展金组	粉-细晶白云岩	角木茶卡地区
		长兴组	中晶白云岩、礁白云岩	盘龙洞、开县红花及见天坝
		茅口组	结晶白云岩	川东华蓥山地区二崖剖面、丰都地区回龙场剖面和狗子水剖面
		栖霞组	结晶白云岩、鞍形白云岩	川西北、川西南广元上寺剖面、长江沟剖面、峨眉山张村剖面
		凤城组	结晶白云岩	新疆准噶尔盆地乌尔禾-风城地区
	石炭系	大埔组	中晶白云岩	广西武宣县龟山
		青山峡组	结晶白云岩	海南省昌江县花梨山
		黄龙组	微晶白云岩、细晶白云岩	福建省武平县
	泥盆系	黄京山组	层状白云岩	广西北流县雁塘坡
	志留系	泉脑组	结晶白云岩	酒西盆地鸭儿峡
	奥陶系	马家沟组	细晶—粗晶白云岩	山西省隰县黄土镇
		仓山组	细—中晶白云岩	安徽省青阳县老屋山
		亮甲店组	细晶白云岩	朔州市青羊沟
		冶里组	细晶白云岩	朔州市青羊沟
		鹰山组	结晶白云岩、砂屑幻影白云岩	巴楚大板塔格剖面和阿克苏蓬莱坝剖面
		蓬莱坝组	结晶白云岩	柯坪、巴楚露头区
下古生界	三山子组	三山子组	粉—细晶白云岩	山东省沂南县独角山
		三山子组	砾屑白云岩、细晶白云岩	山东蒙阴北峪
		三山子组	细晶白云岩	内蒙古自治区清水河县北堡乡暖果淘矿区
	寒武系	凤山组	中—粗晶白云岩	山西省孟县上卜头、昔阳县
		嵩山组	结晶白云岩	河南郑县北部茨坝乡；安徽省霍邱县秘瘠镇
		张夏组	鲕粒白云岩	河南鹤壁柳林
		土坝组	细晶白云岩	安徽省霍邱县四平山
		龙哈组	粉晶白云岩、生物碎屑白云岩	云南省蒙自县白牛厂矿区
		中岩组	中晶白云岩	甘肃省嘉峪关市
		娄山关组	不等晶白云岩	湖北咸宁桂花
		下丘里塔格群	热液白云岩	柯坪水泥厂剖面
		肖尔布拉克组	微生物白云岩	新疆柯坪地区什艾日克剖面、苏盖特布拉克剖面、肖尔布拉克剖面
	震旦系	奇格布拉克组	微生物白云岩	新疆乌什地区
		灯影组	微生物白云岩	川西北地区羊木剖面、胡家坝剖面、杨坝剖面
灯影组		泥-粉晶白云岩	昆盖阔坦剖面	
石旺庄组		泥微晶白云岩	山东省枣庄市台儿庄区张山子镇	
张渠组		结晶白云岩	江苏徐州贾汪大京山	
第二岩组		白云石大理岩	甘肃省穿山驯南白云岩矿区	
南华系		南沱组	砂岩夹白云岩	神农架高桥河剖面
元古界	青山口系	上岩组	细晶白云岩	中祁连山东段老爷山至南门峡一带
	蓟县系	雾迷山组	条带白云岩	山西省灵丘县史庄乡
		龙家园组	隐晶质白云岩	陕西省洛南县
		龙家园组	粉—细晶白云岩	河南省卢氏县蔡家园
	卡瓦布拉克岩组	王全口组	粉细晶白云岩	宁夏回族自治区吴忠市青龙山
		卡瓦布拉克岩组	细粒变晶结构	新疆哈密市尾亚-天湖一带
	长城系	高于庄组	泥粉晶白云岩	山西省灵丘县史庄乡
	高于庄组	粉晶白云岩	承德县二道河	

石旺庄组、张渠组以及穿山驯群的第二岩组也有白云岩发育,是重要的白云岩矿区。

4.2 下古生界白云岩分布

寒武系白云岩主要分布于塔里木盆地西北地

区肖尔布拉克组、丘里塔格下亚群, 扬子地区娄山关组, 华北地区(包括鄂尔多斯盆地)主要发育于嵩山组、长山组和凤山组等地(李亚非, 2018), 也有地区将三组合称为三山子组, 同属于寒武系—奥陶系的过渡地层。

奥陶系白云岩随地层年代由老到新逐渐减少。塔里木盆地主要发育于下奥陶统蓬莱坝组、鹰山组底部, 地层主要出露于柯坪、巴楚地区, 由于鹰山组灰岩较发育, 因此交代作用形成的白云岩多为具有颗粒幻影的残余砂屑白云岩。华北地区的冶里组、亮甲山组和马家沟组有大量白云岩发育, 同时, 马家沟组也是鄂尔多斯盆地最重要的油气储层。

到志留纪白云岩的分布已经很少了, 仅在扬子地区以及酒西鸭儿峡油田、云南哀牢山地区分布(谢全民等, 2001; 李华等, 2017), 同时在宁蒗地区上志留统竹地组可见厚层白云岩(何治亮等, 2020)。

4.3 上古生界白云岩分布

加里东运动后, 中国三大克拉通盆地遭受了强烈的挤压和抬升剥蚀, 泥盆系和石炭系分布较少, 并且主要以碎屑岩为主, 因此, 白云岩分布也较局限(何治亮等, 2020)。泥盆系白云岩在广西北流县雁塘坡黄京山组、上伦组、官桥组、那叫组有出露。石炭系主要分布于福建、海南、广西等地区, 分布的层位包括黄龙组、青山峡组和大埔组。

二叠系白云岩主要分布于川西、川南和川东地区的栖霞组—茅口组, 以及川东北地区的长兴组。准噶尔盆地的风城组和准东地区的芦苇沟组以及红雁池组发育湖相白云岩(冯有良等, 2011), 羌塘盆地角木茶卡地区也出露了展金组白云岩(胡俊杰等, 2014)。

4.4 中生界白云岩分布

三叠纪塔里木盆地和华北板块已转变为陆相沉积, 海相地层仅在扬子和青藏地区分布, 中、上扬子地区的三叠系是白云岩发育的主要层段(何治亮等, 2020), 为一套与膏盐岩相伴生的白云岩, 包括川东北—川北地区飞仙关组的鲕粒白云岩、川东南—川中—川东北—川北地区嘉陵江组的粒屑白云岩、川东—川北地区长兴组的生物礁白云岩(冉隆辉, 2006)。

侏罗纪白云岩仅在羌塘盆地展金组分布(万友利等, 2020), 岩石类型包括原始结构保存的白云岩

以及各种晶粒大小的结晶白云岩。

白垩纪白云岩在塔里木盆地西北缘乌恰库孜贡苏剖面库克拜组出露, 主要岩石类型为微晶白云岩(张曼等, 2012)。

4.5 新生界白云岩分布

在古近系中也有白云岩分布报道(吴世强等, 2020), 但该地层白云岩为井下取心, 未见地表出露的报道。在台湾高雄甲仙乡新近系中发现了冷泉白云岩, 认为是在弱还原环境中冷泉微生物作用下形成。现代沉积的白云岩虽也有报道, 但大多并未出露, 也未能演化为可供开采的矿床。

5 开发利用价值

白云岩和白云石大理岩可用于建筑、化工、冶金、医药、农业、环境保护等各个方面(表 3), 是一种用途非常广泛的非金属矿产。

5.1 白云岩在建材工业部门主要用于玻璃、陶瓷、铸石配料和含镁水泥原料及建筑用石料

白云岩用于生产氯化镁水泥和硫化镁水泥, 具有较高的抗压和抗挠曲强度, 同时能防火、防虫蛀、防水。尤其是采用隔焰煅烧白云岩制备的苛性粉, 进而配制的氯氧镁水泥安全性更佳。含镁水泥已被广泛地用于地板块、快速凝固路面铺砌和路面裂纹裂缝的修补等。白云岩经煅烧后可作外墙涂料, 具有黏着力强、凝固性好以及良好的耐火、隔热性能(厉建华和胡福培, 2009)。用它可生产抹灰砂浆、混凝土、类似木料的菱镁制品(锯木板、刨花板、隔音板、绝热板)以及人造大理石等。菱镁地面砖具有木地板的弹性、韧性和保温性能, 且能防火防蛀、抗水性好、不开裂、价格便宜(刘昌寅和褚强, 1993)。白云石用于玻璃中可以减少玻璃老化、阻止大气或水分产生化学侵蚀、改善彩色玻璃的可塑性、提高玻璃的强度(刘昌寅和褚强, 1993)。玻璃用白云岩的典型矿床如云南昆明万佛山白云岩矿床, 其采用的工业指标见表 4。白云石可用于制作不同规格的碎石料, 用于建筑和公路使用。矿石加工程序简单, 一般无需选矿, 只需通过机械破碎筛分加工成建筑等企业要求的粒度即可(宋澄尘, 2020)。

据行业标准《矿产地质勘查规范 菱镁矿、白云岩》(DT/T 0348—2020), 水泥、玻璃、陶瓷和提炼金

属镁用的白云岩及白云石大理岩的一般工业指标见表 5。

5.2 白云岩在化工、轻工领域中的应用十分广泛

白云岩可用作提取碱性碳酸镁, 制轻质氯化镁, 用它可烧制高纯镁砂。白云岩粉可用作橡胶的填充剂, 具有较强的扯断强度、撕裂强度和冲击弹性(刘昌寅和褚强, 1993)。在医药化工方面可用于生产泻利盐, 以白云岩为原料制备的镁盐系列多达十余种, 如 $Mg(OH)_2$ 、 MgO 、 $MgCO_3$ 、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 。镁盐的开发有效促进了造纸、印刷、涂料、橡胶、塑料、试剂等行业的发展, 潜在经济效益相当可观。近几年新兴起来的白云岩超细粉及其偶联处理产

品亦得到广泛地推广应用。高硅白云岩粉按一定量充填在普通醇基调合漆中, 便制成具有防腐性能的“特种”漆了。

5.3 白云岩在冶金领域中的应用, 主要用作碱性耐火材料、熔剂、冶炼金属镁等

白云岩矿具有较好的机械强度, 不易形成碎块和粉末, 用作溶剂具有较好的透气性和炉料的均衡性, 同时能起到中和酸性炉渣的作用, 提高炉渣的碱度, 减轻炉渣对炉衬的侵蚀作用, 熔剂用典型矿产实例如南京幕府山白云岩矿床(表 6)。采用白云岩作造渣材料更大优点是延长炉龄 20%~30%。炼钢工序中添加白云石可以与硅、铝、硫和磷等杂质

表 3 白云岩矿的应用领域、用途及性能
Table 3 Application industry, utility and performance of dolomite ore

应用领域	产品	用途	性能
建材	含镁水泥原料	地板块、快速凝固路面铺砌和路面裂纹裂缝的修补	较高的抗压和抗挠曲强度, 防火、防虫蛀、防水黏着力强、凝固性好以及良好的耐火、隔热性能
	外墙涂料		
	铸石配料	灰砂浆、混凝土、类似木料的菱镁制品(锯木板、刨花板、隔音板、绝热板)以及人造大理石	弹性、韧性和保温性能, 且能防火防蛀、抗水性好、不开裂
	玻璃	制作玻璃	减少玻璃老化、阻止大气或水分产生化学侵蚀、改善彩色玻璃的可塑性、提高玻璃的强度
化工、轻工	碱性碳酸镁、制轻质氯化镁	可烧制高纯镁砂	
	橡胶的填充剂		具有较强的扯断强度、撕裂强度和冲击弹性
	药品	用于生产泻利盐	
冶金	溶剂		具有较好的透气性和炉料的均衡性, 中和酸性炉渣使炉渣易于流动, 易与钢水分离
	炼钢	形成炉渣	
	铝合金	提炼金属镁制造铝合金	提高铝的机械强度, 改善机械加工及耐碱腐蚀性能
农牧业	矿物微肥、酸性土壤改良中和剂	制取钙镁磷(钾)肥	中和因使用尿素等肥料而造成的酸性、促进植物叶绿素的形成和有利于磷的吸收
	家禽砂质矿物饲料	畜、禽饲料中添加适量的白云岩粉	促进动物的生长发育、减少疾病
环保	白云岩粉	改善煤矿井下的尘埃的飞扬	
	过滤材料	过滤饮用水以及工业用水中的铁、镁、硅酸盐等	

表 4 云南昆明万佛山白云岩矿床(玻璃用白云岩)工业指标
Table 4 Industrial specifications of dolomite ore (used in glass) in Wanfo Mountain, Kunming, Yunnan Province

单样平均品位	$MgO > 18.5\%$	$Fe_2O_3 < 0.2\%$
块段平均品位	$MgO > 18.5\%$	$Fe_2O_3 < 0.2\%$
开采技术条件	最小开采厚度 2 m, 最小夹石剔除厚度 1 m, 剥采比 $< 0.25 : 1$, 边坡角 55° , 最终底盘宽度 20 m	

表 5 水泥、玻璃、陶瓷和提炼金属镁用的白云岩一般工业指标
Table 5 General industrial specifications of dolomite used in cement, glass, ceramics and in the extraction of magnesium

矿石用途与品级		化学成分/%						
用途	品级	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	K ₂ O+Na ₂ O
冶镁用	边界品位	≥ 19		≤ 4.0				≤ 0.32
	最低工业品位	≥ 20		≤ 3.0				≤ 0.30
水泥用		> 18				≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 4.00
陶瓷用		> 19	> 19		< 0.3			
玻璃用	一级品	> 20	> 30		≤ 0.1	≤ 1.0		
	二级品	> 19	> 26		≤ 0.2	≤ 1.0		

反应形成炉渣,使炉渣易于流动,即与钢水分离(刘昌寅和褚强,1993)。白云石可以用于提炼金属镁(王会林,2020),冶镁用典型矿床如宁夏同心青龙山白云岩矿产,采用的工业指标见表7。冶镁白云岩是金属镁不可或缺的原料,中国的镁资源储量居世界首位,是镁资源生产大国(杨合群等,2015)。用于制造铝合金,提高铝的机械强度,改善机械加工及耐碱腐蚀性能。轻烧白云石主要用于炼钢,目前,我国生产1t钢需消耗170kg白云岩(厉建华和胡福培,2009)。

据行业标准《矿产地质勘查规范菱镁矿、白云岩》(DT/T 0348—2020),冶金耐火材料炉衬用和熔剂用白云岩及白云石大理岩矿产地质勘查一般工业指标见表8。白云岩矿露天开采技术条件见表9。

5.4 白云岩在农牧业中的应用前景广阔

白云岩在农业上主要用途是制取钙镁磷(钾)肥、矿物微肥、酸性土壤改良中和剂等。白云岩可中和因使用尿素等肥料而造成的酸性,二价镁离子能促进植物叶绿素的形成和有利于磷的吸收,同时为农作物提供钙和镁等肥料,使农作物增产15%~20%(厉建华和胡福培,2009)。对白云石制备镁化学品过程中,通过滤渣的处理可以制得碳酸钙、农用硫酸钾、氮钾复合肥,具有广阔的应用前景和销售市场。白云岩还可以制作家禽砂质矿物饲料(刘昌寅和褚强,1993),钙、镁均是动物体内所必

须的营养元素,在畜、禽饲料中添加适量的白云岩粉(或是0.1~1.5mm的颗粒),对于促进动物的生长发育、减少疾病非常有益。制肥用白云岩矿品位是MgO含量大于20%,CaO含量大于30%。

5.5 白云岩在环保领域用途广泛

白云岩粉可用来改善煤矿井下的尘埃的飞扬,防止或延缓煤尘爆炸。还可以用作过滤材料过滤饮用水以及工业用水中的铁、镁、硅酸盐等(刘昌寅和褚强,1993)。

6 白云岩矿的储量及市场前景

中国含镁白云岩矿丰富,白云石资源遍及各省区。我国建筑用白云岩矿产资源储量为31359.53万m³,建筑用大理岩矿石储量为20940.67m³,主要分布于辽宁和广西。玻璃用白云岩矿产资源储量为64625.9万t,主要分布于广西、湖南和河北。水泥用大理岩矿石储量为127693.02万t,主要分布于黑龙江、内蒙古和山东。化工用白云岩矿产资源储量为5606.19万t,主要分布于山东和江西。冶金用白云岩矿产资源储量为18.75亿t,主要分布于安徽、河北和江西(矿产资源工业要求手册编委会,2010;图4)。我国镁资源和其产业主要集中在陕西省榆林市,其镁矿石主要从山西运送过来。陕西省原镁产量居全国第一,山西省居第二。

镁是21世纪最重要的战略材料之一,不仅用于飞机、5G基站、汽车等产品,还可用于机床的原

表6 南京幕府山熔剂用白云岩矿床采用的工业指标

Table 6 Industrial index of dolomite deposits used in fluxes in Mufu Mountain, Nanjing						
品级	化学成分/%				最小可开采厚度/m	最小夹石剔除厚度/m
	MgO	酸不溶物	SiO ₂	P		
特级品	>20	<4	<2	<0.1		
一级品	>19	<7	<3	—	2	2
二级品	>17	<10	<6	—		

表7 宁夏同心青龙山冶镁用白云岩矿床采用的工业指标

Table 7 Industrial index of dolomite deposits used in metallurgical magnesium in Qinglong Montain, Tongxin, Ningxia Province						
项目	品位	化学成分/%				
		MgO	CaO/MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O
化学成分指标	边界品位	19.0	1.06	1.3	1.00	0.13
	块段平均品位	20.0	1.03	1.3	0.50	0.10
开采技术条件	最小可采厚度≥1.2 m, 最小夹石剔除厚度≥1 m, 剥采比≤2:1					

材料。镁的主要生产工艺包括电解法和硅热法,其硅热法主要原料为白云石,由于我国白云岩矿产资中电解法的主要原料包括卤水、菱镁矿、光卤石等,源十分丰富,几乎各省都有分布,目前中国主要采

表 8 冶金耐火材料炉衬用和熔剂用白云岩化学成分
Table 8 Chemical composition of dolomite used in metallurgical furnace lining and flux for metallurgical refractory materials

矿石用途	品位	化学成分/%				
		MgO	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +Mn ₃ O ₄ +SiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	S	P
耐火炉衬用白云岩	边界品位	≥18	≤3.0[其中, ω(SiO ₂)≤1.5]			
	最低工业品位	≥20	≤3.0[其中, ω(SiO ₂)≤1.5]			
熔剂用白云岩	边界品位	≥15	≤10.0[其中, ω(SiO ₂)≤4.0]			
	最低工业品位	≥16	≤10.0[其中, ω(SiO ₂)≤4.0]	≤0.30	≤0.15	≤0.03

表 9 白云岩矿露天开采技术条件
Table 9 Technical conditions for open pit mining of dolomite ore

矿山规模	最小可采厚度/m	最小岩石剔除厚度/m		边坡角/°		最小底盘宽度/m		剥采比	爆破安全距离/m
		岩石状	松软状	坚硬岩石	松软岩土	岩石状	松软状		
大中型矿	8	2	1	50~60	45	≥60	≥40	0.5 : 1	300
小型矿	4	2	1	50~60	45	≥40	≥20	0.5 : 1	300

注: ①剥采比为开采废石、废土与矿石的体积比。②边坡角仅供露天开采矿床确定资源储量估算境界时参考。



图 4 中国白云岩矿分布图
Fig.4 Dolomite ore distribution map in China
<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2025, 52(3)

用硅热法。

中国的镁资源储量占全球总储量的 20% 以上, 位居世界第一, 中国的镁产量也占据着世界 95% 的市场, 尤其是欧洲国家对中国镁资源具有强烈的依赖性。据中国有色金属工业协会初步统计, 中国原镁产量高, 一半用于出口, 而进口量每年仅有几百吨。2019 年中国原镁产量最高, 达到 96.85 万 t (图 5)。2021 年, 中国原镁产量 82.3 万 t, 产量有所下降, 但出口量创历史新高, 达到 47.78 万 t, 出口金额 19.35 亿美元, 同比增长 101%, 2022 年产量有所回升, 达 89.36 万 t, 出口量突破 50 万 t, 创历史新高。

中国原镁消费量也呈逐年上升趋势, 其中 2016 年原镁消费量为 40.15 万 t, 到 2020 年已达到 53.15 万 t (图 6), 近两年消费量有所降低。国家目前也在鼓励发展轻量化材料, 镁合金作为一种轻量化新材料已经替代铝材和钢材大量应用于轨道交通、汽车、飞机、3C 电子等各行各业, 尤其是新能源汽车对镁合金零部件的需求量未来将会急剧增加。这将会促进镁产业的快速发展, 同时也会增大

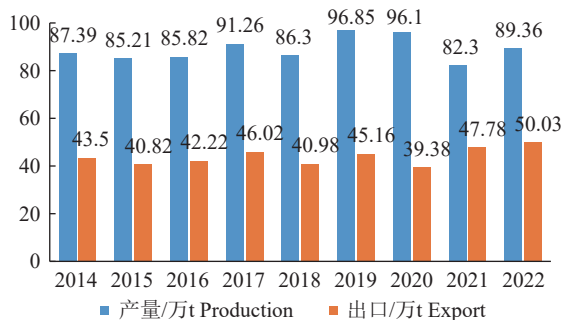


图 5 2014—2022 年我国原镁供需平衡统计图
Fig.5 Statistical chart of equilibrium between supply and demand of Chinese original magnesium during 2014–2022

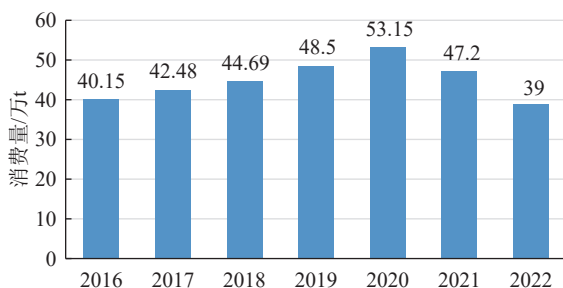


图 6 2016—2022 年中国原镁消费量统计图
Fig.6 Statistical chart of raw magnesium consumption in China during 2016–2022

对白云岩矿产资源的需求。

2021 年, 中国镁行业总体运行平稳, 价格大幅上涨, 出口创历史新高。据中国有色金属工业协会统计, 2021 年, 镁价格波动较大, 全年最低价为 13950 元/t, 最高价为 70000 元/t; 全年均价 25244 元/t, 同比上涨 86%(图 7)。2022 年, 国内原镁年均价 30738.71 元/t, 同比上涨 21.77%(来源: 镁业分会)。

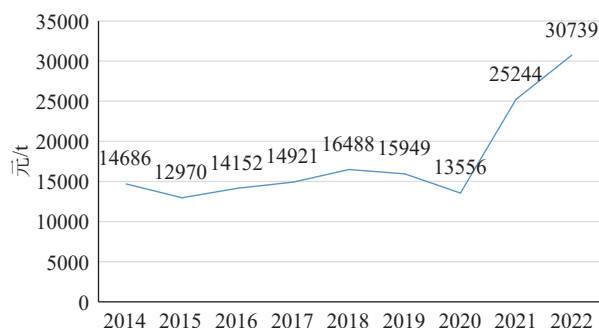


图 7 2014—2022 年我国原镁价格走势
Fig.7 Price trend of raw magnesium in China from 2014 to 2022

7 结 论

(1) 白云岩主要由白云石组成, 是除石灰岩外另一大类碳酸盐岩, 主要为交代成因, 也有原生成因, 按照其成因可分为原生白云岩、成岩白云岩和后生白云岩;

(2) 白云岩发育层位较多, 从太古代到全新世都有分布, 主要分布在元古界和古生界, 在中生界和新生界局部地区也有发育, 在全新世以来, 其含量很低, 呈现出“越古老越常见”的趋势; 作为可供开采的非金属矿产, 主要出露于山西、河北、宁夏、吉林、河南、辽宁、内蒙等地;

(3) 白云岩在建材工业部门主要用于玻璃 ($\text{MgO} > 20\%$)、陶瓷 ($\text{MgO} > 19\%$)、铸石配料和含镁水泥原料 ($\text{MgO} > 18\%$) 及建筑用石料等; 在化工、轻工领域中用作提取碱性碳酸镁, 制轻质氯化镁, 在冶金领域主要用作碱性耐火材料 ($\text{MgO} \geq 18\%$)、熔剂 ($\text{MgO} \geq 15\%$)、冶炼金属镁 ($\text{MgO} \geq 19\%$) 等, 在农牧业中主要用途是制取钙镁磷 (钾) 肥、矿物微肥、酸性土壤改良中和剂等, 制肥用白云岩矿品位是 MgO 含量大于 20%, CaO 含量大于 30%。

(4) 中国白云岩矿资源丰富, 冶金用白云岩矿产

资源储量为 18.75 亿 t,而白云岩矿也是冶炼金属镁的重要原材料。中国是全球最大的镁资源储量国,占全球总储量的 20% 以上,也是全球第一的镁产量国,2022 年全国原镁产量为 89.36 万 t,出口量突破 50 万 t,因此,镁资源也是重要的关键矿产资源。镁产业的快速发展也会增大对白云岩矿产资源的需

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所王春连研究员在文章写作过程中给予了指导,在此表示感谢!

References

- Bissell H J, Chilingar G V. 1967. Classification of sedimentary carbonate rocks[C]//Chilingar G V, Bissell H J, Fairbridge R W (eds.). Carbonate rocks A—Developments in sedimentology. Amsterdam, Elsevier, 87–168.
- Chen Ya'na, Shen Anjiang, Pan Liyin, Zhang Jie, Wang Xiaofang. 2017. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 704–715 (in Chinese with English abstract).
- Eriksson P G, Banerjee S, Catuneanu O, Corcoran P L, Eriksson K A, Hiatt E E, Laflamme M, Lenhardt N, Long D G F, Miall A D. 2013. Secular changes in sedimentation systems and sequence stratigraphy[J]. *Gondwana Research*, 24(2): 468–489.
- Feng Youliang, Zhang Yijie, Wang Ruiju, Zhang Guangya, Wu Wei'an. 2011. Dolomites genesis and hydrocarbon enrichment of the Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 38(6): 685–692 (in Chinese with English abstract).
- He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhang Juntao, Zhu Dongya, Qian Yixiong, Ding Qian, Chen Daizhao. 2020. Distribution, genetic, mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Hu Junjie, Li Qi, Wang Shuangqing, Shen Bin, Chen Ruoyu, Ge Dongsheng. 2014. Petrological and geochemical characteristics of dolomite of Zhanjin Formation in Jiaomuchaka area, Qiangtang Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 26(5): 80–85, 118 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing. 2010. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Jiang L, Xu Z H, Shi S Y, Liu W. 2019. Multiphase dolomitization of a microbialite-dominated gas reservoir, the middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 180: 820–834.
- Li Hua, Fan Wenyu, Zhang Jianlong, Zhang Xingpei, Arska, Zhou Yimin. 2017. Ore-controlling factors of the Chang'an gold deposit in southern Ailaoshan metallogenic belt and its prospecting significance[J]. *Contribution to Geology and Mineal Resources Research*, 32(4): 535–543 (in Chinese with English abstract).
- Li Minglong, Tan Xiucheng, Su Chengpeng, Lu Feifan, Zhang Benjian, Pan Zhengyi, Xiao Di. 2020. Characteristics and genesis of sucrosic dolomite in Middle Permian Chihhsia Formation, Northwest Sichuan Basin: A case study from Shangsi section[J]. *Geological Review*, 66(3): 591–610 (in Chinese with English abstract).
- Li Yafei. 2018. Characteristics of metallurgical magnesium dolomite deposit in Zhuanyagou mine area, Shanxi[J]. *Mineral Exploration*, 9(6): 1212–1216 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changyin, Chu Qiang. 1993. The development and application of dolomite[J]. *China Mining*, (4): 17–21 (in Chinese).
- Liu L H, Ma Y S, Liu B, Wang C L. 2017. Hydrothermal dissolution of Ordovician carbonates rocks and its dissolution mechanism in Tarim Basin, China[J]. *Carbonates Evaporites*, 32: 525–537.
- Liu Lihong, Gao Yongjin, Wang Dandan, Bai Zhongkai, Zhang Yuanyin, Han Miao. 2021. The impact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 109–120 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Wang Chunlian, Li Lixia, Du Zhili, Tang Yue, Han Miao. 2020. The characteristics and formation mechanism of Ordovician dolomite in Member 6 of Majiagou Formation in South Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 47(3): 810–820 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Han Miao, Gao Yongjin, Zhang Yuanyin, Liu Chengxin, Duan Ye, Yang Youxing, Jiang Kunpeng. 2023. Main reservoir controlling factors and diagenetic evolution of the Xiao'erbulak Formation of Tarim Basin, NW China: A case study of Well KPN1 in Kalpin area[J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 34(5): 763–779 (in Chinese with English abstract).
- Mckenzie J A, Vasconcelos C. 2009. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives[J]. *Sedimentology*, 56: 205–219.
- Mineral Resource Industry Requirements Manual Editorial Board. 2010. Handbook of Mineral Resource Industry Requirements[M]. Beijing: Geological Publishing House, 543–546 (in Chinese).
- Morrow D W. 1982. Diagenesis I. Dolomite—part 1: The chemistry of dolomitization and dolomite precipitation[J]. *Geoscience Canada*, 9: 5–13.
- Peter A Scholle, Dana S Ulmer-Scholle. 2010. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis[M]. Translated by Yao Genshun, Shen Anjiang Pan Wenqing, Zheng Xingping, Zheng Jianfeng, Lu Junming, Luo Xianying. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Qian Yixiong, Chu Chenglin, Liyuejun, Zhang Qingzhen, Li Wangpeng, Yang Xin. 2021. Characteristics, environment and geological dating of primary dolomite in the Neoproterozoic Pingwagou Formation at Hongliugou, Ruoqiang County, Xinjiang[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(3): 570–586 (in Chinese with English abstract).
- Ran Longhui. 2006. On the prospect of natural gas exploration in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 26(12): 42–44 (in Chinese with English abstract).

- Chinese).
- Song Chengchen. 2020. Geological characteristics and processing technology of Sanqiaogou limestone-dolomite deposit for building materials in Dangyang, Hubei Province[J]. *Western Resources*, (3): 10–12 (in Chinese).
- Wan Youli, Wang Jian, Fu Xiugen, Wang Dong. 2020. Geochemical tracing of isotopic fluid of dolomite reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern depression of Qiangtang Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 189–200 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huilin. 2020. Industrial value analysis of magnesium-smelting dolomite in Donghui Town, Pingding County[J]. *Huabei Natural Resources*, (2): 48–49 (in Chinese).
- Wu Shiqiang, Chen Fengling, Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Chen Chen, Guan Wenjing. 2020. Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 201–208 (in Chinese with English abstract).
- Xie Quanmin, Li Feng, Ma Caiqin. 2001. Geological characteristics and distribution of oil and water in Silurian buried hill reservoir in Yaerxia oilfield, Jiuxi basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 8(4): 5–7 (in Chinese).
- Yang Hequn, Ai Ning, Mao Zili, Wu Dan. 2015. A history of Ningxia dolomite for magnesium smelting[J]. *Northwestern Geology*, 48(3): 139(in Chinese).
- Zhang Man, Wu Xiaobin, Yan Baohua, Wu Song, Meng Qingquan, Fang Xiaomin, Song Chunhui. 2012. Sedimentary evolution and microfacies analysis of the Late Cretaceous Oligocene from Wuqia Area in the Northwestern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(3): 501–510 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongsheng, Hou Xianhua, Zhang Haiqing, Yang Yuqing. 2006. Sedimentary characteristics and formation mechanism of penepprimary dolostone in the Upper Eocene salt-bearing interval in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 8(4): 441–455 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 彼得·A 肖勒, 达娜·S 厄尔默-肖勒. 2010. 碳酸盐岩岩石学: 颗粒, 结构, 孔隙及成岩作用[M]. 姚根顺, 沈安江, 潘文庆, 郑兴平, 郑剑锋, 陆俊明, 罗宪婴译. 北京: 石油工业出版社.
- 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 张杰, 王小芳. 2017. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. *石油勘探与开发*, 44(5): 704–715.
- 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 张光亚, 吴卫安. 2011. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素[J]. *石油勘探与开发*, 38(6): 685–692.
- 何治亮, 马永生, 张军涛, 朱东亚, 钱一雄, 丁茜, 陈代钊. 2020. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 41(1): 1–14.
- 胡俊杰, 李琦, 汪双清, 沈斌, 陈若瑜, 葛东升. 2014. 羌塘盆地地木茶卡地区展金组白云岩岩石学及地球化学特征[J]. *岩性油气藏*, 26(5): 80–85, 118.
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 矿产资源工业要求手册编委会. 2010. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社: 543–546.
- 李华, 范文玉, 张建龙, 张星培, 艾斯卡尔, 周一敏. 2017. 哀牢山成矿带南段长安金矿控矿因素及其找矿指示意义[J]. *地质找矿论丛*, 32(4): 535–543.
- 李明隆, 谭秀成, 苏成鹏, 芦飞凡, 张本健, 潘政屹, 肖笛. 2020. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组砂糖状白云岩特征及成因机制——以广元上寺剖面为例[J]. *地质论评*, 66(3): 591–610.
- 李亚非. 2018. 山西砖窑沟矿区冶镁白云岩矿床特征[J]. *矿产勘查*, 9(6): 1212–1216.
- 厉建华, 胡福培. 2009. 江苏徐州贾汪大京山白云岩矿床特征及开发利用前景[J]. *地质学刊*, 33(3): 268–271.
- 刘昌寅, 褚强. 1993. 白云岩的开发与应用[J]. *中国矿业*, (4): 17–21.
- 刘丽红, 高永进, 王丹丹, 白忠凯, 张远银, 韩森. 2021. 塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐下白云岩储层的影响[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 109–120.
- 刘丽红, 韩森, 高永进, 张远银, 刘成鑫, 段野, 杨有星, 姜鹏鹏. 2023. 塔西北地区寒武系肖尔布拉克组储层发育主控因素及成岩演化过程——以柯坪南 1 井为例[J]. *天然气地球科学*, 34(5): 763–779.
- 刘丽红, 王春连, 李丽霞, 杜治利, 唐跃, 韩森. 2020. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马六段白云岩特征及形成机制研究[J]. *中国地质*, 47(3): 810–820.
- 钱一雄, 储呈林, 李曰俊, 张庆珍, 李王鹏, 杨鑫. 2021. 新疆若羌县红柳沟新元古界平洼沟组原生白云岩特征、沉积环境及年代厘定[J]. *石油与天然气地质*, 42(3): 570–586.
- 冉隆辉. 2006. 论四川盆地天然气勘探前景[J]. *天然气工业*, 26(12): 42–44.
- 宋澄尘. 2020. 湖北当阳三桥大沟建材用灰岩-白云岩矿床地质特征及加工技术性能[J]. *西部资源*, (3): 10–12.
- 万友利, 王剑, 付修根, 王东. 2020. 羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪[J]. *石油与天然气地质*, 41(1): 189–200.
- 王会林. 2020. 平定县东回镇冶镁白云岩工业价值分析[J]. *华北自然资源*, (2): 48–49.
- 吴世强, 陈凤玲, 姜在兴, 孔祥鑫, 陈晨, 管文静. 2020. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. *石油与天然气地质*, 41(1): 201–208.
- 谢全良, 李锋, 马彩琴. 2001. 酒西盆地鸭儿峡油田志留系潜山油藏地质特征及油水分布[J]. *特种油气藏*, 8(4): 5–7.
- 杨合群, 艾宁, 毛自力, 武丹. 2015. 宁夏白云岩冶镁史话[J]. *西北地质*, 48(3): 139.
- 张曼, 吴小斌, 闫宝华, 吴松, 孟庆泉, 方小敏, 宋春晖. 2012. 塔里木盆地西北缘乌恰地区晚白垩世—渐新世微相分析及沉积演化[J]. *沉积学报*, 30(3): 501–510.
- 张永生, 侯献华, 张海清, 杨玉卿. 2006. 江汉盆地潜江凹陷上始新统含盐岩系准原生白云岩的沉积学特征与形成机理[J]. *古地理学报*, 8(4): 441–455.