

doi: 10.12029/gc20231215002

廖紫慧, 王春连, 黄可可, 许亚鑫, 游超, 陈振红. 2025. 中国高岭土矿床的分布、类型、应用及找矿远景[J]. 中国地质, 52(4): 1230–1246.

Liao Zihui, Wang Chunlian, Huang Keke, Xu Yaxin, You Chao, Chen Zhenhong. 2025. Distribution, types, applications and prospecting of kaolin deposits in China[J]. *Geology in China*, 52(4): 1230–1246(in Chinese with English abstract).

# 中国高岭土矿床的分布、类型、应用及找矿远景

廖紫慧<sup>1,2,3</sup>, 王春连<sup>3</sup>, 黄可可<sup>1,2</sup>, 许亚鑫<sup>1,2</sup>, 游超<sup>3,4</sup>, 陈振红<sup>3,5</sup>

(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. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100)

**摘要:**【研究目的】高岭土作为一种非金属矿产资源, 是世界上最重要的矿藏之一, 在陶瓷、橡胶、生物医药等多领域具有重要的价值, 然而随着其应用领域拓展, 中国面临高岭土价格不断上涨、深加工和利用存在技术瓶颈以及优质资源高度依赖进口等问题。因此, 对高岭土矿的分布、成因类型、成矿规律及加工与应用方面的研究显得尤为重要。【研究方法】本文根据已公开发表或出版的高岭土矿产资料, 综合整理了各种类型中典型的高岭土矿床特征、当前利用情况以及未来应用前景。【研究结果】全球高岭土资源丰富, 探明储量大约 320 亿 t, 美国、英国、巴西、中国等 60 多个国家和地区拥有高岭土资源。中国有 26 个省(直辖市、自治区)产出高岭土矿。高岭石族矿物可分为高岭石、埃洛石、地开石和珍珠陶土。中国高岭土矿床类型通常被分为风化型、热液蚀变型和沉积型三类, 进一步划分为 6 个亚型, 在最新的研究中将高岭土矿床分为 4 种成因类型、8 种成因亚型以及 12 种矿床类型。高岭土作为我国的“关键矿产”广泛应用于环保、新能源、新材料等战略性新兴产业和传统领域。【结论】高岭土矿床的形成受到多因素的影响, 主要受沉积环境、成母岩以及大地构造演化等综合控制, 同时还受到气候、成岩后生作用等影响。华北陆块成矿省、扬子成矿省和华南成矿省是中国高岭土重要的成矿远景区。高岭土未来的开发方向包括改进加工工艺、表面改性、去除有害杂质、纳米技术和抗菌材料技术等方面。

**关键词:** 高岭土矿; 分布情况; 矿床类型; 成矿规律; 加工与应用; 矿产勘查工程

**创 新 点:** (1) 总结了高岭土的成矿规律并进一步分析我国的找矿潜力; (2) 总结高岭土的类型与分布情况、开采加工方法以及作为关键矿产在各种新兴产业中的应用, 进一步分析高岭土未来的应用前景, 优化我国高岭土资源配置。

中图分类号: P619.232    文献标志码: A    文章编号: 1000-3657(2025)04-1230-17

## Distribution, types, applications and prospecting of kaolin deposits in China

LIAO Zihui<sup>1,2,3</sup>, WANG Chunlian<sup>3</sup>, HUANG Keke<sup>1,2</sup>, XU Yaxin<sup>1,2</sup>, YOU Chao<sup>3,4</sup>,  
CHEN Zhenhong<sup>3,5</sup>

(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

收稿日期: 2023-12-15; 改回日期: 2024-06-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005, KK2322)和中国地质调查局项目(DD20230056, DD20190606, DD20221684, DD20230291)联合资助。

作者简介: 廖紫慧, 女, 2000 年生, 硕士生, 主要从事沉积学方面研究; E-mail: 1732952602@qq.com。

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

Beijing 100037, China; 4. School of Earth and Space Science, Peking University Beijing 100871, China; 5. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China)

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

**[Objective]** Kaolin, as a non-metallic mineral resource, is one of the most important and abundant mineral deposits in the world, which has important value in many fields such as ceramics, rubber, biomedicine, etc. However, with the expansion of its application fields, China is facing challenges such as rising kaolin prices, technological bottlenecks in deep processing and utilization, and high dependence on imported high-quality resources. Therefore, it is particularly important to study the distribution, genesis type, metallogenic regularity and processing and application of kaolin. **[Methods]** Based on the published or released kaolin mineral data, this paper comprehensively sorts out the characteristics, current utilization and future application prospects of typical kaolin deposits in various types. **[Results]** Global kaolin resources are abundant, with proven reserves of about 32 billion tons, with kaolin resources in more than 60 countries and regions such as the United States, the United Kingdom, Brazil, China, etc., and kaolin minerals have been found in 26 provinces (cities and districts) in China. Kaolinite minerals can be divided into kaolinite, halloysite, dickite and pearl clay. The types of kaolin deposits in China are usually classified into weathering, hydrothermal alteration and sedimentary types, which are further divided into 6 subtypes, and in the latest research, kaolin deposits are classified into 4 genesis types, 8 genesis subtypes and 12 deposit types. As a "key mineral" in China, kaolin is widely used in environmental protection, new energy, new materials, biomedicine and other strategic emerging industries and traditional fields. **[Conclusions]** The formation of kaolin deposits is affected by many factors, mainly by the comprehensive influence of sedimentary environment, ore-forming host rock and geotectonic evolution, and also by the influence of climate and lithogenic afterlife. The North China land mass metallogenic province, Yangzi metallogenic province and South China metallogenic province are important mineralization prospect areas for kaolin in China. The future development direction of kaolin includes improvement of processing technology, surface modification, removal of harmful impurities, nanotechnology and antimicrobial material technology.

**Key words:** kaolin deposits; distribution; deposit types; metallogenetic regularity; processing and application; mineral exploration engineering

**Highlights:** (1) The metallogenetic regularity of kaolin was summarized, the potential for finding minerals in China was further analyzed. (2) The types and distribution of kaolinite, the mining and processing methods, and the application of kaolinite as a key mineral in various emerging industries were summarized, and the future application prospects of kaolinite to optimize the allocation of kaolinite resources in China were further analyzed.

**About the first author:** LIAO Zihui, female, born in 2000, master candidate, mainly engaged in sedimentology; E-mail: [1732952602@qq.com](mailto:1732952602@qq.com).

**About the corresponding author:** WANG Chunlian, male, born in 1983, doctor, researcher, mainly engaged in sedimentology and mineral deposit research; E-mail: [wangchunlian312@163.com](mailto:wangchunlian312@163.com).

**Fund support:** Supported by Basic Research Funds for Public Welfare Research Institutes at the Central Level (No.KK2005, No.KK2322) and the projects of China Geological Survey (No.DD20230056, No.DD20190606, No.DD20221684, No.DD20230291).

## 1 引言

高岭土(Kaolin),其命名渊源于景德镇市东面 45 km 的高岭村,是高岭石族矿物达到可利用含量的黏土或黏土岩,其主要矿物为高岭石、埃洛石、蒙脱石、伊利石、叶蜡石等黏土矿物以及石英、长石等非黏土伴生矿物(郑直等, 1980; Murray, 2006; Nzeugang et al., 2018)。高岭土不仅是一种宝贵的

资源,还是中国文明和历史的传承载体,在中国人民的经济史及与世界人民的友好交往史上皆具有重要的地位,在中国陶瓷史、中国矿业开发史上都有着浓墨重彩的一笔。同时,高岭土也被认为是世界上最重要的矿藏之一(Chen et al., 1997),其优异的物理化学性质(分散性、吸附性、耐高温等)使其具有巨大的工业消耗(Boulis and Attia, 1994; Murray, 2006; Dill et al., 2016; Pruett, 2016)。高岭

土在多个领域有广泛应用,主要包括造纸、陶瓷和耐火材料等行业;其次,它也被用作涂料、橡胶填料、搪瓷釉料和白水泥的原料;此外,还有一小部分用于塑料、油漆、颜料、化妆品、农药、生物医药、石油、建材和国防等工业领域(Murray, 2000; 冯雪茹等, 2022)。

中国是最早发现和利用高岭土的国家,其应用范围广泛且持续扩展,需求量逐年增长。“十四五”期间,我国提出“碳达峰、碳中和”的规划目标,倡导大力发展新能源产业以减少碳排放量,高岭土作为我国的优势非金属矿产,被划为战略性新兴产业中的“关键矿产”(王登红, 2019; 陈正国等, 2021)。但由于高岭土属于不可再生资源,加上我国高岭土在深加工和综合利用方面存在技术瓶颈,优质资源高度依赖进口,随着应用领域拓展,出现资源紧缺,价格上升的情况。在新形势下,高岭土资源的深加工和新产品的开发,以及应用高科技、新技术对高岭土矿的高效益综合利用,是确保资源安全和促进经济可持续高质量发展的关键。同时,虽然中国高岭土资源较为丰富,研究学者对高岭土矿床成矿规律研究较早,但仍缺乏综述性的研究。因此,本文通过收集国内外数据,总结前人的研究结果,归纳分析中国高岭土矿床的地质特征、矿床成因和分布以及开发利用现状,为今后我国高岭土区域矿产勘查工作提供一定的理论参考。同时,通过了解高岭土材料的多功能改性,进一步总结高岭土的应用前景,以期从宏观和微观角度充分发挥其在多个领域

的应用价值。

## 2 高岭土分布情况及矿床类型

### 2.1 中国高岭土矿床类型划分

高岭土作为一种重要的非金属矿产资源,其分类随着科学技术的发展而不断进步和完善。在早期阶段(19 世纪末之前),高岭土分类主要基于其矿物学特征,如颜色、硬度和可塑性等,将高岭石族矿物,分为高岭石、地开石、珍珠陶土以及埃洛石(表 1; 夏琤, 1981; Tan et al., 2014)。在自然界中,高岭石是高岭土矿床中分布最广的组成矿物,而地开石和珍珠陶土相对稀少(李晓光, 2018)。

20 世纪 80 年代至 21 世纪初,学者们在对高岭土进行分类时综合考虑其矿物学、成因、化学成分等多方面因素,形成更为全面的分类体系,郑直等(1983)将中国高岭土矿床根据主要成矿作用划分为风化型、热液蚀变型和沉积型三种矿床类型以及 6 个亚类型(表 2);后有学者考虑到高岭土矿的原始成矿物质(陶维屏等, 1985),将高岭土矿床分为 10 种类型:(1)酸性脉岩(石英斑岩、细晶岩)风化型高岭土矿床;(2)花岗岩或混合片麻岩风化残积型高岭土矿床;(3)长石石英砂岩风化型高岭土矿床;(4)中酸性火山岩单纯风化型或热液蚀变叠加风化型高岭土矿床;(5)花岗岩体边缘混合岩蚀变风化型高岭土矿床;(6)古喀斯特岩溶淋滤充填或填充叠加蚀变型高岭土矿床;(7)酸性凝灰岩蚀变型高岭土矿床;(8)含硫热泉蚀变型高岭土矿床;(9)煤系沉积型

表 1 高岭石族矿物主要类型

Table 1 Major types of kaolinite group minerals

| 高岭石族矿物 | 组成                                | 形状                               | 成因                                                                                                                                      | 其他                                  |
|--------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 高岭石    | 由一个Si-O四面体和一个Al(O, OH)八面体层组成,三斜晶系 | 单晶多为假六方板状或书册状,多以蠕虫、手风琴状或鳞片状集合体产出 | 一般形成于风化、热液和沉积环境中,根据颗粒形态、结晶程度、围岩性质等可分为自生高岭石、蚀变高岭石以及煤系地层中的高岭石(徐宁宁等, 2022)<br>①低温热液作用有关(120~160℃);<br>②在沉积岩成岩的晚期与较强的应力条件有关;③需要充足的水介质,即高水岩比 | 是含煤岩系中分布最广、含量最丰富的共生黏土矿物(张慧, 1992)   |
| 珍珠陶土   | 由6个高岭石构造层形成一个单位层,单斜晶系             | 常呈假六方形鳞片状                        | ①主要是成岩作用产物,即由热液沉淀矿物直接从热液中沉淀;②由高岭石转变而成                                                                                                   | 多以带状或不规则状穿插在高岭石、地开石矿中(夏琤和张宁克, 1986) |
| 地开石    | 由两层高岭石层状结构形成一个单位层为多型变体,单斜晶系       | 常见土状块体,晶体为片状                     | ①中酸性火成岩风化分解、②高岭石转化为沉积成因(王祖福等, 1987; 赵飞等, 2019)                                                                                          | 常与石英、硫化物等共生,常作为次生黏土充填砂岩孔隙、煤层和晶洞     |
| 埃洛石    | 根据水合程度的不同分为10Å埃洛石、7Å埃洛石           | 呈管状                              |                                                                                                                                         | 常见高岭石和埃洛石相伴生                        |

表 2 高岭土矿床的成因类型 ( 郑直等, 1983 )

| Table 2 Genesis types of kaolin deposits (after Zheng Zhi et al., 1983) |        |              |                 |                  |                               |                |
|-------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|-----------------|------------------|-------------------------------|----------------|
| 矿床类型                                                                    | 主要矿物   | 伴生矿物         | 成矿原岩            | 矿床规模             | 中国典型矿床                        | 世界典型矿床         |
| 风化型                                                                     | 风化残积亚型 | 高岭石、埃洛石      | 石英、长石、云母等       | 富含长石和黏土质的岩石      | 中、小型为主, 少数为大型, 个江西星子、湖南衡阳别特大型 | 美国、巴西          |
|                                                                         | 风化淋积亚型 | 埃洛石          | 三水铝石、明矾石、水铝英石等  | 含黄铁矿黏土岩石         | 小型                            | 四川叙永、湖南辰溪      |
| 热液蚀变型                                                                   | 热液蚀变亚型 | 高岭石、地开石、珍珠陶土 | 石英、绢云母、黄铁矿、明矾石等 | 中酸性火山岩和火山碎屑岩     | 规模较小, 个别江苏观山高岭土矿、吉林磐石新立屯      | 澳大利亚、新西兰       |
|                                                                         | 热泉蚀变亚型 | 高岭石          | 蛋白石、石英、明矾石等     | 花岗质岩石            | 小型                            | 云南腾冲、西藏羊八井     |
| 沉积型                                                                     | 煤系沉积亚型 | 高岭石          | 水铝石、勃母石、石英      | 含高岭土陆源物或富含硅铝的火山灰 | 中—大型                          | 陕西府谷海则庙、山东临淄金岭 |
|                                                                         | 碎屑沉积亚型 | 高岭石          | 埃洛石、伊利石         | 一般为周围的花岗岩类岩石     | 小—大型                          | 广东清源、广东燕子窝     |

高岭土矿床; (10) 河湖、滨海碎屑沉积型高岭土矿床。近年来, 随着高岭土的应用和研究范围不断扩大, 程宏飞等(2023)将矿床的形成作用作为主要因素, 采用母岩类型(或成矿原始物质来源)+形成作用+矿石类型的复合命名原则, 将高岭土矿床分为 4 种成因类型、8 种成因亚型以及 12 种矿床类型, 在现有的 6 个矿床类型基础上增加了风化残积亚型木节土矿床、富长石砂(岩)风化残积亚型砂质高岭土矿床、变高岭岩风化残积亚型水铝英石—埃洛石—高岭土矿床、降落火山碎屑沉积成岩亚型、变高岭岩亚型矿床和(热)流体蚀变亚型砂岩型高岭土矿床 6 个新的矿床类型(表 3), 在现有的矿床类型基础上增加了新的矿床类型, 拓展了高岭土矿床的分类范围, 有助于更好地评估和保护高岭土资源。

2.2 典型矿床类型分述

值得注意的是, 高岭土矿床形成于各种含高岭

石的岩石中, 其成因类型往往不是单一的, 而是复合的, 需要综合考虑矿物学、地质学、化学、物理特性、工业应用、地理分布、环境因素、技术发展、国际标准和经济价值等多个方面的因素。目前, 国内外学者针对高岭土矿床分类尚未形成一个统一的标准, 本文将根据郑直等(1983)、程宏飞等(2023)的矿床分类对高岭土矿床进行综述。

2.2.1 风化型高岭土矿床

风化残积亚型高岭土矿床多受到构造运动的影响, 通常分布于中生代, 如燕山期、印支期, 在古生代的加里东期也有分布。其成矿一般是在岩浆演化作用过程中, 构造运动使得地幔物质上涌形成富铝质岩浆(花岗岩), 岩浆结晶晚期与围岩发生接触交代作用, 发生气化热液交代蚀变, 如钠长石化、白云母化、电气石化。岩体上部多蚀变为云英岩或白云母(绢云母)钠长石化花岗岩, 而后在温暖潮湿

表 3 我国高岭土矿床的成因类型 ( 程宏飞等, 2023 )

| Table 3 The genesis types of kaolin deposits in China (Cheng Hongfei et al., 2023) |           |                            |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------|--------------------------|
| 成因类型                                                                               | 成因亚型      | 矿床类型                       | 矿床实例                     |
| 风化型                                                                                | 风化残积亚型    | 风化残积亚型砂质高岭土矿床              | 湖南衡阳界牌、广西合浦              |
|                                                                                    |           | 风化残积亚型木节土矿床                | 内蒙古老石旦、山西平朔              |
|                                                                                    |           | 富长石砂(岩)风化残积亚型砂质高岭土矿床       | 广东茂名                     |
|                                                                                    |           | 变高岭岩风化残积亚型水铝英石—埃洛石—高岭土矿床   | 山西浑源、内蒙古清水河、甘肃华亭         |
| 沉积型                                                                                | 风化淋积型     | 风化淋积亚型埃洛石矿床                | 四川叙永、湖南辰溪、山西阳泉           |
|                                                                                    | 沉积亚型      | 陆源沉积亚型球黏土矿床                | 广西南宁、吉林水曲柳               |
|                                                                                    | 沉积—成岩亚型   | 陆源碎屑及胶体化学沉积成岩亚型高岭土矿床       | 辽宁本溪、河北开滦、山东淄博、河南焦作、安徽淮北 |
|                                                                                    |           | 降落火山碎屑沉积成岩亚型               | 内蒙古大青山、山西大同              |
| 热液蚀变型                                                                              | 热液蚀变亚型    | 热液蚀变亚型高岭土矿床                | 江苏苏州阳西、河北张家口             |
|                                                                                    | 现代热泉蚀变亚型  | 现代热泉蚀变亚型高岭土矿床              | 云南腾冲、西藏羊八井               |
|                                                                                    | (热)流体蚀变亚型 | (热)流体蚀变亚型砂岩型高岭土矿床          | 内蒙古东胜、青海大通               |
| 烧变型                                                                                | 变高岭岩亚型    | 变高岭岩亚型矿床和(热)流体蚀变亚型砂岩型高岭土矿床 | 山西大同、河曲、浑源               |



的丘陵—低山地貌环境下,受到气候、地貌和水介质条件等影响加速风化而成(图 1a;周国平和林毓川, 1991;聂晓亮和汪龙飞, 2020;吴宇杰, 2021)。如湖南衡阳界牌高岭土矿床,其为风化残积亚型砂质矿床,处于燕山早期白石峰二云母花岗岩与前震旦系五强溪组凝灰质板岩、千枚岩的接触带上,受到热液蚀变发生硅化、钠长岩化以及高岭土化等,再加上后期强烈的风化而形成高岭土矿床(图 1b)。矿床呈似层状产出,走向北东、倾向北西,倾角  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,高岭土族矿物以片状高岭土以及管状埃洛石为主,高岭土的  $\text{SiO}_2$  含量高(65%~70%),而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较低(18%~24%),为“富硅高岭土”,是中国最著名的制瓷产地之一(方邳森等, 1988)。

风化淋积亚型主要受成矿原岩和其下部的酸盐岩层控制,后期常受地表水及地下水的淋滤改造作用影响,典型矿床如四川叙永式高岭土矿床以及湖南辰溪仙人湾埃洛型高岭土矿床(关铁麟, 1982;

张术根等, 2006)。

## 2.2.2 沉积型高岭土矿床

沉积型高岭土矿床典型成矿模式(图 2)一般为高岭石类矿物经机械搬运,分选聚集于滨海湖沼、河漫滩等地,或成煤期化学风化物  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在含有机酸的水介质中携带物质到达盆地,经胶体沉积物重结晶形成高岭石,一般含 80%~90% 以上的高岭石,如山东临淄金岭高岭土矿区。该类型分为碎屑沉积亚型和煤系沉积亚型高岭土矿床(焦丽香等, 2021)。

碎屑沉积亚型多沉积在地势平坦的河谷盆地,该矿床分布较少,主要在福建、广东等地区第四系上更新统河流相冲积层中,在华北、东北、西北地区也有分布,矿体呈似层状、透镜状。高岭土通常有机质含量高,具有良好的可塑性和较强的结合力,广东遂溪燕子窝高岭土矿床为其典型矿床。

煤系沉积亚型常形成于沉积旋回上部,与煤系

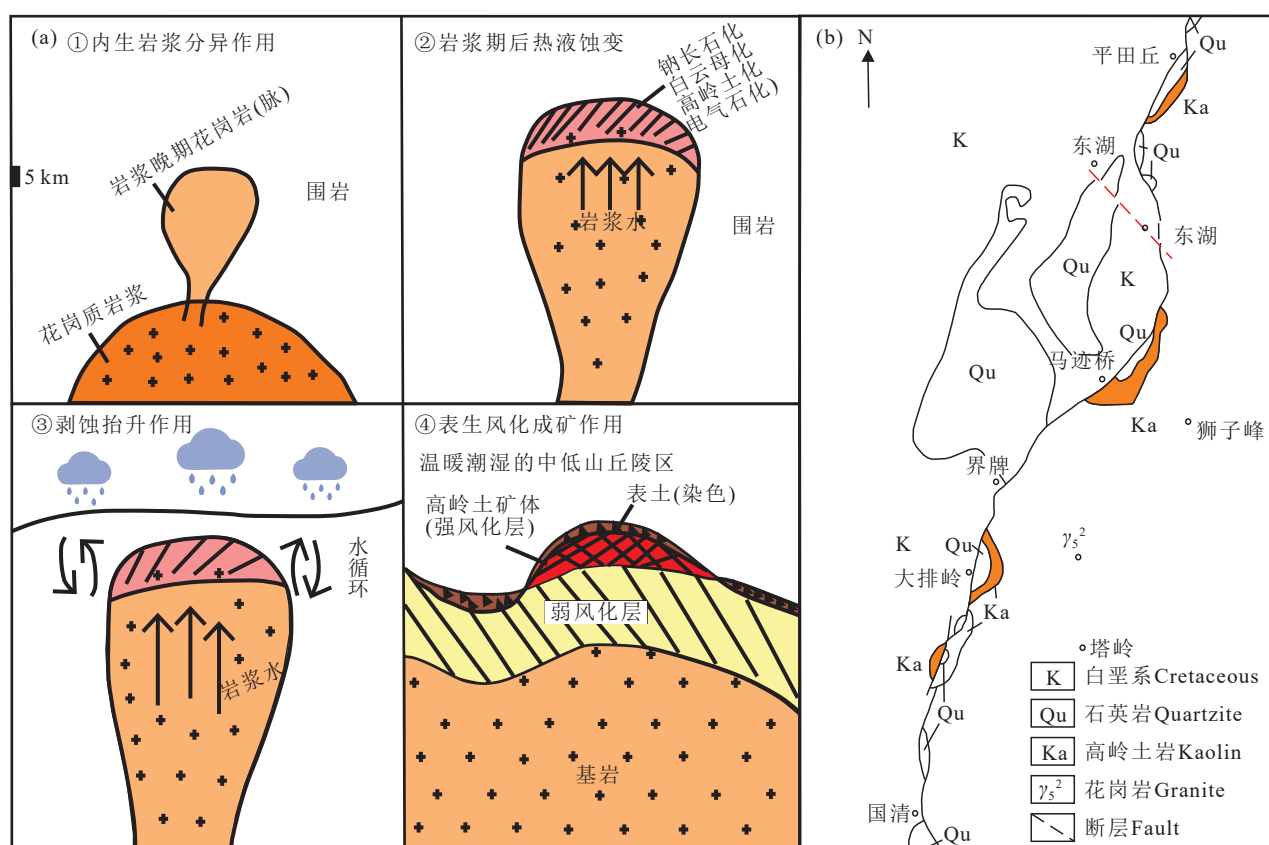


图 1 风化残积亚型高岭土矿床典型成矿模式图(a, 据聂晓亮和汪龙飞, 2020)、湖南衡阳界牌高岭土矿床地质图(b, 据吴宇杰, 2021)

Fig.1 Typical mineralization pattern of weathered residual subtype kaolinite deposits (a, after Nie Xiaoliang and Wang Longfei, 2020); Geologic map of the Jiepai kaolin deposit, Hengyang, Hunan, China (b, after Wu Yujie, 2021)

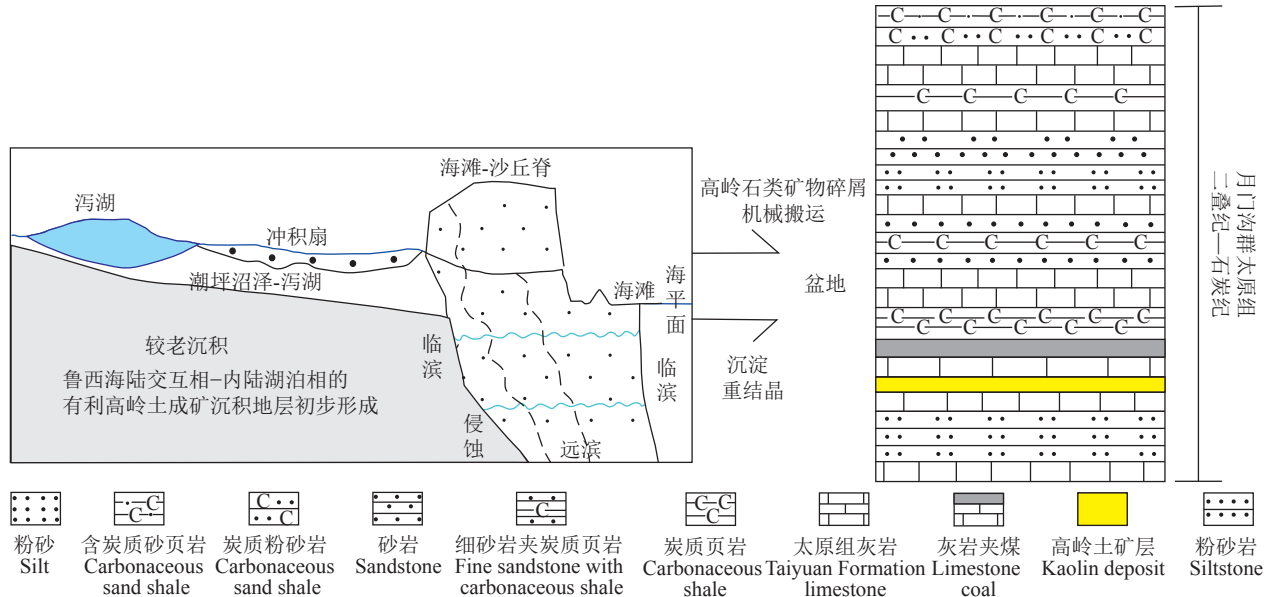


图 2 沉积型高岭土矿床成矿模式图(据焦丽香等, 2021)

Fig.2 Mineralization pattern of sedimentary kaolin deposits (after Jiao Lixiang et al., 2021)

地层和铝土矿层伴生,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 具有较高的耐火度, 常作含煤地层中煤层和岩层的对比标志(赵世煌等, 2015)。煤系高岭土是中国的特有资源, 多分布于我国北方中西部地区, 如内蒙古准格尔、清水高岭土矿床、陕西省府谷县高岭土矿床, 均有我国优质煤系高岭土分布区。程宏飞等(2023)根据成岩的不同物质来源又将煤系沉积亚型高岭土进一步细分为陆源碎屑及胶体化学沉积成岩亚型高岭土矿床及降落火山碎屑沉积成岩亚型高岭岩矿床。陆源碎屑及胶体化学沉积成岩亚型高岭土矿床是由通常用作耐火材料的硬质黏土、软质黏土以及半软质黏土集合而成; 降落火山碎屑沉积成岩亚型高岭岩矿床成岩物质主要来源于降落火山碎屑物质, 常分布于煤层夹矸及煤层顶、底板, 如我国华北石炭纪—二叠纪聚煤盆地的大同煤田、大庆山煤田等中的非夹矸型高岭土矿层, 该类型矿床质量优、厚度大、分布较广且可运用于耐火材料、陶瓷、塑料等多个领域, 具有较大的开发潜力(梁绍暹等, 1995)。中国煤系高岭土储量为 16.73 亿 t, 将成为我国开发利用的重点(吴宇杰, 2021)。

### 2.2.3 热液蚀变型高岭土矿床

热液蚀变型高岭土矿床是与岩浆侵入、火山喷发等活动有关的热液作用于各种成矿原岩而形成

的, 不能单独成矿, 常与金属矿或非金属矿伴生, 与叶蜡石化、硅化、绢云母化以及黄铁矿化、明矾石化等共存, 多分布在我国华东和东北地区。

热液蚀变亚型高岭土矿床受构造条件影响较大, 常分布在断裂带附近, 矿床品位高、块状分布, 其典型成矿模式(图 3)为晚侏罗世燕山期火山岩大量喷发, 岩浆沿断裂构造上侵, 而岩浆活动又导致热液活动的发生, 进一步作用于成矿原岩(围岩), 产生围岩蚀变形成高岭土矿, 下部成矿原岩(如大理岩化灰岩等)发育的岩溶活动使高岭土矿体进一步淋滤富集(李灿华和范斯, 1988; 丁世辉, 1996), 如苏州观山、阳西高岭土矿床。

热泉蚀变亚型多分布在地热资源丰富的火山和热泉环境下, 矿床呈块状和层状分布(郑直等, 1987)。典型矿床如云南腾冲、西藏羊八井高岭土矿床。

(热)流体蚀变亚型砂岩型高岭土矿床为较新发现的类型, 其形成主要是富长石砂岩经淋蚀变成长石风化强的砂岩型风化壳, 再由流体作用(如油气流体、热流体、富腐殖酸流体等)蚀变转变成高岭石而成的砂岩型高岭土矿床, 在鄂尔多斯盆地东北缘东胜地区, 陕甘宁盆地中、东部, 塔里木盆地等地区较为典型(曹剑等, 2005; 张龙等, 2017; 程宏飞等, 2023)。该类型矿床储量较大, 具有较好的勘探前

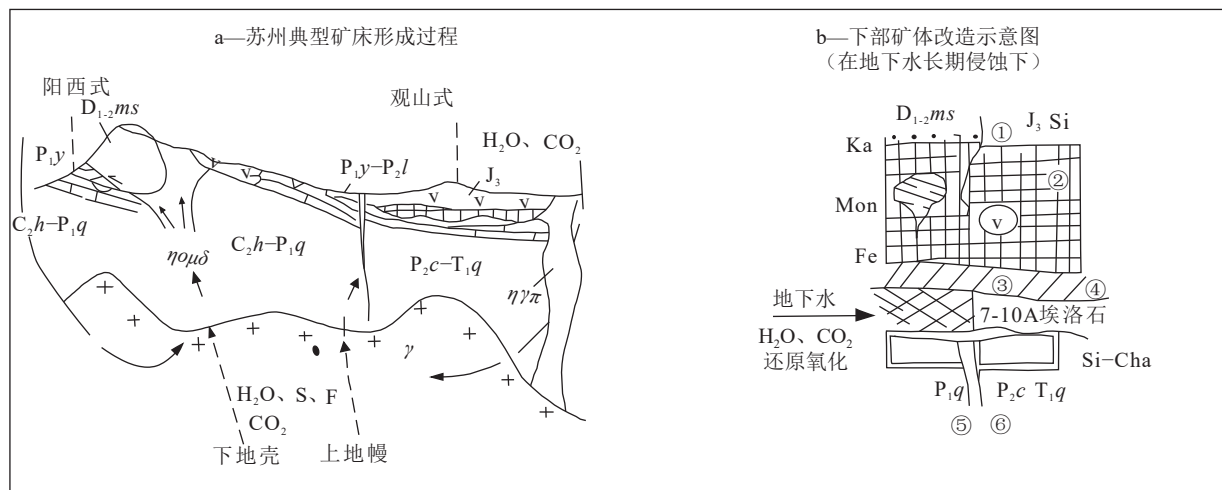


图3 热液蚀变型高岭土矿床成矿模式图(据丁世辉, 1996)

$D_{1-2}ms$ —下—中泥盆统蟒山组;  $P_1q$ —下二叠统栖霞组,  $P_{1y}$ —下二叠统茅口组,  $P_2l$ —上二叠统龙潭组;  $T_1q$ —下三叠统青龙群;  $J_3$ —上侏罗统;  $C_2h-P_1q$ —上石炭统黄龙组—下二叠统栖霞组;  $P_2c-T_1q$ —上二叠统长兴组—下三叠统青龙群;  $P_{1y}-P_2l$ —下二叠统茅口组—上二叠统龙潭组; Si—硅化; Cha—玉髓岩; Ka—高岭土; V—明矾石; Mon—蒙脱石; Fe—菱铁矿(褐铁矿);  $\eta\gamma\pi$ —二长花岗斑岩;  $\eta\mu\delta$ —石英二长闪长玢岩; ①—硅化带; ②—高岭石(明矾带)化带; ③—褐铁矿埃洛石化; ④—蒙脱石(菱铁矿)化带; ⑤—石英(玉髓)岩化带; ⑥—大理岩化带

Fig.3 Ore-forming model of hydrothermal altered kaolin deposit (after Ding Shihui, 1996)

$D_{1-2}ms$ —Lower-Middle Devonian Series Mangshan Formation;  $P_1q$ —Lower Permian Series Qixia Formation;  $P_{1y}$ —Lower Permian Series Maokou Formation;  $P_2l$ —Upper Permian Series Longtan Formation;  $T_1q$ —Lower Triassic Series Qinglong Group;  $J_3$ —Upper Jurassic Series;  $C_2h-P_1q$ —Upper Carboniferous Series Huanglong Formation—Lower Permian Series Qixia Formation;  $P_2c-T_1q$ —Upper Permian Series Changxing Formation—Lower Triassic Series Qinglong Group;  $P_{1y}-P_2l$ —Lower Permian Series Maokou Formation—Upper Permian Series Longtan Formation; Si—Silicification; Cha—Chalcedony; Ka—Kaolin; V—Alumina; Mon—Montmorillonite; Fe—Limonite (ironite);  $\eta\gamma\pi$ —Dioritic granite porphyry;  $\eta\mu\delta$ —Quartz dioritic sapolite; ①—Silicified zone; ②—Kaolinite (alumina zone) zone; ③—Limonite eclogite zone; ④—Montmorillonite (rhodochrosite); ⑤—Quartz (chalcedony) zone; ⑥—Marble zone

景,但对于该类型矿床的认识仍存在一定分歧,有待进一步研究。

#### 2.2.4 烧变型高岭土矿床

有学者将烧变型高岭土划分为高岭土(岩)矿床中的一种特殊类型,具有较广泛的用途。烧变型高岭土矿床通常形成于煤系地层中,其形成过程主要是在煤层自燃热力作用或与煤层有关的热事件中,高岭岩发生烧变而成,变高岭岩亚型矿床在地表风化作用下可以形成埃洛石、高岭石等矿物(床),但目前只在山西大同、河曲以及浑源等地区发现,且矿床规模小,具有一定的开发以及经济价值,目前对该类型的定义及研究较少,存在争议(程宏飞等, 2023)。

#### 2.3 高岭土矿床的分布情况

全球高岭土资源丰富,探明储量大约在 320 亿 t,拥有高岭土资源的国家和地区有 60 多个,包括美国、英国、中国、印度、巴西、澳大利亚等(表 4, 图 4; USGS, 2023<sup>①</sup>)。美国佐治亚—南卡罗来纳地区是全球主要的高岭土产地,查明资源量约为 14 亿 t (Prasad et al., 1991)。巴西拥有世界上最好的层状

沉积型高岭土矿床,分布在阿马帕州、亚马孙州、帕拉州和圣保罗州等地(Sousa et al., 2007)。英国的高岭土主要集中在本国西南地区的花岗岩体中。印度的高岭土查明资源量为 27 亿 t,主要分布在喀拉拉邦、西孟加拉邦和拉贾斯坦等地。澳大利亚境内的高岭土矿床发育,分布在珀斯、斯旺河、昆士兰和南澳大利亚州。西班牙的高岭土查明资源量超过 1 亿 t,分布在卢戈、瓜达拉哈、拉科卢纳和瓦伦西亚等地(魏博等, 2020)。

中国高岭土分布广泛、资源丰富。高岭土矿床整体上主要分布在中国东部和南部地区,集中在中亚热带的江南山地和南亚热带的闽粤桂低山—平原区(聂晓亮和汪龙飞, 2020),其次分布在我国华东地区和东北地区,同时在西北地区也有分布(图 5)。据《2023 年中国矿产资源报告》及《2022 年全国矿产资源储量统计表》显示,截至 2022 年,中国有 20 个省(直辖市、自治区)产出高岭土矿,资源储量为 6.93 亿 t(表 5)。广西是高岭土储量最多的省,其次为江西、福建、广东、湖南、安徽、浙江、贵州、

表 4 世界主要国家或地区高岭土查明资源储量 ( USGS<sup>①</sup>, 2023 )

| Table 4 Kaolin mineral resources identified in major countries or regions of the world (USGS <sup>①</sup> , 2023) |          |       |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|----------|
| 国家或地区                                                                                                             | 查明资源量/亿t | 国家或地区 | 查明资源量/亿t |
| 美国                                                                                                                | 82       | 英国    | 35       |
| 中国                                                                                                                | 34.96    | 印度    | 27       |
| 独联体                                                                                                               | 25       | 巴西    | 23       |
| 保加利亚                                                                                                              | 7        | 澳大利亚  | 4.6      |
| 南非                                                                                                                | 2.55     | 西班牙   | 1.5      |
| 其他                                                                                                                | 77.39    | 世界总计  | 320      |

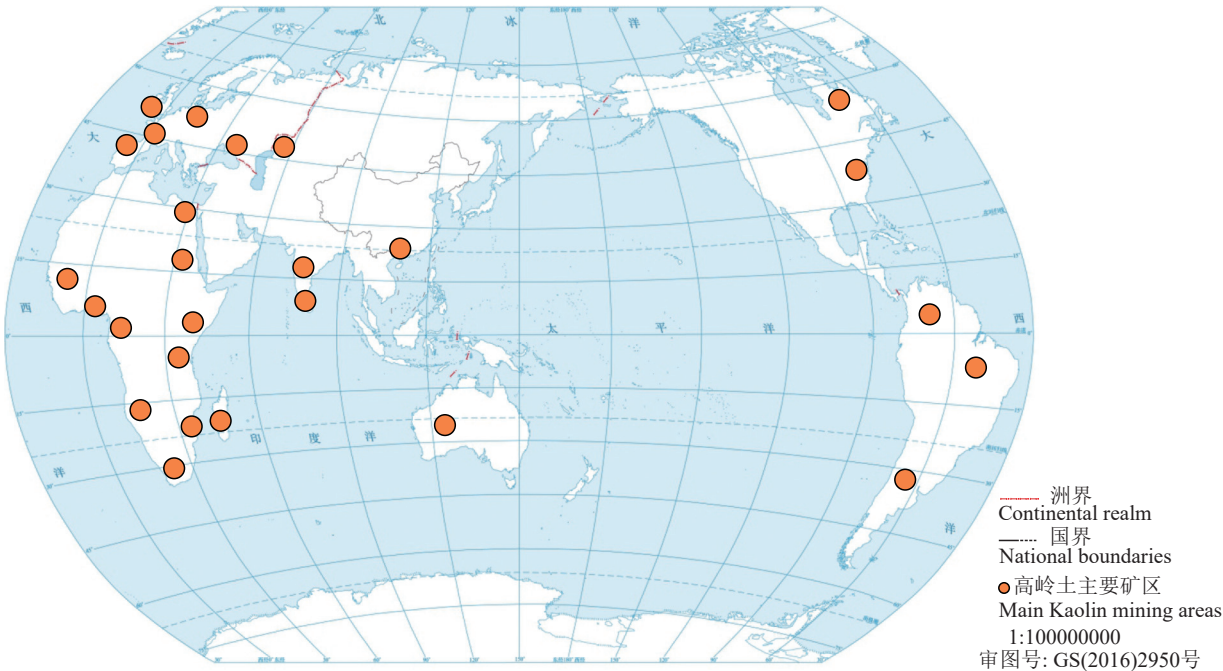


图 4 全球高岭土主要产地分布简图(USGS<sup>①</sup>, 2023)  
Fig.4 Map of the main global kaolin production areas (USGS<sup>①</sup>, 2023)

内蒙古、黑龙江等省区。我国高岭土矿床以中小型为主,截至 2021 年,发现高岭土矿床(点)1600 余处,其中特大型 30 处(分别位于广西、江西、广东和江苏等地),大型 127 处,中型 218 处、小型 735 处,矿点 562 处。

全球高岭土成矿时代主要为古生代、中生代和新生代,如英国康沃尔、巴西卡皮姆河、美国乔治亚和澳大利亚约克角半岛的高岭土矿床均形成于白垩—新近纪的沉积盆地中( Harvey and Murray, 1997; Bukalo et al., 2020)。高岭土矿床类型主要为沉积型高岭土矿床,美国东南部海洋沉积型高岭土矿床、巴西亚马逊东部卡皮姆高岭土矿以及南美洲国家东海岸和西非国家海岸附近的高岭土矿区均属于该类型矿床。我国高岭土矿床成矿时空分布

与中国大地构造演变有重要联系,其成矿时代主要分布于晚古生代—新生代,主要形成于石炭纪、二叠纪、三叠纪、古近纪、新近纪以及第四纪。新生代晚期至第四纪,特别是中新世至上新世,我国东部由于地处太平洋板块弧后带,再加上成矿母岩经历强烈的风化作用后形成了我国重要的高岭土成矿区(聂晓亮和汪龙飞, 2020);在我国北方,由于华北陆块的构造演化所形成的沉积体系以及湖沼泽环境为高岭土提供的较为理想的沉积环境,高岭土矿常形成于大陆边缘前海盆地或大陆内部盆地边缘(李炳云等, 2000)。中生代晚期至新生代早期,由于该时期剧烈的火山活动,大多数高岭土矿床赋存于环太平洋西带和华北地台北缘上侏罗统的火山岩中。





图5 中国高岭土矿床分布图(全国矿产地数据库, 2021<sup>[2]</sup>)

Fig.5 Distribution map of kaolin deposits in China (National Mineral Resources Database, 2021<sup>[2]</sup>)

### 3 高岭土矿的成矿要素及找矿潜力

#### 3.1 高岭土矿的成矿要素

高岭土矿床的形成主要受沉积环境、成矿母岩以及大地构造演化等多因素的综合影响,同时还受到气候、成岩后生作用等的影响。

##### 3.1.1 沉积环境

高岭土矿的形成受到沉积环境控制,沉积环境决定着高岭土矿的稳定和形成(张炳社等, 2013)。如云南腾冲沙坡高岭土矿床是在该区构造湖盆中形成了良好沉积环境,并在此过程中风化壳叠加水热蚀变作用形成涂布级优质高岭土矿床(吴宇杰, 2021)。陕西府谷地区高岭土矿床形成于不同的沉积环境,其主要赋存于中晚石炭世及早二叠世的煤系地层中,与煤矿共存,沉积环境分别为滨海湖泊、

三角洲间湾湖泊、三角洲平原湖泊以及曲流河岸后湖泊等,不同的沉积环境形成的矿石类型具有不同的特征(张炳社等, 2013)。

##### 3.1.2 成矿母岩

高岭土成矿原岩是影响其质量好坏的先决条件,如铁和钛等含量高的矿物易影响高岭土矿的自然白度,而铁含量低、硅铝含量高的酸性矿物如白云母花岗岩以及二云母花岗岩为原岩有益于形成优质高岭土矿床,如福建东宫高岭土矿床、广东沙尾高岭土矿床以及棠阴高岭土矿床等(周国平和林毓川, 1991; 姜智东等, 2019),由于电气石中铁含量较多,电气石化后的酸性—中酸性岩石也容易形成优质高岭土矿床,即由电气石化后的侵入岩如白云母花岗岩等经风化而形成高岭土矿床。江西赣南地区小坑高岭土矿床矿区内原岩为富含电气石的

表 5 2022 年中国高岭土矿资源储量统计  
Table 5 Statistics of kaolin mineral reserves in China in 2022

| 地区   | 主要地域 | 储量/万t    | 资源储量占比/% |
|------|------|----------|----------|
|      | 全国   | 69345.14 |          |
| 华北地区 | 内蒙古  | 803.42   | 1.15     |
|      | 合计   | 803.42   | 1.15     |
| 东北地区 | 辽宁   | 7.00     | 0.01     |
|      | 吉林   | 199.67   | 0.28     |
|      | 黑龙江  | 533.19   | 0.76     |
|      | 总计   | 739.86   | 1.05     |
| 华东地区 | 江苏   | 113.50   | 0.16     |
|      | 浙江   | 729.83   | 1.05     |
|      | 安徽   | 1017.19  | 1.46     |
|      | 福建   | 3330.57  | 4.80     |
|      | 江西   | 21111.09 | 30.4     |
|      | 山东   | 213.47   | 0.30     |
|      | 总计   | 26515.65 | 38.17    |
| 中南地区 | 河南   | 70.44    | 0.10     |
|      | 湖北   | 344.80   | 0.49     |
|      | 湖南   | 973.29   | 1.40     |
|      | 广东   | 4211.26  | 6.07     |
|      | 广西   | 34347.35 | 49.53    |
|      | 总计   | 39947.14 | 57.59    |
| 西南地区 | 四川   | 433.74   | 0.62     |
|      | 贵州   | 24.06    | 0.03     |
|      | 云南   | 695.72   | 1.00     |
|      | 总计   | 1153.52  | 1.65     |
| 西北地区 | 陕西   | 118.28   | 0.17     |
|      | 新疆   | 13.27    | 0.01     |
|      | 总计   | 133.15   | 0.18     |

白云母花岗质岩和二云母花岗质岩等是有利的成矿原岩,其经风化作用可形成优质高岭土矿(吴俊华等, 2023)。

3.1.3 构造演化条件

中国高岭土成矿总体上主要分布在东部,时间上大体上分布于中、新生代以及晚古生代,这与中国大地构造演化具有不可分割的联系。中国大陆板块东邻太平洋板块,东缘晚古生代近岸低地或浅海,中新世代以火山岛弧为主,晚中生代俯冲带向东运动,位于岛弧内部。风化型高岭土主要成矿于大陆内部弧后带,通常形成于较为稳定的地质环境中;热液型高岭土矿床通常形成于火山岛弧带;沉积型尤其是煤系高岭土矿床通常形成于陆缘浅海盆地以及陆内盆地边缘。同时构造运动造成的母岩破碎以及由于构造断裂发育形成的古岩溶系统也有利于高岭土成矿。

3.1.4 其他

气候条件对矿床的影响是多方面的,气候对

风化壳的类型及风化产物具有据决定性作用,从而影响了输送到沉积盆地的成矿物质种类,如在我国东南部地区亚热带季风气候为主,湿热多雨,植物茂密,富含腐殖质,使得水介质处于酸性和中酸性条件,如江西棠阴岩体电气石型高岭土矿床,在新生代时期区内碱性长石及云母类矿物等在酸性水介质中发生水解,向层状硅酸盐结构的高岭石等黏土矿物转变,同时风化作用纵向深部发育,形成了更厚的风化壳,有利于优质高岭土矿床的形成(姜智东等, 2019)。风化作用也是影响高岭土成矿的重要因素,其不仅对原岩进行物理风化,同时在缺少碱金属和碱土金属的酸性介质中进行化学风化作用也是转化为高岭土矿床的必要条件;风化淋滤作用也是高岭土白度高质量优的重要因素,如四川叙永的高岭土矿床。

3.2 找矿潜力

中国高岭土矿床分布十分广泛,高岭土矿床成矿远景区共 178 个,沉积型中煤系高岭土为开发的重点,其远景区有 109 个,资源量约为 608 亿 t,风化型和热液蚀变型高岭土矿有 69 个,预测资源量为 72.22 亿 t(阴江宁等, 2022)。中国高岭土矿床受构造控制较为明显,在划分的 16 个Ⅱ级成矿区带中,与高岭土有关的成矿区带有 14 个,其中以华北陆块成矿省、扬子成矿省和华南成矿省三个二级成矿单元高岭土矿分布最广(徐志刚等, 2008; 表 5)。华南成矿省中最典型的为风化型高岭土矿床,常形成于断裂带以及背斜构造的以灰岩为基底的溶洞中,其成矿远景区如闽西南凹陷带大田—龙岩凹陷次级构造南端的花岗岩风化残余亚型矿床,该区岩体风化壳内或者岩体山前平地均具有较大的成矿潜力;华北陆块成矿省囊括了中国 90% 的煤系高岭土,矿床通常分布在稳定的、海陆相交替的构造环境,如陕西北—内蒙古南部一带是重要成矿远景区,高岭土矿主要赋存于含煤层中;扬子成矿省主要以热液型高岭土为主,通常分布在不同方向构造的交汇处。如扬子—钱塘褶皱带东部,北接苏北拗陷,南邻华南地槽褶皱系,断裂构造发育有利于高岭土成矿,如江苏苏州的阳西式、观山式和通安式高岭土矿床均分布于此,未来仍具有较大的开发潜力。烧变型高岭土矿床的成矿远景区通常与煤系地层有关,因此,任何已知的煤系高岭土矿床均有

可能是烧变型高岭土矿床的潜在领域。如中国东北、西北等主要产煤区、准格尔煤系高岭土远景区以及徐州陈楼—马庄高岭土远景区等,但目前该类型高岭土矿床发掘较少,仍需通过进一步的地质调查研究来明确。

## 4 高岭土的加工、应用及需求前景

### 4.1 高岭土的开发

高岭土的开采方式主要有露天开采和地下开采。露天开采适用于规模小的矿山。地下开采一般采用分层崩落法,需注意地表陷坑的防水和崩落放顶问题。地形和地貌信息也可用于高岭土勘探工作,如巴西卡皮姆高岭土是由地质学家在勘察低海拔高原地区时首次发现的。在勘探方面,常利用地球物理调查和遥感技术收集有关潜在高岭土矿床的信息。Jarošová and Staněk(2021)成功对捷克某高岭土矿床进行空间建模,总结出高岭土矿床的3D模型方法,用于评估已开采和新发现的储量,并确定未来的开采地点。中国高岭土矿产的开发主要集中于中南和华东地区,西南和华北地区次之,东北和西北地区较少,开采方式以露天开采或联合开采为主。

### 4.2 高岭土的加工

世界上高质量的大型高岭土矿床较少,因此可以通过各种加工技术使高岭土矿成为各种工业应用的理想材料,最终面向不同的市场。高岭土矿石加工可分为三种基本类型:湿法、干法和热加工。

湿法加工如水选法、浮选法等主要用于造纸、特种和功能性填料应用的高岭土产品。干法加工如分级等通常用于陶瓷和玻璃纤维级产品。热处理如煅烧改性等主要用于特种陶瓷、油漆、耐火材料和造纸品级。中国高岭土加工技术主要包括选矿提纯(姜桂兰等, 2014)、表面改性(李新梅等, 2013; 刘建国, 2018)、插层改性(刘建国, 2018; 冯雪茹等, 2022)和剥片等(表 6; 乔炜等, 2007)。

### 4.3 高岭土在各行业的应用

高岭土的多功能性源于其自然形成的晶体形状、大小和层状结构,其理想的流变、化学和光学特性也为其作为工业原料赋予了重要的价值,如前所述,高岭土具有典型的二层状结构,有较大的比表面积和良好的吸附性能、较好的生物相容性,可塑性较高,离子吸附性强,同时高岭土具有天然的纳米片层结构、导热系数高,在我国储量丰富、价格低廉。高岭土广泛应用于环保、新能源、新材料、生物医药等对支撑战略性新兴产业和传统应用领域(Murray, 2000)。在环保领域中,主要应用于重金属污染水体、大气处理、二次资源利用、劣化油品处理等方面(Ganguly et al., 2020),在新能源领域,在建筑相变材料和太阳能储能材料中具有广泛的应用(仇影等, 2013; 陈祉如等, 2019)。在新材料领域的应用,主要应用于分子筛、有机插层材料、纳米材料、制备玻璃纤维、介孔氧化硅材料以及凝固增强材料(SCM)等(殷海荣等, 2006; 孙义高等, 2018; 詹培敏等, 2019; 孟宇航等, 2020),在生物医药领域,

表 6 中国高岭土主要成矿远景区分布(据吴宇杰, 2021; 阴江宁等, 2022)

| Table 6 Prospective areas for kaolin exploration in China (after Wu Yujie, 2021; Yin Jiangning et al., 2022) |                   |                   |                               |                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 预测类型                                                                                                         | 成矿省               | 主要矿集区             | 已开发典型矿床                       | 主要成矿远景区                                                 |
| 风化型                                                                                                          | 华南成矿省             | 粤西南—桂南风化残积型高岭土矿集区 | 合浦十字路、合浦县耀康、湛江市山岱、茂名市上垌等高岭土矿区 | 广西合浦县高岭土远景区; 广东茂名高岭土远景区                                 |
|                                                                                                              |                   | 闽南风化残积型高岭土成矿矿集区   | 福建龙岩、同安郭山、大田等高岭土矿区等           | 福建省安溪高岭土远景区; 福建龙岩高岭土远景区; 福建宁化高岭土远景区; 福建永春县大份山—大德寨高岭土远景区 |
|                                                                                                              |                   | 赣东风化残积型高岭土矿集区     | 江西景德镇浮梁、左坊镇等高岭土矿区             | 江西瑞金老安背高岭土远景区                                           |
| 沉积型                                                                                                          | 华北成矿省             | 陕西北—内蒙南高岭土矿集区     | 内蒙古清水河、准格尔, 陕西府谷县、段寨等高岭土矿区    | 准格尔煤系高岭土远景区                                             |
| 热液蚀变型                                                                                                        | 扬子成矿省             | 苏东南热液蚀变型高岭土矿集区    | 江苏苏州阳山西、苏州观山, 苏州阳东等高岭土矿区      | 苏东南热液蚀变型高岭土成矿远景区                                        |
|                                                                                                              |                   | 安徽省庐枞盆地高岭土矿集区     | 安徽钟山、店桥等高岭土矿区                 | 钟山—天光山远景区; 稻镬尖—汪冲远景区; 毕洼—牛头山远景区; 店桥远景区                  |
| 烧变型                                                                                                          | 华北成矿省、西北成矿省、东北成矿省 | -                 | -                             | 准格尔煤系高岭土远景区、徐州陈楼—马庄高岭土远景区等                              |



在古代就被应用在医学领域之中,目前广泛应用于止血材料、药物载体、抗菌材料、组织工程和化妆品等方面,在药物、蛋白质和基因传递等许多生物医学创新领域被认为是一种很有前途的材料 (Carretero et al., 2006, 2010; Bonina et al., 2007; Mallick et al., 2008; Tan et al., 2014; Malek and Ramli, 2015; 张宜等, 2016; Awad et al., 2017; 干长姣等, 2017), 由于高岭土矿床形成过程中普遍存在古风化、沉积物源、古构造、水力分选、沉积物再循环和古氧化还原条件的信息, 因此其对古环境重建具有重要意义 (López et al., 2005; Raphalalani et al., 2019), 同时高岭土尾矿也显示出巨大的工业潜力 (Araujo et al., 2022; 卞夏, 2024), 具有重要的环保、社会和经济价值(表 7)。

4.4 高岭土的运用前景

高岭土的消费市场广阔, 在全球范围内, 高岭

土的消费市场主要集中在亚洲、欧洲和北美洲等地区, 亚洲是全球高岭土市场的主要消费者, 占据全球高岭土消费量为 40% 左右, 陶瓷行业是全球高岭土的主要消费领域, 约占高岭土市场的 40%, 其次是橡胶和塑料行业。高岭土的价格受到多种因素的影响, 如矿山开采、交通运输、市场供求等。在过去几年中, 高岭土价格出现了波动。由于高岭土的市场供应量有限, 供求关系的变化可能导致价格的波动。

随着全球经济的不断发展和新兴产业的不断涌现以及疫情时代的结束, 高岭土的应用领域和市场需求将不断扩大。市场研究机构预计, 未来几年全球高岭土市场规模将继续增长, 年复合增长率将超过 5%。因此, 高岭土作为我国重要的非金属矿产资源, 对其有效的开发与综合利用是我国发展绿色低碳循环经济形式下的必然趋势。随

表 7 中国高岭土加工方法  
Table 7 Processing methods of kaolin in China

| 应用方法      | 具体内容    | 简介                                               | 用途                                                                               |
|-----------|---------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 高岭土<br>选矿 | 手选法     | 利用矿物颗粒的大小或密度差别分离矿物                               | 去除长石和石英等杂质, 提高高岭土的纯度和煅烧白度, 适合小型企业                                                |
|           | 物理提纯    | 水选法 以水为介质把矿物和杂质矿物分离开来                            | 去除石英、长石和云母等较大颗粒的矿物或铁钛矿物, 该法简单易行, 成本低, 适合高品质矿床                                    |
|           | 浮选法     | 根据矿物颗粒表面物理化学性质的不同, 从矿石中分离有用矿物的技术方法               | 通过选择性絮凝、载体浮选和双液层浮选等除去高岭土矿中的有色杂质, 是陶瓷原料预处理的有效手段                                   |
|           | 磁选除铁    | 利用各种矿石或物料的磁性差异, 在磁力及其他力作用下进行选别的过程                | 利用磁选方法去高岭土原矿中的有害杂质                                                               |
|           | 化学提纯    | 利用矿物中含有某些伴生杂质矿物具有酸溶性或者碱溶性等特性, 而利用酸或者碱进行溶解剔除的一种方法 | 去除铁、钛矿物等有色矿物, 通常使用还原法、氧化法、氧化还原联合法、酸浸法等方法, 成本低, 提纯白度高。但对环境有一定的影响, 并且可能影响高岭土原有的性质  |
| 高岭土的改性    | 化学提纯    | 微生物漂白 包括微生物浸出技术和微生物浮选技术                          | 通过氧化亚铁硫杆菌和铁还原杆菌等方法去除高岭土中的氧化黄铁矿和其他硫化矿。该法投资少、成本低、能耗小, 污染低, 不影响高岭土性质, 是一种前景新的提纯增白方法 |
|           | 插层改性    | 克服层间氢键并插入层间空隙, 从而增大层间距, 而不破坏高岭土层状结构              | 主要有液相插层、蒸发溶液插层、机械力化学插层、微波辐射插层和超声波插层等                                             |
|           | 煅烧改性    | 是高岭土加工的常见方法, 通过物理方法对高岭土进行热处理                     | 不同使用目的下的高岭土煅烧温度不同, 高温煅烧 (450~925℃) 是除碳增白的最佳方法, 用于陶瓷材料、填料、吸附剂、催化剂等方面              |
|           | 化学改性    | 分为酸改性和碱改性                                        | 能够改善高岭土粉表面的吸附和反应活性, 但目前对酸碱改性的研究还处于初级阶段                                           |
|           | 聚合羟基铁改性 | 将聚合羟基铁溶液与经粉碎筛选的高岭土混合后, 在加热搅拌的条件下进行改性处理           | 受温度的影响较大, 聚合羟基铁改性后随着温度的升高, 高岭土吸附量逐渐增加                                            |
| 高岭土剥片     | 偶联剂改性   | 通过化学手段, 使高岭土微细颗粒表面形成一层有机偶联化合物的覆盖层, 从而改变高岭土表面的特性  | 主要有硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂等, 能够使高岭土表面结构更好地与有机物相容                                            |
|           |         | 通过高岭土层与层之间的解离降低高岭土的粒径以提高其表面积                     | 分为机械剥片和化学剥片, 即将高岭土剥片成极细的薄片, 能够达到低磨损和高白度的要求, 可用于造纸、化妆品、医药等方面                      |



着采矿和加工技术的改进,高岭土在造纸、陶瓷和橡胶等传统行业的应用继续增长的同时,其在环保、新能源、新材料和生物医药等新兴行业也会获得更广泛使用(表 8),新的创新型的高岭土产品也将不断出现,高岭土的附加值产品显示出巨大的发展前景。未来高岭土加工技术的发展方向包括改进煅烧工艺、表面改性技术、超细浮选技术、增白降黏技术、有害杂质去除、硬质高岭土剥片技术、高岭土尾矿的应用、高岭土纳米应用技术抗菌材料技术等方面。

表 8 高岭土在战略性新兴产业中的关键应用  
Table 8 Key applications of kaolin in strategic emerging industries

| 应用领域      | 主要且关键用途                                                                                                                                                 |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 环保领域的应用   | 高岭土在各种污染处理领域具有重要的应用前景,通过化学方法氢氧化钠、磷酸氢二钠等改性高岭土有效吸附有机污染物;能够有效去除大气中汞元素                                                                                      |
| 新能源领域的应用  | 制备二元有机 / 煤系高岭土复合相变储能材料并应用于建筑行业以达到调温、节能的目的,高岭土 / 硬脂酸钠储热相变新式材料应用于太阳能发电中的储热模块内,能够提升太阳能的使用率和应用性能                                                            |
| 新材料领域的应用  | 作为NaY 型分子筛的原料;纳米高岭土在陶瓷、橡胶、涂料、建筑及农业等方面得到广泛应用,作为隐身材料在国防领域也展现出了广泛的应用前景,高岭土陶瓷微球作为凝固增强材料用于页岩气和页岩油等非常规油气开采。                                                   |
| 生物医药领域的应用 | 研发了诸如高岭土介入止血绷带、高岭土止血垫以及高岭土竹纤维止血纱布等材料,作为生物支架或基质,促进细胞生长和组织再生,在发现全球挑战疾病(如癌症、病毒、耐抗生素细菌、阿尔茨海默病、慢性骨骼肌疾病和老年疾病)的新治疗系统和治疗途径的试验中做出重要贡献。此外可作为化妆品添加剂,还能用于杀虫以及缓解蚊虫叮咬 |
| 其他        | 在古环境重建中 利用南非林波波省Lwamondo和Zebediela矿床的两种高岭土中的微量元素和稳定同位素,重建其形成的古环境                                                                                        |
| 高岭土尾矿     | 用于建筑材料、土壤改良剂和陶瓷产品等方面,还能应用于我国太阳能光伏产业,帮助解决光伏玻璃纱供应问题                                                                                                       |
| 传统应用领域    | 造纸、涂料、橡胶、塑料、陶瓷、耐火材料和玻璃纤维行业等                                                                                                                             |

5 结论

(1)中国高岭土资源丰富。因其具有优异的物理化学性质使其成为世界上消耗最多的材料之一。

(2)全球高岭土资源丰富,探明储量大约在 320 亿 t,拥有高岭土资源的国家和地区有美国、英国、巴西、中国等 60 多个;中国高岭土分布广泛,有 20 个省(直辖市、自治区)产出高岭土矿,资源储量为 6.93 亿 t。全球高岭土成矿时代主要为古生代、中生代和新生代。

(3)中国高岭土通常划分为风化型、热液蚀变型和沉积型三类以及 6 个亚型,在最新的研究中将高岭土矿床分为 4 种成因类型、8 种成因亚型以及 12 种矿床类型,其中第四种烧变型高岭土矿床的研究仍存在争议。

(4)高岭土矿床的形成受到沉积环境、成矿母岩以及大地构造演化等因素的综合影响。华北陆块成矿省、扬子成矿省和华南成矿省是我国高岭土重要的成矿远景区。

(5)高岭土矿石加工技术包括选矿提纯、表面改性、插层改性和剥片等。高岭土广泛应用于环保、新能源、新材料、生物医药等对支撑战略性新

兴产业和传统应用领域。未来高岭土应用持续增长,未来发展方向包括改进煅烧工艺、超细浮选技术、增白降粘技术、高岭土尾矿应用、高岭土纳米技术和抗菌材料技术等。

注释

- ①USGS. 2023. Minerals Commodity Summaries[R]. Reston: United States Geological Survey.
- ②中国地质调查局发展研究中心(全国地质资料馆). 2021. 全国矿产地数据库 2021 版 [DB/OL]. <http://data.ngac.org.cn/mineralresource/>.

References

Araujo E D, Silva K R, Grilo J P, Macedo D A, Santana L N, Neves G A. 2022. Dielectric properties of steatite ceramics produced from talc and kaolin wastes[J]. *Materials Research*, 25: e20210428.

Awad M E, López-Galindo A, Setti M, El-Rahmany M M, Iborra, C V. 2017. Kaolinite in pharmaceuticals and biomedicine[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 533(1): 34–48.

Bian Xia, Ye Yingchun, Liu Kai, Li Xiaozhao, Fan Zhuyi, Guo Guangze, Zhang Wei. 2023. The influence of soil properties on the stabilization strength of engineering slurry and its micro-mechanism[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 45(1): 123–130 (in Chinese with English abstract).

Bonina F P, Giannossi M L, Medici L, Puglia C, Summa V, Tateo F.

2007. Adsorption of salicylic acid on bentonite and kaolin and release experiments[J]. *Applied Clay Science*, 36(1/3): 77–85.
- Boulis S, Attia A. 1994. Mineralogical and chemical composition of Carboniferous and Cretaceous kaolins from a number of localities in Egypt[C]//1st International Symposium on Industrial Application of Clays, 99–127.
- Bukalo N N, Ekosse G I, Odiyo J, Ogola J. 2020. Geochemistry and possible industrial applications of cretaceous—tertiary kaolins of the Douala Sub—Basin, Cameroon[J]. *Periodico di Mineralogia*, 89: 225–242.
- Cao Jian, Zhang Yijie, Hu Wenxuan, Zhang Yueqian, Tang Yong, Yao Suping, Tao Guoliang. 2005. Developing characteristics of kaolinite in central Junggar Basin and their effect on the reservoir quality[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(4): 367–373.
- Carretero M I, Gomes C, Tateo F. 2006. Clays and human health[J]. *Developments in Clay Science*, 1: 717–741.
- Carretero M I, Pozo M, Martín—Rubi J A, Pozo E, Maraver F. 2010. Mobility of elements in interaction between artificial sweat and peloids used in Spanish spas[J]. *Applied Clay Science*, 48: 506–515.
- Chen P Y, Lin M L, Zheng Z. 1997. On the origin of the name kaolin and the kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China[J]. *Applied Clay Science*, 12(1/2): 1–25.
- Chen Zhengguo, Yan Lingya, Gao Shuxue. 2021. Analysis on the situation of strategic non—metallic mineral resources[J]. *China Nonmetallic Minerals Industry*, (2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiru, Yao Xingmao, Yin Xiangpeng. 2019. Preparation of kaolin based phase change thermal storage materials for solar thermal power plant[J]. *Renewable energy resources*, 37(3): 349–353 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Hongfei, Gao Yulong, Liang Shaoxian, Liu Qinfu. 2023. New genetic classification of kaolin deposits in China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(5): 1110–1117 (in Chinese with English abstract).
- Ding Shihui. 1996. Genesis and metallogenic model of karst-type kaolin ore deposit in Suzhou, Jiangsu Province[J]. *Geology of Jiangsu*, 20(2): 78–84 (in Chinese with English abstract).
- Dill H G. 2016. Kaolin: Soil, rock and ore from the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments[J]. *Earth Science Reviews*, 161: 16–129.
- Fang Yesen, Fang Jinman, Xie Changsheng, Liao Zhijian. 1988. Kaolin from Jiepai, Hunan[J]. *Silicate Bulletin*, (5): 55–63 (in Chinese).
- Feng Xueru, Deng Jian, Yan Weiping, Li Weisi. 2022. Development status and comprehensive utilization of kaolin[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (6): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Ganguly M, Tao Y, Lee B, Ariya P A. 2020. Natural kaolin: Sustainable technology for the instantaneous and energy-neutral recycling of anthropogenic mercury emissions[J]. *Chemosuschem*, 13(1): 165–172.
- Gan Changjiao, Gan Hui, Meng Zhiyun, Zhu Xiaoxia, Gu Ruolan, Wu Zhuona, Sun Wenzhong, Wang Donggen, Dou Guifang. 2017. Application of kaolin to hemostasis: Research progress [J]. *Military Medicine Sciences*. 41(2): 141–145(in Chinese with English abstract).
- Guan Tielin. 1982. A discussion on the geological features and the origin of the kaolinite deposits of Xuyong type[J]. *Mineral Deposits*, (2): 69–79 (in Chinese with English abstract).
- Harvey C C, Murray H H. 1997. Industrial clays in the 21st century: A perspective of exploration, technology and utilization[J]. *Applied Clay Science*, 11(5/6): 285–310.
- Jarošová M, Staněk F. 2021. Spatial modelling of kaolin deposit demonstrated on the Jimlíkov—East deposit, Karlovy Vary, Czech Republic[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11): 788.
- Jiang Guilan, Zhang Zhijun, Xue Bing. 2014. Processing and Application of Kaolin [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1–223(in Chinese).
- Jiang Zhidong, Li Changlong, Rao Yubin. 2019. Metallogenic geological characteristics and prospecting potential of Tangyin rock mass tourmaline kaolin[J]. *Jiangxi Coal Technology*, (4): 117–120 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Lixiang, Guo Jiapeng, Cheng Wei. 2021. Study on metallogenic characteristics and regularity of kaolin in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(1): 10–18 (in Chinese with English abstract).
- Li Bingyun, Wang Sujian, Wang Zhaiming. 2000. Study on Kaolin rock deposit and its deep processing techniques in the northeastern margin of the Ordos Basin[J]. *Non-Metallic Mining*, (5): 33–36 (in Chinese).
- Li Canhua, Fan Si. 1988. Origin and exploration of Suzhou kaolin deposits[J]. *Geology of Jiangsu*, 12(4): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoguang. 2018. Self-adaptive Deformation of Kaolinite and the Structural Properties of Kaolinite Nanoscrolls[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1–131 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinmei, Wu Hashen, Zhang Dongyun, Bai Menglan, Chang Shan. 2013. The research progress of activated coal-bearing kaolinite in adsorption respect[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 39(21): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Liang Shaoxian, Wang Shuili, Yao Gaiquan. 1995. Study of synsedimentary volcanic-ash-derived clayrock bands in Carboniferous–Permian coal-bearing formation of North China[J]. *Coal Geology of China*, 7(1): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianguo. 2018. Application of kaolin in the production of rubber hose fillers [J]. *Chemical Management*, (2): 154, 156 (in Chinese).
- Liu Linsong, Shi Songlin, Sun Junmin, Li Jintao, Wang Zhaoguo, Li Jiaying, Liu Qinfu. 2022. Composition and origin of high-alumina coal in Jungar coalfield[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 7(1): 101–112 (in Chinese with English abstract).

- López J M, Bauluz B, Fernández-Nieto C, Oliete A Y. 2005. Factors controlling the trace-element distribution in fine-grained rocks: the Albian kaolinite-rich deposits of the Oliete Basin (NE Spain)[J]. *Chemical Geology*, 214(1/2): 1–19.
- Malek N A, Ramli N I. 2015. Characterization and antibacterial activity of cetylpyridinium bromide (CPB) immobilized on kaolinite with different CPB loadings[J]. *Applied Clay Science*, 109–110: 8–14.
- Mallick S, Pattnaik S, Swain K, De P K, Saha A, Ghoshal G, Mondal A. 2008. Formation of physically stable amorphous phase of ibuprofen by solid state milling with kaolin[J]. *European Journal of Pharmaceutics & Biopharmaceutics*, 68(2): 346–351.
- Murray H H. 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview[J]. *Applied Clay Science*, 17(5/6): 207–221.
- Murray H H. 2006. *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1–180.
- Nie Xiaoliang, Wang Longfei. 2020. Distribution and mineralization pattern of major weathered residual kaolinite ores in China[J]. *China Metal Bulletin*, (7): 59–60 (in Chinese).
- Nzeugang A N, Ouahabi M E, Aziwo B, Mache J R, Mounton H M, Fagel N. 2018. Characterization of kaolin from Mankon, NW Cameroon[J]. *Clay Minerals*, 53(4): 563.
- Prasad M S, Reid K J, Murray H H. 1991. Kaolin: Processing, properties and applications[J]. *Applied Clay Science*, 6(2): 87–119.
- Pruett R J. 2016. Kaolin deposits and their uses: Northern Brazil and Georgia, USA[J]. *Applied Clay Science*, 10: 3–13.
- Qiao Wei, Zou Weixi, Chen Qiang. 2007. Development and application of flaked kaolinite[J]. *Non-metallic Mines*, 182(S1): 19–20 (in Chinese).
- Qiu Ying, Wu Qisheng, Li Shuiping, Zhang Changsen. 2013. Preparation and thermal properties of binary organic/kaolin composites as shape stabilized phase change material for thermal energy storage[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, (2): 5 (in Chinese with English abstract).
- Raphalalani A, Ekosse G-I, Odiyo J, Ogola J, Bukalo N. 2019. Trace element and stable isotope geochemistry of Lwamondo and Zebediela Kaolins, Limpopo Province, South Africa: Implication for paleoenvironmental reconstruction[J]. *Minerals*, 9(2): 93.
- Sousa D J, Varajão A, Yvon J, Costa, G M. 2007. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the kaolin facies deposit from the Capim region (northern Brazil)[J]. *Clay Minerals*, 42(1): 69–87.
- Sun Yigao, Ai Bo, Yao Xiang, She Gang. 2018. Application of nanokaolin in the tire for mining truck[J]. *New Chemical Materials*, 46(9): 4 (in Chinese with English abstract).
- Tao Weiping, Yang Yaxiu, Chen Xinqiang. 1985. Genetic Types of Kaolin Deposits in China[C]//Committee of International Exchange Conference. International Exchange Proceedings: 4, Geophysical and Geochemical Exploration. Beijing: Geological Publishing House, 299–309.
- Tan D, Yuan P, Annabi-Bergaya F, Liu D, He H. 2014. High-capacity loading of 5-fluorouracil on the methoxy-modified kaolinite[J]. *Applied Clay Science*, 100: 60–65.
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research. determination of types, attributes resources, progress of prospecting: Problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189–1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zufu, Liu Zhaoying, Gong Xiasheng. 1987. Halloysite from loulingbao, Beichuan district, Sichuan[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, (1): 21–30 (in Chinese with English abstract).
- Wei Bo, Wu Xiaohuan, Liu Zhiyong, Peng Chunyan, Li Ke. 2020. Research on current situation of bentonite industry in foreign countries[J]. *China Nonmetallic Minerals Industry*, (3): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Wu Junhua, Gong Min, Zhou Xuegui, Wang Chuan, Yang Ziwen, Luo Qing, Li Yanjun. 2023. Geochronology and sources of the giant Xiaokeng kaolin deposit in southern Jiangxi Province: Insight from U–Pb ages of zircon and monazite, and Hf isotopic compositions[J]. *Earth Science*, 48(9): 3245–3257 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yujie. 2021. Temporal-spatial Distribution Regularities of Kaolin Deposits in China[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 1–93 (in Chinese with English abstract).
- Xia Zheng. 1981. The formation and evolution of the weathering type of kaolin minerals at the Yangxi Suzhou county.[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 368–375, 415 (in Chinese with English abstract).
- Xia Zheng, Zhang Ningke. 1986. Study of nacrite[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 365–370 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ningning, Zhang Shoupeng, Wang Yongshi, Qiu Longwei. 2022. Diagenesis and pore formation of the Upper Paleozoic tight sandstone in the northern area of the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 422–434 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2008. Scheme for the Division of Metallogenic Belts/Provinces in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–138 (in Chinese).
- Yin Jiangning, Ding Jianhua, Chen Binghan, Liu Jiannan, Liu Xinxing. 2022. Metallogenic geological characteristics and mineral resources assessment of kaolin in China[J]. *Geology in China*, 49(1): 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Peimin, Yu Zhouping, Sun Binxiang, He Zhihai. 2019. Application and research progress of nano kaolin in cement-based materials[J]. *Silicate Bulletin*, 38(5): 1420–1424, 1432 (in Chinese).
- Zhang Hui. 1992. Shape-genesis types of the kaolinites in coal series[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(1): 53–57 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Diao Bo, Yu Jing, Fan Guanghui. 2016. Preparation and evaluation of Kaolin bamboo fiber hemostatic gauze[J]. *South*

- China Journal of Defense Medicine, 30(1): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, Sun Li, Cun Xiaoni, Du Fangpeng, Deng Hui. 2017. White bleached sandstone genesis and paleo-weathered crust forming environment of the Jurassic Yanan Formation in the northeastern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 91(6): 1345–1359 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bingshe, Xu Yong, Wang Jun, Zhang Zhihai, Gao Chunhua. 2013. Study on the relationship between the depositional environment and mineralization of Fugu kaolinite deposit in Shanghai Province[J]. Northwestern Geology, 46(2): 174–180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugeng, Liu Xiaohu, Ding Jun. 2006. A tentative discussion on mineralogical characteristics and genesis of Xianrenwan halloysite type kaolin in Chenxi, Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, (5): 433–439 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Fei, Zhang Zhixi, Wang Ningzu. 2019. Mineralogical characteristics and genetic analysis of halloysite from Upper Permian longtan formation in Fengxiang district of Qianxi county, Guizhou Province[J]. Gansu Geology, 28(Z1): 41–47 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shihuang, Song Huanxia, Zhao Guijun, Han Shuchen. 2015. Further utilization of material geological data in coal exploration—A case study of Haize miao and Duanzhai mine areas kaolin exploration in Fugu, Shaanxi[J]. Coal Geology of China, 27(7): 74–76 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhi, Lü Denden, Feng Moli, Feng Baohua, Jin Taiquan. 1983. Research on kaolin deposits in China [C]// Editorial Department of the Academy of Chinese Academy of Geological Sciences. Proceedings of Chinese Academy of Geological Sciences (1981). Beijing: Geological Publishing House, 86 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhi, Lü Daren, Jin Taiquan, Xia Cheng, Chen Kaihui, Ji Surong. 1980. The origin of the name "Gaoling" and the earliest history of using kaolin in China [J]. Geological Review, (3): 272–273 (in Chinese).
- Zheng Zhi, Lü Daren, Zhou Guoping. 1987. An investigation on the assemblage of geothermal alteration minerals and formation of the kaolin deposit in Tengchong geothermal area, Yunnan Province[C]// Bulletin of Institute of Mineral Deposits. Chinese Academy of Geological Sciences, (20): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guoping, Lin Yuchuan. 1991. Sedimentary-weathering type kaolin deposits and their characteristics[J]. Mineral Deposits, (3): 272–282 (in Chinese with English abstract).
- 曹剑, 张义杰, 胡文瑄, 张越迁, 唐勇, 姚素平, 陶国亮. 2005. 油气储层自生高岭石发育特点及对物性的影响[J]. 矿物学报, 25(4): 367–373.
- 程宏飞, 高宇龙, 梁绍暹, 刘钦甫. 2023. 中国高岭土(岩)矿床新成因分类[J]. 地球科学与环境学报, 45(5): 1110–1117.
- 陈正国, 颜玲亚, 高树学. 2021. 战略性非金属矿产资源形势分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, (2): 1–8.
- 陈祉如, 姚兴茂, 尹翔鹏. 2019. 应用于太阳能热发电站的高岭土基相变储热材料的制备[J]. 可再生能源, 37(3): 349–353.
- 丁世辉. 1996. 苏州岩溶型高岭土矿床的成因及成矿模式[J]. 江苏地质, 20(2): 78–84.
- 方郅森, 方金满, 谢长生, 廖志坚. 1988. 湖南界牌高岭土[J]. 硅酸盐通报, (5): 55–63.
- 冯雪茹, 邓建, 严伟平, 李维斯. 2022. 我国高岭土开发现状及综合利用进展[J]. 矿产综合利用, (6): 1–10.
- 干长蛟, 甘慧, 孟志云, 朱晓霞, 顾若兰, 吴卓娜, 孙文种, 王东根, 窦桂芳. 2017. 高岭土的止血应用研究进展[J]. 军事医学, 41(2): 141–145.
- 关铁麟. 1982. 叙永式高岭土矿床地质特征及其成因的探讨[J]. 矿床地质, (2): 69–79.
- 姜桂兰, 张志军, 薛兵. 2014. 高岭土加工与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1–223.
- 姜智东, 李昌龙, 饶玉彬. 2019. 荣阴岩体电气石型高岭土成矿地质特征与找矿前景[J]. 江西煤炭科技, (4): 117–120.
- 焦丽香, 郭加朋, 程伟. 2021. 山东高岭土矿成矿特征及成矿规律探讨[J]. 山东国土资源, 37(1): 10–18.
- 李炳云, 王苏建, 王寨明. 2000. 鄂尔多斯盆地东北缘高岭岩矿及其深加工工艺研究[J]. 非金属矿, (5): 33–36.
- 李灿华, 范斯. 1988. 苏州高岭土矿床成因及找矿远景探析[J]. 江苏地质, 12(4): 13–18.
- 李晓光. 2018. 高岭石的自适应变形及其纳米卷结构研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1–131.
- 李新梅, 吴哈申, 张冬云, 白孟兰, 长山. 2013. 改性煤系高岭土在吸附方面的研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 39(21): 1–3.
- 梁绍暹, 王水利, 姚改焕. 1995. 华北聚煤区火山灰蚀变粘土岩夹研的研究[J]. 中国煤田地质, 7(1): 59–63.
- 刘建国. 2018. 高岭土在生产橡胶管填料中的应用[J]. 化工管理, (2): 154, 156.
- 刘霖松, 石松林, 孙俊民, 李锦涛, 王兆国, 李佳星, 刘钦甫. 2022. 准格尔煤田高铝煤物质组成及成因[J]. 矿业科学学报, 7(1): 101–112.
- 孟宇航, 尚玺, 张乾, 杨华明. 2020. 高岭土的功能化改性及其战略性应用[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 69–76.
- 聂晓亮, 汪龙飞. 2020. 中国主要风化残积型高岭土矿分布及成矿模式[J]. 中国金属通报, (7): 59–60.
- 乔炜, 邹伟曦, 陈强. 2007. 剥片高岭土的开发与应用[J]. 非金属矿, 182(S1): 19–20.
- 仇影, 吴其胜, 黎水平, 张长森. 2013. 二元有机/煤系高岭土复合相变储能材料的制备及其热性能[J]. 材料科学与工程学报, (2): 5.
- 孙义高, 艾博, 姚翔, 余刚. 2018. 纳米高岭土在矿用卡车轮胎中的应用

## 附中文参考文献

- 卞夏, 叶迎春, 刘凯, 李晓昭, 樊朱益, 郭光泽, 张伟. 2024. 土性对工程泥浆固化强度影响规律及微观机理[J]. 地球学报, 45(1): 123–130.



- 用[J]. 化工新型材料, 46(9): 4.
- 陶维屏, 杨雅秀, 陈欣强. 1985. 中国高岭土矿床成因类型[C]//国际交流会议组委会. 国际交流学术论文集 4: 物探与化探. 北京: 地质出版社, 299–309.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义, 矿种厘定, 资源属性, 找矿进展, 存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1189–1209.
- 王祖福, 刘兆莹, 龚夏生. 1987. 四川北川老林包的埃洛石[J]. 成都地质学院学报, (1): 21–30.
- 魏博, 吴小媛, 彭春艳, 李渴, 刘志勇. 2020. 国外高岭土产业发展现状研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, (3): 52–55.
- 吴俊华, 龚敏, 周雪桂, 王川, 杨紫文, 罗青, 李艳军. 2023. 赣南小坑超大型高岭土矿床原岩时代及源区: 锆石及独居石 U—Pb 年代学及 Hf 同位素制约[J]. 地球科学, 48(9): 3245–3257.
- 吴宇杰. 2021. 中国高岭土矿床时空分布规律[D]. 合肥: 合肥工业大学, 1–93.
- 夏琰. 1981. 苏州阳西风化型高岭土矿物的形成与演化[J]. 地质科学, (4): 368–375, 415.
- 夏琰, 张宁克. 1986. 珍珠石矿物的研究[J]. 地质科学, (4): 365–370.
- 徐宁宁, 张守鹏, 王永诗, 邱隆伟. 2022. 鄂尔多斯盆地北部二叠系下石盒子组致密砂岩成岩作用及孔隙成因[J]. 沉积学报, 40(2): 422–434.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1–138.
- 阴江宁, 丁建华, 陈炳翰, 刘建楠, 刘新星. 2022. 中国高岭土矿成矿地质特征与资源潜力评价[J]. 中国地质, 49(1): 121–134.
- 殷海荣, 武丽华, 陈福, 马亮, 亓丰源. 2006. 纳米高岭土的研究与应用[J]. 材料导报, 20(F05): 4.
- 詹培敏, 于周平, 孙斌祥, 何智海. 2019. 纳米高岭土在水泥基材料中的应用与研究进展[J]. 硅酸盐通报, 38(5): 1420–1424, 1432.
- 张龙, 刘池阳, 雷开宇, 孙莉, 寸小妮, 杜芳鹏, 邓辉. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗纪延安组漂白砂岩成因及古风化壳形成环境探讨[J]. 地质学报, 91(6): 1345–1359.
- 张炳社, 徐永, 王军, 张志海, 高春华. 2013. 陕西府谷高岭土矿沉积环境与成矿关系研究[J]. 西北地质, 46(2): 174–180.
- 张慧. 1992. 煤系地区中高岭石的形态—成因类型[J]. 矿物学报, 12(1): 53–57.
- 张术根, 刘小胡, 丁俊. 2006. 湖南辰溪仙人湾埃洛石型高岭土的矿物学特征与成因简析[J]. 岩石矿物学杂志, (5): 433–439.
- 张宜, 刁波, 喻晶, 樊光辉. 2016. 高岭土竹纤维止血纱布的制备与评价[J]. 华南国防医学杂志, 30(1): 9–13.
- 赵飞, 张志玺, 王宁祖, 张文斌. 2019. 贵州省黔西县枫香地区上二叠统龙潭组埃洛石矿物学特征及成因分析[J]. 甘肃地质, 28(Z1): 41–47.
- 赵世煌, 宋焕霞, 赵桂军, 韩淑琛. 2015. 煤炭勘查实物地质资料的二次开发——以陕西府谷海则庙与段寨矿区高岭土矿勘查为例[J]. 中国煤炭地质, 27(7): 74–76.
- 郑直, 吕达人, 冯墨林, 冯宝华, 金太权. 1983. 中国高岭土矿床研究[C]//中国地质科学院院报编辑部. 中国地质科学院文集 (1981). 北京: 地质出版社, 86.
- 郑直, 吕达人, 金太权, 夏琰, 陈开惠, 姬素荣. 1980. “高岭”名称的来源及中国使用高岭土最早的历史[J]. 地质论评, (3): 272–273.
- 郑直, 吕达人, 周国平. 1987. 云南腾冲地热区高岭土的形成和蚀变矿物组合特征[C]//矿床地质研究所. 中国地质科学院矿床地质研究所文集, (20): 5–11.
- 周国平, 林毓川. 1991. 沉积—风化型高岭土矿床及其特征[J]. 矿床地质, (3): 272–282.