

doi: 10.12029/gc20230620003

梁震, 王春连, 陈清礼, 宁鹏远, 颜开, 刘殿鹤. 2025. 全球硅藻土分布、成因、应用及其找矿远景分析[J]. 中国地质, 52(3): 915–931.

Liang Zhen, Wang Chunlian, Chen Qingli, Ning Pengyuan, Yan Kai, Liu Dianhe. 2025. Distribution, origin, application and prospecting prospect analysis of diatomite in the world[J]. Geology in China, 52(3): 915–931(in Chinese with English abstract).

全球硅藻土分布、成因、应用及其找矿远景分析

梁震^{1,2}, 王春连², 陈清礼¹, 宁鹏远^{2,3}, 颜开², 刘殿鹤^{2,4}

(1. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100; 2. 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; 3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:【研究目的】硅藻土是死亡的硅藻等单细胞生物通过沉积等一系列地质作用形成的矿物, 属于沉积岩类, 其主要成分是 SiO_2 。硅藻土是社会生产活动中必不可少的非金属矿产资源, 因其具有多孔性、吸附性强、轻质、熔点高、隔热、吸声、化学性能稳定等特点, 在污水处理、农业、建材领域以及其新兴技术领域应用广泛。【研究方法】本文通过收集整理资料, 充分借鉴前人的研究成果, 对世界范围内硅藻土资源分布、矿床成因类型以及在传统与新兴技术领域的应用进行了调研。【研究结果】硅藻土资源广泛分布于全球 122 个国家, 目前世界硅藻土总储量约 9.2 亿 t, 其中美国资源最为丰富, 其储量约 2.5 亿 t, 占世界总量的 27.2%; 中国硅藻土储量约 1.7 亿 t, 占世界总储量的 18% 左右。根据硅藻土形成机制和沉积环境的不同, 将矿床类型分为海相沉积型矿床和陆相沉积型矿床, 两种矿床均受到地质构造、气候环境、时间、适宜的沉积环境等因素的共同控制。【结论】综合全球资料, 从硅藻土矿床的成因分析表明: 硅藻土矿床集中分布在新近纪至第四纪火山构造产生的断陷盆地和山间盆地中, 同时与玄武岩分布存在直接联系, 对于气候潮湿、环境温暖, 且雨量较充足的地带可作为硅藻土矿床找矿远景区域。如中国东部地区易形成火山构造的洼地、东南部地区在新近纪时期有较多火山喷发活动的前海盆地、西南部地区喜山运动形成的中小型构造盆地等, 特别是一些以玄武岩为基底及有玄武岩分布地区的新生代盆地可作为我国陆相沉积型硅藻土矿床找矿远景区。而北太平洋中高纬度地区在渐新世晚期—中新世早期, 通过构造活动和火山活动共同作用形成了边缘盆地。中新世中晚期硅藻土在深海底层水缺氧条件下提高了沉积速率, 使得这片区域硅藻土广泛分布。因此, 北太平洋北部以及白令海、鄂霍茨克海和日本海等都可作为海相沉积型硅藻土矿床的找矿远景区。

关键词: 硅藻土矿床; 资源特征; 找矿潜力; 应用方向; 矿床分类; 矿产勘查工程

创 新 点: (1) 总结了硅藻土矿床资源概况、矿床成因分类、关键领域应用等方面; (2) 根据硅藻土矿床的成因及分布特征, 预测找矿远景区域。

中图分类号: P619.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0915-17

Distribution, origin, application and prospecting prospect analysis of diatomite in the world

LIANG Zhen^{1,2}, WANG Chunlian², CHEN Qingli¹, NING Pengyuan^{2,3}, YAN Kai², LIU Dianhe^{2,4}

(1. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. MNR Key Laboratory of

收稿日期: 2023-06-20; 改回日期: 2023-12-25

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

作者简介: 梁震, 男, 1997 年生, 硕士生, 主要从事资源与环境方向的研究; E-mail: liangzhen971220@163.com。

通信作者: 王春连, 男, 1983 年生, 研究员, 主要从事沉积学及矿床学方面的研究; E-mail: wangchunlian312@163.com。

Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

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

[Objective] Diatomaceous earth is a mineral formed by single-celled organisms such as dead diatoms through deposition and a series of geological processes. It belongs to sedimentary rocks, and its main component is SiO_2 . Diatomite is an indispensable non-metallic mineral resource in my country's social production activities, because of its porosity, strong adsorption, light weight, high melting point, heat insulation, sound absorption, low refractive index, stable chemical properties, etc. It is widely used in sewage treatment, agriculture, building materials and its emerging technology fields. **[Methods]** In this paper, by collecting and sorting out data and fully drawing on previous research results, this paper investigates the distribution of diatomite resources in the world, the genetic types of deposits, and its application in traditional and emerging technology fields. **[Results]** Diatomaceous earth resources are widely distributed in 122 countries in the world. At present, the total reserves of diatomaceous earth in the world are about 920 million tons, of which the United States is the most abundant, its reserves are about 250 million tons, accounting for 27.2% of the world's total. China's diatomaceous earth reserves are about 170 million tons, accounting for about 18% of the world's total reserves. According to the different formation mechanism and sedimentary environment of diatomite, the deposit types are divided into Marine sedimentary deposit and continental sedimentary deposit, both of which are affected by the superposition of geological structure, climatic environment, time condition and suitable sedimentary environment. **[Conclusions]** Combined with domestic and foreign data, the genetic analysis of diatomite deposits shows that diatomite deposits are concentrated in fault basins and intermountain basins generated by volcanic structures from Tertiary to Quaternary, and are directly related to the distribution of basalt. The zone with humid climate, warm environment and sufficient rainfall can be used as a prospecting prospect area for diatomite deposits. For example, the depression in the eastern part of China is easy to form volcanic structure, the foresea basin in the southeast area has more volcanic eruption activities in the Neogene period, and the small and medium-sized tectonic basin formed by the mountain movement in the southwest area, especially some Cenozoic basins with basalt base and basalt distribution area can be used as the prospecting prospect of continental sedimentary diatomite deposits in China. In the middle and high latitudes of the North Pacific Ocean, marginal basins were formed through the interaction of tectonic and volcanic activities in the late Oligocene and early Miocene. In the middle and late Miocene, the deposition rate of diatomite increased under the hypoxia condition of the deep sea bottom water, which made diatomite widely distributed in this area. Therefore, the northern part of the North Pacific Ocean, the Bering Sea, the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan can be used as prospecting prospects for Marine sedimentary diatomite deposits.

Key words: diatomite deposit; resource characteristics; prospecting potential; application; classification of deposit; mineral exploration engineering

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

About the first author: LIANG Zhen, male, born in 1997, master candidate, mainly engaged in resource and environment research; E-mail: liangzhen971220@163.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 projects of Basic Research Funds for Public Welfare Research Institutes at the Central Level (No.KK2322, No.KK2005) and China Geological Survey (No.DD20230056, No.DD20190606, No.DD20221684, No.DD20230291).

1 引 言

硅藻土是一种由硅藻遗骸构成的硅质沉积岩, 是重要的非金属矿产资源。其特殊的理化性质使其在各行各业中发挥关键作用, 包括聚合物材料的添加剂、涂料的填料和增强剂、化工的助滤剂、吸

附剂、催化剂载体、表面活性剂, 以及色谱固定相或载体等。近年来, 硅藻土在新兴领域, 如声学材料、新能源、生物医疗等方面的应用也逐渐增多(屈荣英和陈水安, 2005; 徐建军等, 2011)。

国外的硅藻土研究始于 20 世纪初, 目前已经取得许多重要的研究成果。相较于国内, 国外的硅

藻土研究领域更为广泛,包括硅藻土资源的开发利用、硅藻土生态学、土壤生物学和环境保护等多个方面。中国硅藻土研究起步于 20 世纪 50 年代,随着社会经济的发展,硅藻土研究也得到了进一步的重视。然而,目前中国硅藻土研究仍处于初级阶段,存在技术水平低、产品加工程度有待提高、市场单一、企业规模较小等问题。中国硅藻土产业仍以资源密集型的粗放式经营为主,与国外相比仍存在较大差距。因此对于硅藻土进行科技创新、加大低品位硅藻土的开发利用尤为重要。

本文旨在通过系统梳理全球硅藻土资源的分布特征,剖析矿床成因机制,总结其在传统与新兴领域的应用现状,为解决当前硅藻土资源开发利用中的关键问题提供理论支撑与实践指导。

2 资源概况与分布

全球硅藻土资源分布广泛且储量非常丰富,据统计,全球 122 个国家和地区都存在硅藻土资源,储量约 9.2 亿 t(周婷婷和吴肇伟, 2017),包括美国、中国、日本、德国、捷克、墨西哥、法国、肯尼亚等,远景储量约 35.73 亿 t(肖力光等, 2010),其中美国是硅藻土资源最为丰富的国家,储量约为 2.5 亿 t,占世界总量的 27.2%;中国的硅藻土储量约为 1.7 亿 t,占世界总储量约 18%。近年来,阿尔及利亚、阿曼、新西兰和赞比亚等地也相继发现了新的硅藻土资源(李志威等, 2021)。2022 年硅藻土的全球生产总量为 250 万 t,较上一年增加了约 2%。美国是世界上最大的硅藻土生产国,产量约为 110 万 t,占全球总产量的 44% 左右;近几年由于欧洲对硅藻土需求的增加,中国硅藻土产量被丹麦超过,居世界第三位,产量约为 14 万 t,占世界总产量的 6% 左右;而丹麦 2022 年总产量约 40 万 t,其产量约占世界总产量 16%。其他主要硅藻土生产国还包括阿根廷、秘鲁、日本、俄罗斯等,全球硅藻土产量和储量分布见表 1。

截止 2021 年,中国硅藻土矿石保有储量约为 17062.22 万 t,其中储量较大的地区主要集中在吉林(71%)、浙江(15%)、云南(7%),其他省区依次为内蒙古、四川、江西等。中国硅藻土资源主要以中低品位为主,优质资源不足 10%,且 95% 以上的优质资源位于白山地区(吴照洋等, 2019)。吉林省的白山地区是中国硅藻土资源的主要富集区域,尤其

表 1 世界主要国家或地区硅藻土产量及储量 (10³ t)
Table 1 Production and reserves of diatomite in major countries or regions in the world (10³ t)

国家或地区	产量				储量2022
	2019	2020	2021	2022	
阿根廷	95 ^r	99 ^r	100 ^e	100 ^e	NA
澳大利亚	11 ^e	11 ^e	11	11	NA
中国	141	140 ^e	140 ^e	140 ^e	150000
丹麦	400	423 ^r	420 ^e	400	NA
法国	75	75	75	80	NA
德国	52	50 ^r	50	50	NA
日本	40	40	40	40	NA
韩国	41	65	65	65	NA
墨西哥	96 ^e	96 ^e	96 ^e	100 ^e	NA
新西兰	40	40	40	40	NA
秘鲁	91	85 ^r	85 ^e	85 ^e	2000
俄罗斯	51 ^e	51 ^e	51 ^e	50 ^e	NA
西班牙	50	50	50	50	NA
土耳其	221	100 ^r	100 ^e	100 ^e	44000
美国	768	822	998	1100	250,000

注: r 为数据经修订, e 为估计值, NA 为资料暂无, 数据来源 USGS。

在临江—长白地区分布较为广泛。在这一地区, I 级硅藻土占资源总量的 20%~25%, 而 II 级、III 级硅藻土占总量的 65%~70%。中国硅藻土资源保有储量分布见图 1。

硅藻土分布非常广泛,除了南极洲以外,其他各大洲都有硅藻土的分布。

据统计,全球 122 个国家和地区都有硅藻土资源(姜玉芝贾嵩阳, 2011; 张致伟和郑立国, 2017),如表 2 所示。中国硅藻土主要分布在吉林、浙江、

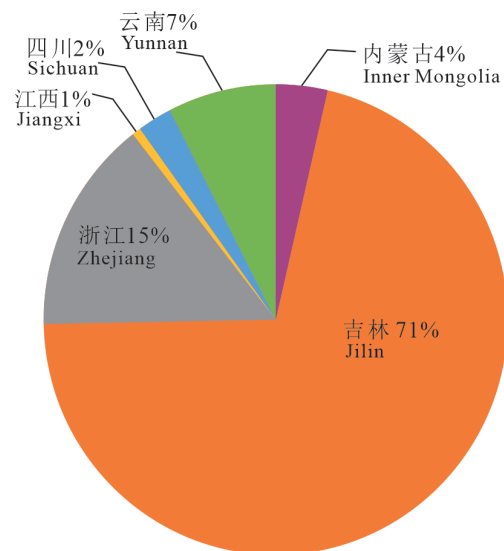


图 1 中国硅藻土资源储量分布
Fig.1 Distribution of diatomite resources and reserves in China

表 2 硅藻土资源分布概况 (据陆浩, 2001)

Table 2 Distribution overview of diatomite resources (after [Lu Hao, 2001](#))

国家和地区		资源分布
北美	美国	美国硅藻土资源广泛分布于东海岸和西海岸的各州，其资源主要是在西部各州集中。加利福尼亚州是硅藻土资源最丰富的地区，拥有全球最大的海相硅藻土矿床(Lompoc硅藻土矿)，同时可能还拥有全球最大的商业级淡水硅藻土矿床，此矿床位于沙斯塔郡的Britton湖区
	加拿大	有经济意义的硅藻土仅有位于布列颠哥伦比亚温哥华北克内尔矿床
	墨西哥	藻土资源分布于墨西哥北部，其中质量最优的矿床为Gatarina矿
欧洲	法国	法国是欧洲最主要的硅藻土资源国，主要硅藻土资源分布在南部中央高原地区
	德国	主要分布在下萨克森州，集中分布在汉诺威与汉堡之间
	意大利	商业性硅藻土矿床主要位于蒙特阿米亚塔附近
	西班牙	高质量的硅藻土资源主要分布在东南部的湖相沉积矿床
非洲	奥地利	分布有欧洲最大的硅藻土矿床，即Limberg矿床
	南非	主要硅藻土矿床仅分布于Ermelco地区和Pricka地区
	东非	主要分布在肯尼亚吉尔吉尔附近，是沉积在东非大裂谷更新代湖泊中
南美	阿根廷、巴西、秘鲁、智利、哥伦比亚	产出零星小矿床
亚洲	日本	主要分布在本洲东北部和中西部地区，包括九州东部和鹿儿岛，海和湖相矿床均有产出
	澳大利亚和新西兰	均有小型硅藻土矿床，其中用作助滤剂级别的硅藻土主要依靠美国进口

云南等省份,资源分布较为集中。

世界硅藻土资源分布虽然广泛,但主要以中、低品位为主,可供直接开发利用、经济价值较高的矿床很少。截至目前,全球仅有美国加利福尼亚州的罗姆波克矿床和吉林省白山地区的硅藻土矿床具备直接加工生产为产品而无需进行选矿的特点(李忠水等, 2013)。

3 典型矿床

本文采用周开灿(1988)的分类方法,依据硅藻土矿床形成机制和沉积环境的差异,将其划分为海相沉积型矿床和陆相(淡水)沉积型矿床。

3.1 陆相（淡水）沉积型硅藻土矿床

该类矿床主要形成于陆地的湖泊、沼泽、断陷盆地及山间盆地等环境, 中国吉林、浙江、云南等省份的硅藻土矿床多为此类型。其形成与新近纪至第四纪的火山活动(尤其是玄武岩喷发)、构造运动形成的沉积盆地以及温暖湿润的气候条件密切相关。矿体形态以层状为主, 部分为似层状或透镜状, 埋深较浅, 规模较大, 围岩多为玄武岩。硅藻生长所需的可溶性 SiO_2 主要来自玄武岩的风化或火山喷发提供的物质, 如雷州九斗洋硅藻土矿床产于火山构造洼地的湖泊沉积中, 吉林省白山市硅藻土矿床与玄武岩喷溢活动关系密切。

3.1.1 雷州九斗洋硅藻土矿床

作为中国最年轻的硅藻土矿床,雷州九斗洋硅藻土矿床产于第四纪中更新世晚期至晚更新世中

期的沉积地层田洋组中(周永清, 1990; 图 2)。其矿区内侧开阔、出口狭窄, 呈“葫芦”状, 长约 2000 m, 宽约 1500 m, 岩性由硅藻土、含黏土硅藻土、黏土质硅藻土、硅质黏土夹蒙脱石黏土及玄武质火山岩等组成, 厚度 40~60 m(屈荣英和陈永安, 2005; 潘标开等, 2021)。矿区广泛分布喜山期第四纪基性火山岩, 其风化溶解出的硅质对硅藻土的繁殖发育非常有利(冯璜等, 1995)。雷州九斗洋硅藻土矿床产

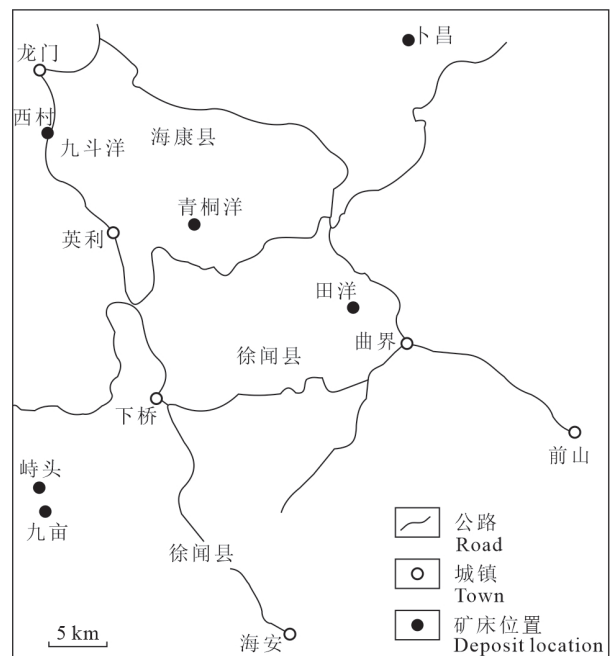


图2 雷州半岛硅藻土矿床分布(据冯璜等, 1995 修改)
Fig.2 Distribution of diatomite deposits in Leizhou Peninsula
(modified from Feng Huang et al., 1995)

于破火山口和火山构造洼地的湖泊沉积中,而这些破火山口和火山构造洼地又明显地受北西向与北东向或东西向断裂构造的交汇点所控制。

3.1.2 吉林省白山市硅藻土矿床

吉林省为中国硅藻土的主要产区,其硅藻土矿床集中分布在白山市(王健等, 2022; 图 3)。区域大地构造位置属中朝准地台辽东台隆、营口—宽甸台拱、长白复向斜的西南端(张致伟和郑立国, 2017)。硅藻土矿床赋存于新近纪马鞍山组地层中,成矿区域岩浆出露面积较为广泛,约占区域面积的 60%,构成平坦的玄武岩台地(王继梅, 2014; 马小顺等, 2020; 马骏雨, 2021)。白山市的大型硅藻土矿床均属于中新世矿床,其成矿作用主要与玄武岩喷溢活动关系密切。玄武质岩浆侵入活动本身携带大量的成矿元素,为矿床的形成提供了部分物质来源和热源。硅藻土与玄武岩不仅在空间上密切伴生,而且硅藻土的形成与玄武岩有一定的联系(李忠水, 2018)。

3.1.3 土耳其 Karacaören 硅藻土矿床

此矿床位于安纳托利亚中部 Nevşehir 附近 Ürgüp 镇 Karacaören 地区(图 4),该地区属于卡帕多西亚火山省,是一个海拔 1400~1500 m 的高原(Aydar et al.,

2012)。中新世中晚期,由于非洲—阿拉伯板块与欧亚板块的碰撞挤压,使得该地区抬升降起形成高原,随后经历了晚中新世—上新世以来复杂的新构造形变。根据古生物学、孢粉学和放射学数据,在卡帕多西亚火山省的北部,湖泊和河流沉积,包括中新世晚期到第四纪晚期的火山嵌层,形成了一个构造洼地。洼地中沉积物来自 Ürgüp 盆地,以前被称为 Ürgüp 组(Pasquaré et al., 1988)。卡帕多西亚火山省主要由不同层位的火成岩、安山岩和玄武质熔岩组成,这些火山岩与晚中新世—上新世湖相沉积有关。该地区火山沉积单元不规则地覆盖在古生代—白垩纪变质岩和晚白垩世蛇绿岩基岩之上。

3.2 海相沉积型硅藻土矿床

该类矿床主要形成于海洋环境,多分布在大陆边缘、边缘盆地等区域,如北太平洋中高纬度的边缘盆地、丹麦日德兰北部等。其形成与晚渐新世—中新世早期的构造活动和火山活动密切相关,中新世中晚期海水缺氧条件会提高硅藻土的沉积速率。该类型矿床的硅藻遗骸沉积于海洋盆地中,常与火山岩、陆相碎屑岩等共生,矿体规模较大,受全球性海平面变化和海洋环流影响明显。

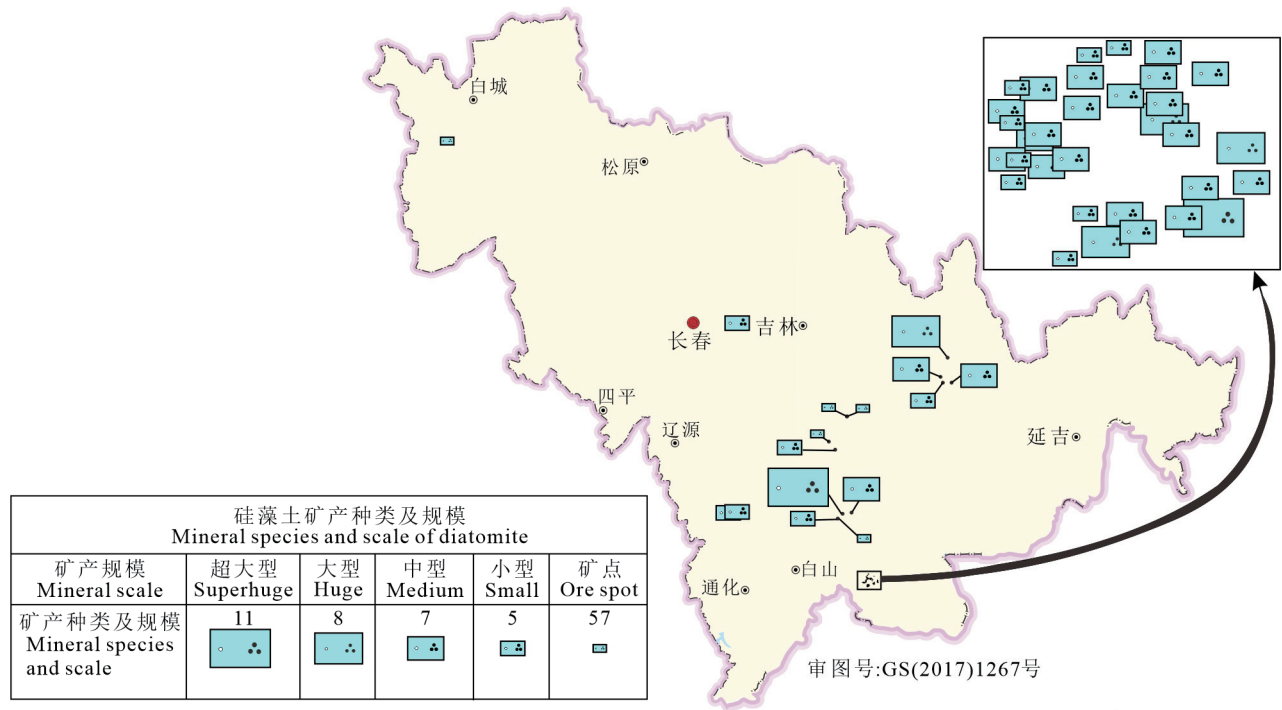


图 3 吉林省硅藻土矿产地分布图(据王健等, 2022)

Fig.3 Distribution map of diatomite mineral deposits in Jilin Province (after Wang Jian et al., 2022)

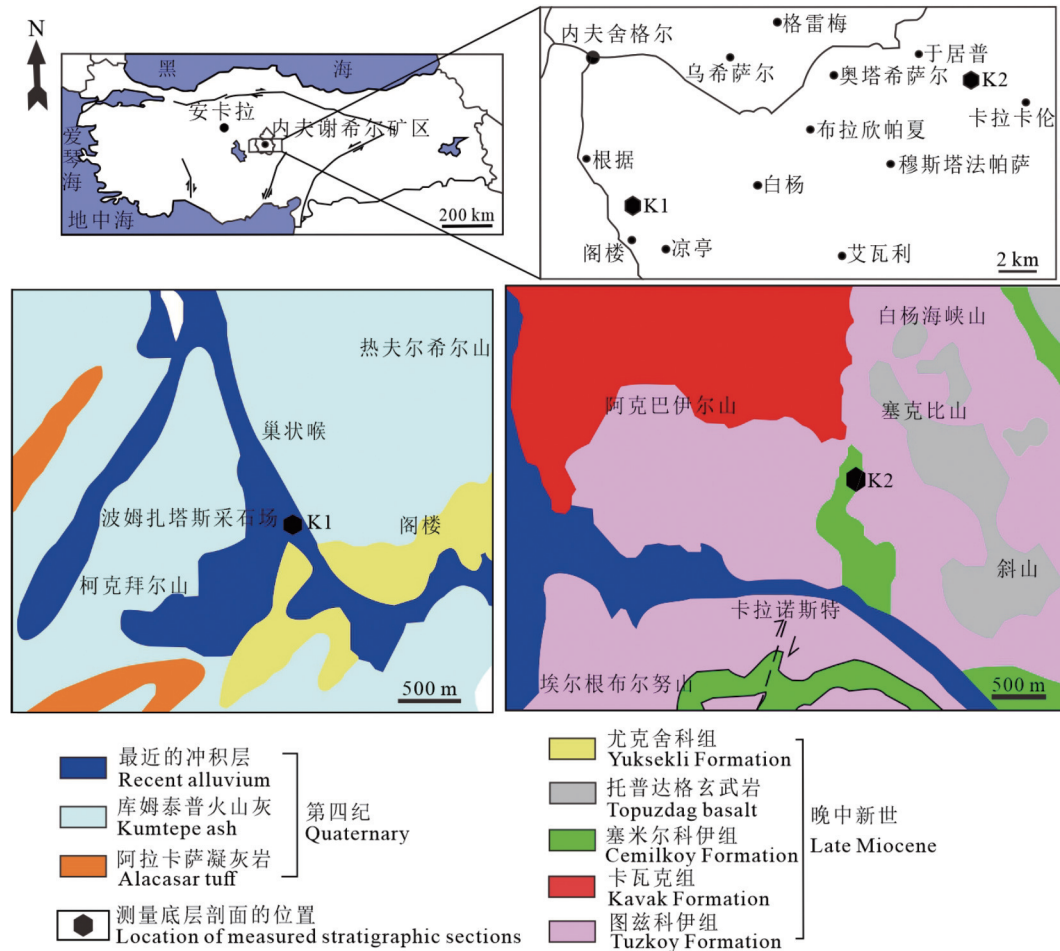


图 4 研究区实测地层剖面位置及地质图(据 Pasquaré et al., 1988 修改)

Fig.4 Measured stratigraphic section position and geological map of the study area (modified from Pasquaré et al., 1988)

3.2.1 丹麦日德兰北部硅藻土矿床

中生代 Fennoscandian 边界带断层和 Ringkerpin-fyn 高地两侧断层的运动控制海盆下沉 (Baartman and Christensen, 1975), 为硅藻土提供了良好的沉积场所。到古近纪, 丹麦次海盆形成了北海中央地堑两侧广阔陆架区域的一部分 (Ziegler, 1975; 图 5), 该时期北大西洋区域的火山活动频繁, 为硅藻沉积提供了丰富的硅质来源。硅藻土主要沉积于盆地北部古斜坡, 以浮冰的形式暴露出来, 第四纪期间受到冰川错位和折叠作用, 但这个过程经历的时间不长。丹麦次盆地的上古新统一始新统沉积物是细粒、富含蒙脱石的黏土 (Dinesen et al., 1977), 矿床中硅藻壳体以海生硅藻为主(如圆筛藻属), 与火山灰薄层交替沉积, 单个矿层中火山灰夹层可达数十层至数百层。这种结构反映了火山活动与硅藻沉积的动态平衡, 同时火山灰的掺入可提升矿石

的化学活性与吸附性能。

3.2.2 全球主要海相沉积型硅藻土矿床

全球海相沉积型硅藻土矿床分布广泛, 除丹麦外, 美国、秘鲁及日本等国家均有产出, 其成矿特征与地质背景各具特色。

美国加利福尼亚州罗姆波克矿床是世界著名的第三纪海相沉积矿床, 矿层厚度可达 700 余米, 与黏土沉积物薄层互层。该矿床硅藻种类丰富, 以舟形藻为主, 矿石品质高且产量居世界首位, 物理性质优异, 表现为细腻松散、质轻多孔、吸水性和渗透性强, 孔隙率达 80%~90%, 化学稳定性高。

秘鲁伊卡地区的硅藻土主要形成于中新世—上新世海相沉积环境, 与细粒砂岩、硅藻质粉砂岩及少量灰岩层共生。这一环境为硅藻的大量繁殖提供了适宜的水体条件, 其沉积过程受近岸至近海的水动力条件控制。其硅藻壳体以圆筛藻属为主,

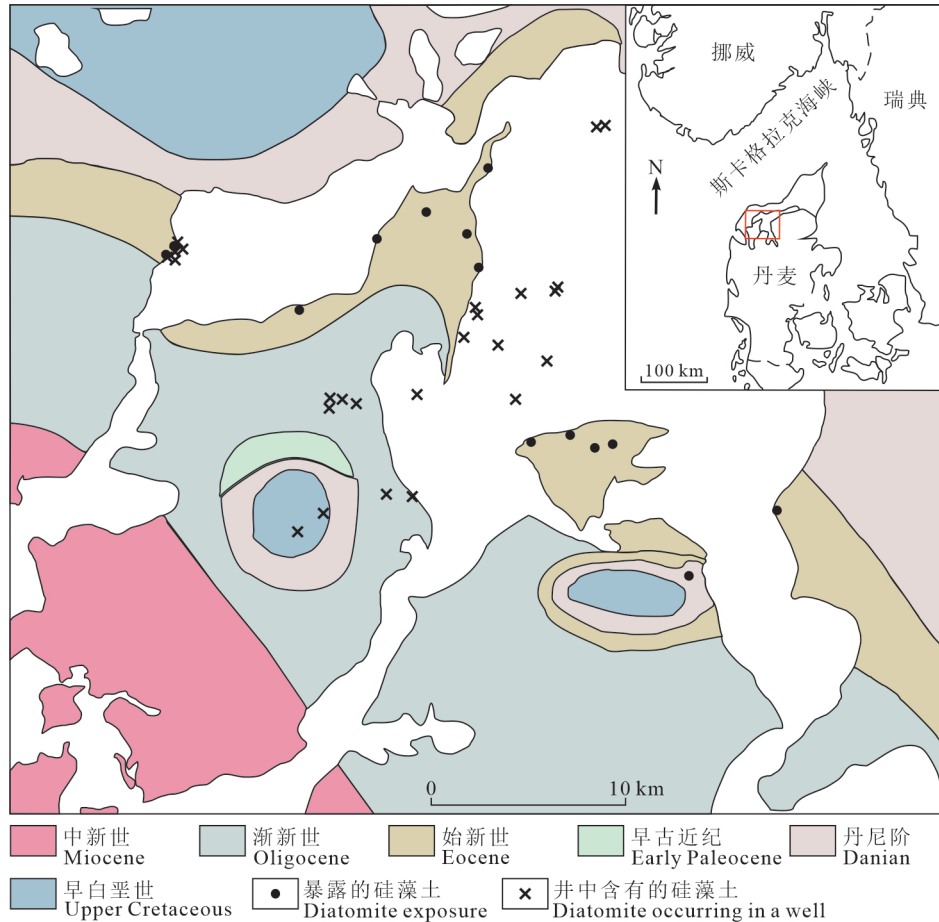


图 5 研究区地理位置及硅藻土位置(据 Pedersen, 1981 修改)

Fig.5 Geographical location of the study area and location of diatomite (modified from Pedersen, 1981)

但 SiO_2 含量仅 60.37%, 属三级硅藻土; 因 CaO 含量较高, 需经预处理以降低工业应用中的爆裂风险。

日本北海道钏路(Kushiro)硅藻土矿床位于北海道东部钏路盆地, 临太平洋, 属环太平洋火山地震带的断陷盆地, 受鄂霍茨克板块与太平洋板块相互作用影响。该矿床形成于中新世至上新世的浅海—陆架海环境, 盆地内海水较浅(水深<200 m), 富硅洋流带来充足的物源补给, 硅藻以海相浮游种为主, 沉积于富有机质的泥质海相地层中。

上述矿床均揭示出海相沉积型硅藻土的成矿过程与海洋动力条件、火山活动及古气候环境存在紧密关联, 其矿相特征亦直接影响工业应用方向。

4 矿床成因类型

4.1 矿床成因

4.1.1 成矿地质条件

新生代以来, 中国大陆受到东部断裂活动、火

山活动及升降运动的综合影响, 形成了一系列火山盆地、断陷盆地及山间盆地(周开灿, 1988; 屈荣英和陈永安, 2005), 例如上新世通过地块垂直升降运动等一系列方式形成的长治盆地(王涛等, 2020)、新近纪地壳以差异升降为主的活动形成的江西头陂盆地(杨华泽等, 2017)、吉林省在新近纪太平洋板块与东北亚大陆边缘的相互作用下形成的大小各处盆地等(王磊和任鹏, 2013; 丁瑞, 2014)。随着盆地下沉, 水体积聚形成湖盆, 为硅藻提供了良好的生存与堆积场所, 这使得沉积盆地成为硅藻土成矿的重要条件。

4.1.2 成矿物质来源

硅藻的生长、繁殖需要大而稳定的湖水盆地并且水中有丰富的可溶性 SiO_2 以及其他供给充足的营养物质(潘标开等, 2021)。无论是陆相还是海相沉积的硅藻土矿床, 绝大部分都与火山岩共生(王登红等, 2002)。因此新生代间歇性的玄武质火山喷

发活动为可溶性 SiO_2 提供了丰富的物质来源,促进了硅藻的生长和繁殖,为其提供了必要的营养物质;而后期的玄武质火山的喷发活动覆盖了已形成的硅藻土矿层,起到了对硅藻土矿床的保护作用(马小顺等, 2020)。因此硅藻的生长、死亡和沉积与基性火山活动密切相关。

4.1.3 成矿作用过程

自中新世以来,盆地外围大面积铝硅酸盐岩的化学以及物理风化作用加强,分解出来很多 SiO_2 以质点或胶体状通过水流被带入盆地,硅藻以这些可溶性 SiO_2 为生(丁瑞, 2014; 杨华泽等, 2017; 王涛等, 2020)。中新世至上新世全球气候开始变暖,使得当时盆地地区气候温暖、湿润,雨水较为充沛,且湖盆中常保持一定的水量,阳光充足,对硅藻群体的生长、发育和繁殖十分有利,它们从水体中吸收营养物质构成自己的骨骼躯壳,在其死亡后,硅质骨骼保存下来形成硅藻淤泥,经过初步成岩后,形成具有胶结性质但不紧密的硅藻土层。

4.2 矿床分类

硅藻土矿根据其硅藻种类组合和含杂质特征有着不同的分类,同一矿区的硅藻土在不同的位置也存在差异,而各国对硅藻土成因类型没有详细的划分标准。Taliaferro(1933)最早将世界上常见的硅藻土矿床分为四类:海相硅藻土矿床、沼泽硅藻土矿床、更新世间冰期硅藻土湖泊矿床以及与新近纪火山活动有关的湖泊和海洋硅藻土矿床;周开灿(1988)将硅藻土矿床分为海相和陆相(淡水)成因;陆浩(2001)将硅藻土矿床按照形成环境和时间分为

三类:沉积于大陆边缘的海相硅藻土矿床、沉积于沼泽和湖泊的陆相硅藻土矿床以及现代湖泊、沼泽、泥塘中沉积的硅藻土矿床;潘标开等(2021)以 SiO_2 来源作为区分条件,将中国陆相沉积型硅藻土矿床分为两个亚类,一类是火山物源的硅藻土矿床,另一亚类是陆源沉积的硅藻土矿床。

本文采用周开灿(1988)的矿床分类对硅藻土矿床进行综述。原因如下:(1)该分类以沉积环境为核心划分依据,直接反映矿床形成的本质差异,且逻辑简洁,能清晰区分海洋与陆地环境在成矿空间、物质来源及沉积过程中的控制作用;(2)与本文聚焦的“形成机制和沉积环境对矿床分布、成因及找矿远景的影响”研究目标契合,可有效支撑对两类矿床成矿条件及分布规律的对比分析;(3)其他分类方法虽更细致,但涉及时间、具体沉积亚环等更多维度,可能导致分类边界模糊。

4.3 矿区矿体特征

中国已发现的硅藻土矿床矿体形态以层状为主,也有少量的似层状和透镜状矿体,围岩主要为玄武岩(丁瑞, 2014; 王继梅, 2014)。矿体呈平缓的产状,岩性变化不明显,埋深较浅,规模较大。表3概括了中国主要硅藻土矿床的规模与产状特征。

4.4 成矿时代特征

从成矿时代来看,中国硅藻土矿床主要形成于新近纪至第四纪,最早成矿时代可以追溯到新近纪中新世,随后在不同的时代都有硅藻土矿床的形成。其中,中新世和上新世形成的矿床较多且规模较大。因此,中国硅藻土矿床的成矿时代和赋存层位

表3 中国主要硅藻土矿床规模与产状特征(据刘振敏, 2018; 潘标开等, 2021)

Table 3 Scale and occurrence characteristics of major diatomite deposits in China (after Liu Zhenmin, 2018; Pan Biaokai et al., 2021)

矿床名称	成矿时代	规模	矿体形态、产状
云南寻甸县先锋矿床	中新世	矿区呈长9.5 km, 宽0.5~2 km的形状, 矿体厚度在200 m, 最厚处达364.73 m, 属于大型矿床	层状, 倾角10°~35°, 埋深400 m
浙江嵊县浦义硅藻土矿	上新世	矿体呈长1900 m, 宽500~600 m的形状, 厚23.5~36.2 m, 属于大型矿床	层状, 埋深0~80 m, 倾角12°~19°
内蒙古商都县谢家坊硅藻土矿	中新世	矿体规模为中型	层状, 产状平缓
山东临朐县解家河硅藻土矿	中新世	8~10层矿, 层厚0.5~2 m, 长400 m, 宽400 m	层状, 倾角10°~20°
吉林长白县西大坡硅藻土矿	中新世	矿体2个, 厚1~9 m, 大型	层状, 倾角2°~3°
吉林桦甸硅藻土矿	更新世	厚度不大, 为几十厘米至4 m不等	似层状、透镜状
吉林长白县马鞍山硅藻土矿	中新世	矿体延伸500 m, 宽约200 m, 单层厚大于0.5 m, 最厚10.43 m	层状, 倾角1°~5°
吉林永吉县三官地硅藻土矿	中新世	矿体长7200 m, 宽150~260 m, 平均厚7.34 m	扁平状、透镜状
浙江嵊县浦桥硅藻土矿	上新世	矿带延伸10 km, 宽2~3 km, 厚48~52 m	水平层状
雷州九斗洋矿区	更新世	矿体长2000 m, 宽1500 m, 厚5.11~42.35 m, 矿体连续	水平层状
雷州卜昌矿区	更新世	矿体长宽各200 m左右, 厚0.5~4.8 m	水平层状

主要分布在新近纪和第四纪地层中(刘振敏, 2018)。表 4 概括了中国主要硅藻土矿床成矿时代特征。

4.5 硅藻土矿石特征

4.5.1 矿物成分

硅藻土的矿物成分主要包括非晶质态硅藻蛋白石,其次含有不定量的有机质、高岭石、水云母类以及少量蒙脱石类等黏土矿物。此外,陆源碎屑、碳酸盐和火山灰是常见的混杂物质,同时还包括少量的长石、角闪石、辉石、金红石、铁质(褐铁矿、赤铁矿、菱铁矿)等。

4.5.2 化学成分

硅藻土主要化学成分为 SiO₂,同时含有少量 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、P₂O₅ 以及有机质等,个别会含有一些金属杂质,如 Cr、Ba 等。不同地区的硅藻土矿其化学成分存在差异,含量也有所不同,表 5 总结了全球硅藻土矿床的化学成分。

硅藻土的化学成分严格受矿石矿物组分的控制,矿石中高硅藻含量通常伴随着较少的杂质,因此 SiO₂ 含量越高,说明硅藻土质量越好。硅藻土中

藻类种属组合与硅藻遗骸的完整性密切相关,对硅藻土质量有一定影响。根据资料分析,中国硅藻土矿床中的藻类主要为淡水硅藻,其中以中心目硅藻为主,且在硅藻土矿床中含量高。优质硅藻土主要分布在吉林省长白山地区,具有直接利用的特性,而其他地区的硅藻土含杂质较多,通常不能直接利用(王春连等, 2022)。

4.5.3 矿石类型

硅藻土矿石可划分硅藻土、含黏土硅藻土、黏土质硅藻土三种类型(表 6)。

硅藻土: 为 I 级品优质矿石,具有生物结构,呈微层状或块状构造,单层厚度在 1~5 mm。其质地轻盈,疏松细腻,湿润时呈豆渣状,而在干燥状态下呈白土状。

含黏土硅藻土: 为 II 级品较优质矿石,具有生物结构,呈微层状构造,微层厚一般在 3~10 mm,质感相对较轻,固结程度较差。

黏土质硅藻土: 为 III 级品,这种矿石属于一般矿石,质量相对较差;生物结构,块状构造,湿润状态下表现出较强的黏性,干燥后则较为坚硬。

表 4 中国主要硅藻土矿床成矿时代特征

Table 4 Metallogenic epoch characteristics of main diatomite deposits in China				
矿床名称	地质时代	地质事件	沉积环境	气候条件
云南寻甸县先锋矿床	中新世		山间盆地	
雷州九斗洋矿区	更新世	断裂构造	负火山口湖盆	温暖湿润
雷州卜昌矿区	更新世	断裂构造	海湾堆积洼地	温暖湿润
吉林长白县马鞍山硅藻土矿	中新世	断裂构造	湖泊盆地的过渡带	良好, 阳光充足
吉林长白县西大坡硅藻土矿	中新世	断裂构造	湖泊盆地的过渡带	良好, 阳光充足
浙江嵊县浦义硅藻土矿	上新世	火山喷发	火山口湖盆	温暖湿润

表 5 全球硅藻土矿床化学成分 (据刘振敏, 2018)

Table 5 Chemical composition of diatomite in the world (after Liu Zhenmin, 2018)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量
美国加利福尼亚州(Lompx)	89.70	3.72	1.09	0.10	0.30	0.55	0.31	0.41	3.70
日本	86.00	5.80	1.60	0.22	0.70	0.29	0.48	0.53	4.40
肯尼亚(Soysambu)	84.50	3.06	1.86	0.17	1.80	0.39	1.19	0.91	6.08
西班牙(Albacete)	88.60	0.62	0.20	0.05	3.00	0.81	0.50	0.39	5.20
墨西哥(Jalisco)	91.20	3.20	0.70	0.16	0.19	0.42	0.13	0.24	3.60
美国爱达荷州	89.82	1.82	0.44	0.07	1.26	0.54	1.03	0.22	4.02
德国	68.30	1.57	2.37	0.11		0.18	0.84		26.50
美国马里兰州	79.55	8.18	2.62	0.70	0.23	1.30	0.66	0.65	5.80
美国内华达州	86.00	5.27	2.12	0.21	0.34	0.39	0.24	0.29	4.90
云南省寻甸	70.28	13.41	4.96	0.41	1.31	1.17	0.63	0.72	7.03
四川省米易县	71.82	13.24	3.71	0.41	19.10	0.87	0.62	0.57	6.21
浙江省嵊县	71.46	12.81	4.31	0.43	1.27	1.07	0.65	0.78	6.32
吉林省长白县	89.21	3.98	1.06	0.31	0.57	0.36	0.41	0.69	5.92
吉林省临江市	96.43	4.57	1.17	0.31	0.30	0.40	0.57	0.54	5.83
吉林省敦化县	73.36	11.76	3.87	0.51	1.17	1.28	0.73	0.67	7.97

注: 单位为%。

表 6 硅藻土矿石类型				
Table 6 Diatomite ore types				
类型	工业品级	颜色	硅藻壳含量	黏土含量
硅藻土	I级	白色、灰白色、灰绿色	>90%	<5%
含黏土硅藻土	II级	灰绿色为主，白色、灰色为辅	>80%	<10%
黏土质硅藻土	III级	灰、绿色为主	65%~80%	<25%

5 硅藻土应用

在欧洲,硅藻土作为矿物资源使用已有一百多年的历史,最初用于吸收硝化甘油(肖力光等,2010)。硅藻土具有一系列优良特性,如质轻、孔隙率大、比表面积大、热稳定性好、熔点高以及耐腐蚀等特性,同时还表现出强大的抗腐蚀性,因而广泛用于各个行业(图 6),对国家经济的发展具有十分重大的意义。随着人们生活水平的不断提高,硅藻土产品的应用将会更加广泛,未来 5~10 年,硅藻土产业有望呈现较快发展态势。表 7 概括了硅藻土主要应用领域及其用途。

5.1 废水净化领域

在工业生产中,水中会含有不同的污染物,如重金属、放射性元素、磷酸盐、有机染料等等。杨勤桃等(2022)通过研究硅藻土不同的改性方法,如热处理、酸碱改性、无机改性、接枝改性等,以期达到对水中目标污染物的处理,结果表明不同功能化改性的硅藻土对不同污染物废水治理的效果很明显(表 8)。在人类生活中也会产生大量污水,随着污水排放的日益增多,河道水体的富营养化愈发严重,而造成水体富营养化的控制因子就是磷。张颢竞等(2020)采用原位共沉淀的方法对硅藻土进行了氢氧化镁改性,在含磷浓度为 2.0 mg/L 的模拟污水

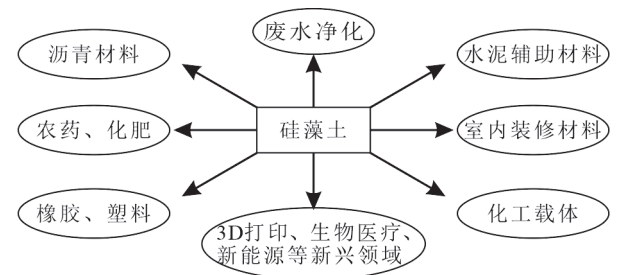


图 6 硅藻土应用领域
Fig.6 Application fields of diatomite

表 7 硅藻土应用领域及其用途	
Table 7 Application fields and uses of diatomite	
传统领域	主要且关键用途
废水净化领域	对生活或工业生产所产生的废水中包含的不同污染物,如重金属、放射性元素、磷酸盐、有机染料等等具有有效的净化作用
道路沥青材料	通过硅藻土改性的沥青以提高公路的使用寿命
农业领域	硅藻土在水源保护、农田环境保护、防治病虫害及作物储存等方面有非常广泛的应用前景
建材领域	可以应用到防水、隔热等材料中
新兴领域	主要且关键用途
3D打印技术	主要用于改性聚乳酸(PLA)制备3D打印细丝
新能源领域	用于延长锂电池的寿命
生物医疗领域	在药物控释、组织工程、生物传感器等方面应用广泛

进行除磷实验,当改性硅藻土投加量为 1 g/L,污水 pH 为 7,水温为 25℃,吸附时间为 8 h 时,污水中磷的去除率达到 80.70%,吸附量为 1.61 mg/g,相比于改性前的硅藻土提高了近 5 倍。同时,该团队以 NaOH 溶液和氨水溶液作为解吸剂对吸附剂进行再生实验,结果表明此改性硅藻土还具有良好的重复利用性能,体现了极高的应用价值。Marín-Alzate et al.(2021)将中低品质硅藻土进行改性后研究其对于工业废水中重金属的去除率,结果表明对 Zn 的去除率为 98.35%,对 Pb 的去除率为 94.47%,对 Cu 的

表 8 改性硅藻土对不同重金属的吸附情况 (据杨勤桃等, 2022)						
Table 8 Adsorption of different heavy metals by modified diatomite (after Yang Qintao et al., 2022)						
离子种类	改性方法	吸附条件			平衡吸附量/(mg/g)	文献
		pH	温度/℃	时间/min		
As(V)	KMnO ₄ +(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	7	25	15	108.2	Du et al., 2014
Hg(II)	3-氨基苯硫酚/APTES接枝	4	25	15	242.42	Fu et al., 2019
Zn(II)	壳聚糖	6	10	130	127.4	Salih and Ghosh, 2018
Cu(II)	微波+超声+酸化	6.5	25	70	57.5	张馨予和彭敬东, 2018
Pb(II)	葡萄糖+碳化+KMnO ₄	2.42	30	50	56.84	Li et al., 2014
Cd(II)	Mg(OH) ₂	6	25	120	90.64	李振等, 2018
Cr(VI)	Nb ₂ O ₅ +水热	3	25	30	115	Du et al., 2018
Ni(II)	酸化+超声+MgCl ₂ /FeCl ₃	7	25	90	166.68	Nefzi et al., 2018

去除率为 90.3%。

综上所述,硅藻土对于工业及生活所产生的废水在处理过程中具有很有效的应用,对于企业实现降本增效,提升企业自身竞争力有很大的帮助,同时对于中国中低品位硅藻土的利用提供了思路。

5.2 道路沥青材料

随着中国机动车数量的增加,对路面性能的需求不断提升,尤其是在北方地区受到极端天气的影响,可能会导致路面破损严重。因此,需要对沥青路面进行必要的改良和改性,以适应不同气候和交通条件,确保道路的耐久性和安全性。硅藻土改性后用于铺建的公路不仅具有出色的耐磨性,而且表现出强大的抗冲击力,同时还具备卓越的抗温差性能,这些特性显著提高了公路的使用寿命(徐建军等, 2011)。陈其龙等(2022)通过将不同掺量的废橡胶粉掺入 13% 硅藻土改良的沥青中,成功制备出橡胶-硅藻土复合改良沥青。然后进行马歇尔试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验以及浸水车辙试验,研究结果表明,在 13% 硅藻土改性沥青混合料中,当废橡胶粉的掺量达到 17% 时,该混合料表现出最佳的抗水侵蚀性能。程帅等(2022)研究了较大掺量的硅藻土对 SBS 改性沥青的物理性能以及短期和长期热老化性能的影响,表明硅藻土对 SBS 改性沥青的高温性能的改善作用很优秀,也可以有效改善 SBS 改性沥青的抗老化性能。中国公路里程数稳居世界第一,公路网络横跨大江南北,因此路面损害问题也会不同程度地显现出来,如炎热季节车辙推挤、冬季低温开裂。为有效防治路面车辙问题。Du et al.(2022)在沥青混合料中加入硅藻土,通过室内试验和现场路面铺设,对陇东黄土腹地活性硅藻土沥青路面和 SBS 沥青路面的路面性能进行了对比分析(表 9),结果表明在相同环境温度下,活化硅藻土沥青路面与 SBS 改性沥青路面相比具有表面温度低、稳定性高、水渗透系数低的优点。因此,在黄土地区使用硅藻土改性沥青路面可以提高路面的温度稳定性,延长使用寿命,降低施工成本,可推广应用。

5.3 农业领域

粮食问题一直是困扰全世界人民的一个主要问题,尤其是俄乌冲突期间,这个问题更为显著。因此农田的科学化管理应用、粮食存储以及新型绿色无污染农药等高新技术应运而生,新技术利用硅

表 9 SBS 与活化硅藻土改性沥青路面性能比较
(据 Du et al., 2022)

Table 9 Performance comparison of SBS and activated diatomite modified asphalt pavement (after Du et al., 2022)		
实验项目	SBS	活化硅藻土
孔隙率/%	4.0	3.8
增值税/%	16.5	15.6
稳定性/%	12.5	13.7
流量值/mm	2.6	2.8
动态稳定性/(次/mm)	8770	7193
低温弯曲(με)	2635	2750
水渗透系数/(mL/min)	68	56
剩余稳定性/%	86.5	90.2
每公里成本/百万	96.5	87.9

藻土特有的理化特性,做到低成本、绿色、高效、少污染甚至无污染,可以更好地保护农田中的作物。

农药对于农田里防治虫害有极大的帮助,但农药残留会保留在废水、土壤和地表水中,为了减少甚至消除农药残留带来的负面影响,科学家们尝试了多种方法,Erol et al.(2019)为了去除水溶液中的疏水性农药(DDT),以硅藻土为原料,同时加入具有磁性的 Fe₃O₄ 和疏水性的十八烷基三甲氧基硅烷(OTMS)而后对其改性,根据表征研究和吸附实验,在硅藻土结构中引入 Fe₃O₄ 和 OTMS 后,硅藻土结构的表面积增加了 15 倍。此外,在磁性硅藻土结构上附加 OTMS 基团可以使硅藻土更有效地吸附 DDT。温度的升高导致吸附量的增加,说明吸附相互作用如预期的以疏水为基础。对吸附过程进行了等温线和动力学研究,表明改性硅藻土可以快速高效的吸附 DDT。除了农药,农田灌溉也是一大成本,传统灌溉方式对于水电资源以及成本都会产生一定的浪费。吕华芳等(2022)为了降低农业灌溉成本,提高土壤墒情检测效率,结合土壤水分特性和农业灌溉特点,借鉴张力计结构及测量原理,研发了电阻式“硅藻土-过滤器”型低成本土壤墒情传感器。同时结合物联网传输技术及云平台组成的土壤墒情自动监测系统,可以实现大面积土壤墒情的自动采集、无线组网及远程实时监控等功能,设备在甘肃、宁夏、青海三地进行了长达两年的实地应用。结果表明该系统性能良好、组网方便、扩展性强,无需现场人工维护,可进行土壤墒情的长期稳定监测;在土壤有关领域(如农业、土壤环境、水资源等)的科学研究和生产应用方面具有广阔前景和良好效益。

此外,因硅藻土具有很好的吸水性、保水性和抗药性等优点,可以作为高效的土壤改良剂,如水源保护、农田环境保护、提高作物产量、防治病虫害等。在作物储存方面,硅藻土可以通过吸附农作物中的水分、氧气和其他有害物质,使农作物保存得更长时间、更安全、更有价值。然而,目前硅藻土在农作物存储方面的应用仍处于初步阶段,需要进一步研究和改进。希望未来通过不断的探索和研究,可以更好地发挥硅藻土在农作物存储方面的作用,为农业生产带来更多的效益。

5.4 建材领域

硅藻土是一种天然的、富含硅元素的黏土矿物,它具有独特的物理和化学性质,因此在建筑材料领域有着广泛的应用。首先,硅藻土具有很高的抗渗性能,它可以防止水分和污染物进入建筑物内部,保护建筑物的安全性和耐久性。此外,硅藻土还具有良好的隔热性能,能够有效减少建筑物内部的热量流失,提高室内的舒适度。其次,硅藻土在建筑材料中具有很高的加工性能,它可以被加工成各种形状和尺寸的建筑材料,如砖、瓦、涂料等,并且在生产过程中不会产生有害物质,对环境没有污染。最后,硅藻土还具有耐火性和隔音性等作用且价格低廉,因此在建材领域有着非常广泛的应用。

近年来,环保已经成为全球都极为重视的问题,从全球来看,建筑行业贡献了碳排放总量的40%。为了实现可持续发展,Kipsanai et al.(2022)对硅藻土掺入地聚合物混凝土开发问题进行了全面调查,表明使用硅藻土是创造可持续、绝缘、轻质建筑材料的有效途径之一,同时最大限度地减少工业固体废物对经济和环境的有害影响。虽然很多科学家对于混凝土的可持续性提出了多种方案,但地聚合物水泥是多种方案中最具可持续性的方案之一,因为它不需要高温窑炉,不需要巨大的燃料支出,也不需要生产过程中对工厂和设备进行大量的资本投资。Naifah et al.(2021)将硅藻土(DE)分别以0%、5%、10%、15%比率替代高强度混凝土(表10),将其在10%NaCl溶液中分别浸泡1个月和2个月进行对比,测试其抗NaCl侵袭能力,结果表明以不超过水泥重量的15%来代替高强度混凝土,可加强混凝土颗粒之间的黏结,可以使高强度混凝土抗NaCl侵袭能力增强(表11)。

表 10 HSC 每立方米的混合比例 (据 Naifah et al., 2021)
Table 10 Mix proportion of HSC per m³
(after Naifah et al., 2021)

混合物	硅藻土/%	配料/kg					
		水	水泥	硅藻土	沙子	裂石	超塑化剂
DE0	0	184	613	0	924	697	9.2
DE5	5	184	583	31	924	697	9.2
DE10	10	184	552	61	924	697	9.2
DE15	15	184	521	92	924	697	9.2

表 11 NaCl 侵蚀下混凝土试样的质量损失
(据 Naifah et al., 2021)

Table 11 Mass loss of concrete specimens due to NaCl attack (after Naifah et al., 2021)

浸泡时间	混入硅藻土的 混凝土	浸泡前平均	浸泡后平均	平均质量 损失/%
		质量(gr)	质量(gr)	
1个月	0%	335.33	334.77	0.17
	5%	341.67	341.13	0.16
	10%	337.33	336.80	0.16
	15%	334.33	333.97	0.11
2个月	0%	319.33	318.73	0.19
	5%	350.67	350.10	0.16
	10%	338.00	337.43	0.16
	15%	342.00	341.53	0.14

5.5 新兴技术领域

5.5.1 3D 打印技术

3D 打印作为新兴技术,其应用十分广泛,如医药、汽车、航空工业和建筑等领域。而3D打印中最常用的材料之一是聚乳酸(PLA),PLA是一种生物聚合物,Dobrosielska et al.(2020)利用熔融沉积建模(FDM)技术,采用一种由PLA作为聚合物基体和硅藻土作为扩展剂和结构填料组成的复合材料的方法,在不损害产品的生态友好性的前提下,将获得的改性材料制成3D打印细丝与纯PLA材料进行对比。结果表明,硅藻土改性PLA复合材料的热稳定性更高、疏水性更强、水接触角更大、机械强度参数均较高,由这种复合材料制成的长丝密度更大。Ma et al.(2022)将硅藻土微粒掺入3D打印的复合支架中,将其作为治疗皮肤烧伤创面的功能性敷料。结果表明,含硅藻土的3D打印复合支架表现出了良好的生物活性,可以有效地帮助皮肤烧伤创面恢复,加速皮肤修复和组织再生。

5.5.2 新能源领域

随着经济社会的发展,人类社会对于能源需求越来越高,而传统能源对环境伤害较大,因此近几年人们对于新能源的呼声逐渐增大。锂电池因其具有高比容量、高电压以及出色的循环性能等优势

而备受瞩目,被认为是未来能源领域的新一代能源之一。虽然锂硫电池的市场潜力十分巨大,但可溶性多硫化物的穿梭极大地恶化了电池性能。Li et al.(2017)为了抑制可溶性多硫化物的扩散,在阴极中加入了具有丰富的天然三维有序孔隙的硅藻土来捕获多硫化物,结果表明在锂硫电池正极中添加硅藻土是一种廉价有效的提高锂硫电池寿命的方法。在全固态锂电池中,由于锂的易挥发性,分层金属锂基阳极的制造是非常困难的。Zhou et al.(2019)以天然硅藻土为模板来构建高性能全固态锂金属电池,结果表明,由该硅藻土衍生的混合阳极与磷酸铁锂阴极耦合的全固态金属电池展现出卓越的循环稳定性和高速率性能。这说明天然硅藻土的应用可以有效推动利用可持续自然资源来制造高性能的全固态锂电池。

5.5.3 生物医疗领域

天然硅藻土微粒具有生物相容性、无毒、多孔性、高表面积和易于表面修饰等优良特性,因此在生物医疗方面也有很广泛的应用,如药物控释、组织工程、生物传感器等方面。在药物控释方面,Uthappa et al.(2018)为解决天然硅藻土在药物应用中较差的载药吸附、高的初始爆发释放等问题,采用另一种高表面积材料干凝胶对硅藻土进行表面改性,通过 FESEM、BET、ATR、IR、XRD 和 UV-Vis 等技术对其表面改性和载药进行了验证,结果表明改性后硅藻土的载药能力与效率有所提高,药物的控释也得到了增强,这对于用天然材料来开发这种改性的复杂材料来控制药物输送系统开辟了广阔的前景。骨质疏松症、骨髓炎、骨肉瘤、口腔颌面部肿瘤等骨病引起的骨愈合缺陷仍然是临床面临的重大挑战,目前这些疾病通常需要骨移植来替代缺失的骨头。Wang et al.(2021)采用冻干技术成功制备了新型改性硅藻土/壳聚糖支架材料,通过实验表明由该材料制备的复合支架在细胞增殖能力和成骨性能方面表现良好,可以达到附近骨组织再生的目的。

6 找矿潜力

陆相沉积型硅藻土矿床的形成条件主要有:新近纪—第四纪火山喷发而形成的大规模玄武岩分布区域;陆相沉积盆地;气候湿润,水量充沛。海相

沉积型硅藻土矿床形成条件主要有:晚渐新世—中新世早期的构造活动和火山活动形成的盆地;中新世半深海底层水缺氧条件;来自河流、风化物等的陆相物源。

6.1 国内找矿潜力

中国硅藻土分布十分广泛,主要分布在吉林、浙江、云南等省份,均为陆相沉积型硅藻土矿床。其矿床的形成主要受到沉积盆地和玄武岩分布的影响,吉林省新近纪以来形成的各类盆地,尤其是赋存在马鞍山组地层中的盆地,被认为具有良好的找矿潜力。云南省的硅藻土矿床主要赋存于腾冲成矿带和临沧—勐海成矿带中,此成矿带中的新近纪—第四纪产生的断陷盆地和山间盆地,因其在晚中新世—上新世受南亚季风气候影响,使得中国西南地区气候湿润(郑丽端, 2020),盆地与合适的气候可以为硅藻土的形成提供有利条件,因此可以作为硅藻土找矿远景地区,如腾冲油灯庄、毛家村、芒棒、团田、蒲川等盆地,双江芒孝—尹捧盆地,临沧勐托盆地和沧源勐省盆地等。

综上所述,中国东部地区的北东向构造、北北东向构造形成的断陷盆地,以及火山构造形成的火山洼地、西南部地区喜山运动第Ⅱ幕北东东向的中小型构造盆地,均为找矿远景地区。

6.2 国外找矿潜力

国外分布着大量海相沉积型硅藻土矿床,如沉积在北太平洋边缘与大陆边缘形成的新近纪硅藻土岩带,其发育于美国加利福尼亚、俄勒冈和华盛顿、阿留申群岛、堪察加半岛、日本群岛和朝鲜半岛(Koizumi and Yamamoto, 2018)。北太平洋边缘及其周围的新近纪硅藻土沉积物虽然分布广泛,但其构造地层和古环境历史相似,晚渐新世至中新世早期构造活动和火山活动作用在边缘盆地的火山岩、陆相至浅海碎屑岩和煤层,使其沉积于盆地,为硅藻的发育提供了良好的条件;中新世中晚期硅藻土在深海缺氧条件下提高了沉积速率。因此北太平洋北部以及白令海、鄂霍茨克海和日本海可作为海相沉积型硅藻土矿床的找矿远景区。

综上所述,俄罗斯的 Transuralian 地区和西西伯利亚地区也是硅藻土最有潜力的产矿区(Smirnov et al., 2017)。

7 结 论

本文对全球硅藻土分布和应用进行了比较分析,总结出了硅藻土的分布、成因类型和应用等方面的主要特点,并对其未来的研究和应用进行了展望。

(1)硅藻土在全球范围内均有分布,其中海相沉积型硅藻土矿床主要分布在太平洋、印度洋和地中海等海域,陆相沉积型硅藻土矿床则分布于各大洲的湖泊、沼泽、河道等陆地环境中。在中国,硅藻土矿床主要分布在华北、西南、华南和东北等地区,其中以吉林省的硅藻土储量最为丰富。

(2)新近纪至第四纪火山活动及升降运动影响,形成一系列的火山盆地、断陷盆地及山间盆地,为硅藻土的发育提供了良好的场所。期间间歇性的玄武质火山喷发活动或盆地外围大面积铝硅酸盐岩的化学以及物理风化作用为可溶性 SiO_2 提供了丰富的物质来源。中新世到上新世全球气候开始变暖,温暖、潮湿、阳光充足的气候环境为硅藻土带来了十分有利的气候条件,在其死亡后堆积成岩。

(3)硅藻土的应用领域主要包括水处理、建筑材料、医药、3D 打印、环保和能源等方面。其中,硅藻土在水处理领域的应用最为广泛,被广泛用于水质净化、废水处理、饮用水安全等方面。此外,硅藻土在建筑材料领域的应用也呈现出较为明显的趋势,主要用于保温隔热、防潮防霉、难燃等方面。

在未来,随着人们对环保和可持续发展的重视程度不断提高,硅藻土作为一种天然、环保、可再生的新型材料,其应用前景将更为广阔。需要指出的是,在硅藻土的应用过程中,也存在一些困难,如硅藻土的开采和利用可能会对环境产生一定的影响。

硅藻土作为一种天然无机材料,其分布和应用具有一定的地域性和差异性。通过对其分布和应用的比较分析,可以看出硅藻土在不同领域的应用前景广阔,但在应用过程中也需要加强研究和管理,以保证其安全、环保、可持续。

References

Aydar E, Çubukçu H E, Şen E, Akın L. 2012. Central Anatolian Plateau, Turkey: Incision and paleoaltimetry recorded from volcanic

rocks[J]. *Turkish Earth Science*, 22(5): 739–746.

Baartman J C, Christensen O B. 1975. Contributions to the interpretation of the Fennoscandian Border Zone[J]. *Danmarks Geologiske Undersøgelse II. Række*, 102: 1–47.

Chen Qilong, Qin Feng, Tang Yinqing, Pang Bin. 2022. Research on water erosion resistance performance of rubber–diatom composite modified asphalt mixture[J]. *New Building Materials*, 49(2): 66–69 (in Chinese with English abstract).

Cheng Shuai, Jiang Wei, Wang Lin, Huang Xiaoqiao, Han Xiaobin, Liu Zhihang, Lu Zeyu, Yu Jianying. 2022. Effect of diatomite on physical and aging properties of SBS modified asphalt[J]. *Highway*, 67(7): 353–358 (in Chinese).

Dinesen A, Michelsen O, Lieberkind K. 1977. A Survey of the Paleocene and Eocene Deposits of Jylland and Fyn[M]. Iommission hos CA Reitzels Forlag.

Ding Rui. 2014. Geological characteristics and genesis of Gaosongshu diatomite deposit in Dunhua City[J]. *China Non-Metallic Mineral Industry Guide*, (4): 41–43 (in Chinese).

Dobrosielska M, Przekop R E, Sztorch B, Brząkalski D, Zglobicka I, Łępicka M, Dobosz R, Kurzydłowski K J. 2020. Biogenic composite filaments based on polylactide and diatomaceous earth for 3D printing[J]. *Materials*, 13(20): 4632.

Du T, Song P, Liu L P. 2022. Experimental study on activated diatomite modified asphalt pavement in deep loess area[J]. *Processes*, 10(6): 1227.

Du Y C, Wang X K, Wu J S, Qi C, Li Y. 2018. Adsorption and photoreduction of Cr(VI) via diatomite modified by Nb_2O_5 nanorods[J]. *Particuology*, 40: 123–130.

Erol K, Yildiz E, Alacabey I, Karabörk M, Uzun L. 2019. Magnetic diatomite for pesticide removal from aqueous solution via hydrophobic interactions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 33631–33641.

Feng Huang, Zhang Huifen, Wang Fuya. 1995. Diatoms and their chemical constituents in diatomaceous earth of Leizhou Peninsula[J]. *Journal of Mineralogy*, (1): 29–35 (in Chinese).

Fu Y, Jiang J W, Chen Z P, Ying S M, Wang J W, Hu J S. 2019. Rapid and selective removal of Hg(II) ions and high catalytic performance of the spent adsorbent based on functionalized mesoporous silica/poly(m-aminothiophenol) nanocomposite[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 286: 110746.

Jiang Yuzhi, Jia Songyang. 2011. Exploitation application existing conditions and evolution of diatomite[J]. *Nonferrous Mining and Metallurgy*, 27(5): 31–37 (in Chinese with English abstract).

Kipsanai J J, Wambua P M, Namango S S, Amziane S A. 2022. Review on the incorporation of diatomaceous earth as a geopolymer-based concrete building resource[J]. *Materials*, 15(20): 7130.

Koizumi I, Yamamoto H. 2018. Diatom ooze and diatomite–diatomaceous sediments in and around the North Pacific Ocean[J]. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 27: 26–46.

- Li S, Li D Y, Su F, Ren Y P, Qin G W. 2014. Uniform surface modification of diatomaceous earth with amorphous manganese oxide and its adsorption characteristics for lead ions[J]. *Applied Surface Science*, 317: 724–729.
- Li Z, Zhang N, Sun Y B, Ke H Z, Cheng H S. 2017. Application of diatomite as an effective polysulfides adsorbent for lithium–sulfur batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 26(6): 1267–1275.
- Li Zhen, Zhang Haodong, Pu Jinming, Tan Geng, Zhang Mingyue. 2018. Effectiveness of cadmium–contained wastewater treated by $Mg(OH)_2$ modified diatomite[J]. *Chemical Research and Application*, 30(10): 1621–1628 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiwei, Wang Ge, Li Zhongshui, Wang Hong, Guo Xia, Zhao Qi, Nan Yao. 2021. The utilization status of diatomite mines in China and countermeasures for development and utilization[J]. *China Non–Metallic Mineral Industry Guide*, (3): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhongshui, Liu Xiaolou, Wu Yanling. 2013. New application of diatomite mine in China and resource security countermeasures[J]. *China Non–Metal Mining Industry Guide*, (5): 1–3,7 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhongshui. 2018. Geological characteristics and new exploration progress of important non–metallic mineral resources in Jilin Province[J]. *China Non–metallic Mineral Industry Guide*, (4): 31–34,60 (in Chinese).
- Liu Zhenmin. 2018. Characteristics and prospecting direction of diatomite resources in China[J]. *Geology of Chemical Mineral*, 40(4): 235–240 (in Chinese with English abstract).
- Lu Hao. 2001. Diatomite resource and its situation of development and utilization[J]. *Geology of Zhejiang*, (1): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Lü Huafang, Yang Hanbo, Wu Xinyuan, Zhu Xuezhou, Lei Huimin. 2022. Development and application of diatomite filter–soil moisture sensor[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 53(1): 207–218 (in Chinese with English abstract).
- Ma J G, Wu J F, Zhang H J, Du L, Zhang H, Zhao W B, Ma B, Chang J, Wu C t. 2022. 3D Printing of diatomite incorporated composite scaffolds for skin repair of deep burn wounds[J]. *International Journal of Bioprinting*, 8(3): 580.
- Ma Junyu. 2021. Geological features and genesis of the Hudonggou diatomite deposit in Changbai County, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 40(2): 18–23,39 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaoshun, Huang Jing, Liu Jianfeng. 2020. Geological characteristics and prospecting criteria of Erdaoyangcha diatomite deposit, Changbai County, Jilin Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (9): 249–250 (in Chinese with English abstract).
- Marín–Alzate N, Tobón J I, Bertolotti B, Cáceda M E Q, Flores E. 2021. Evaluation of the properties of diatomaceous earth in relation to their performance in the removal of heavy metals from contaminated effluents[J]. *Water Air Soil Pollut*, 232: 122.
- Naifah, Hasan M, Saidi T. 2021. The Resistance of High Strength Concrete with Diatomaceous Earth As Cement Replacement to NaCl Attack[C]//*Journal of Physics: Conference Series*(ed.). IOP Publishing, 1933(1): 012104.
- Nefzi H, Abderrabba M, Ayadi S, Labidi J. 2018. Formation of palygorskite clay from treated diatomite and its application for the removal of heavy metals from aqueous solution[J]. *Water*, 10(9): 1257.
- Pan Biaokai, Ning Siyuan, Gong Shuai, Zhang Dongting, Tian Binsheng. 2021. Geological characteristics and metallogenic regularity of diatomite deposit in Leiqiong Area[J]. *China Non–metallic Mineral Industry Guide*, (1): 39–42 (in Chinese with English abstract).
- Pasquaré G, Poli S, Venzolli L, Zanchi A. 1988. Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey[J]. *Tectonophysics*, 146(1/4): 217–230.
- Pedersen G K. 1981. Anoxic events during sedimentation of a Palaeogene diatomite in Denmark[J]. *Sedimentology*, 28(4): 487–504.
- Qu Rongying, Chen Shui'an. 2005. Geological factors of ore–controlling and metallogenic laws for diatomaceous earth ore deposit in Leizhou Peninsula[J]. *West–China Exploration Engineering*, 17(4): 91–92 (in Chinese with English abstract).
- Salih S S, Ghosh T K. 2018. Adsorption of Zn (II) ions by chitosan coated diatomaceous earth[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106: 602–610.
- Smirnov P V, Konstantinov A O, Gursky H J. 2017. Petrology and industrial application of main diatomite deposits in the Transuralian region (Russian Federation)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(20): 682.
- Taliaferro N L. 1933. Relation of volcanism to diatomaceous and associated siliceous sediments[J]. *University of California Publication Geological Science*, 23: 1–55.
- Uthappa U T, Sriram G, Brahmkhatri V, Kigga M, Jung H Y, Altalhi T, Neelgund G, Kurkuri M. 2018. Xerogel modified diatomaceous earth microparticles for controlled drug release studies[J]. *New Journal of Chemistry*, 42(14): 11964–11971.
- Wang Chunlian, Wang Jiuyi, You Chao, Yu Xiaocan, Liu Dianhe, Yan Kai, Liu Sihan, Xue Yan, Liu Yanting, Liu Xue, Yin Chuankai. 2022. A study on strategic non–metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 43(3): 267–278 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Jiang Chengxing, Ying Hanlong, Chen Congxi, Li Zhiwei. 2002. Geochemistry of diatomite in Guanyinmiao and its genetic relation to volcanism in Tengchong, Yunnan[J]. *Mineral Deposit Geology*, 21(S1): 917–920.
- Wang Jian, Chen Shaoheng, Pang Xiandi. 2022. Distribution characteristics and exploitation status of diatomite mineral resources in Jilin Province[J]. *China Non–metallic Mineral Industry Guide*, (1): 7–9,17 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jimei. 2014. Geological characteristics and genesis of diatomite

- deposit in Beigang, Changbai County[J]. China Non-Metallic Mineral Industry Guide, (5): 38–41 (in Chinese).
- Wang Lei, Ren Peng. 2013. Discussion on geological characteristics and genesis of Nangang diatomite deposit in Linjiang City, Jilin Province[J]. Western Exploration Engineering, 25(10): 122–128 (in Chinese).
- Wang Tao, Liu Yanhai, Xue Shubin. 2020. Geological characteristics and metallogenic analysis of diatomite deposits in southeast part of the Changzhi Basin[J]. Science Technology and Engineering, 20(9): 3441–3447 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Li Y F, Ren W J, Huo R X, Liu H F, Li R, Du S J, Wang L, Liu J Y. 2021. PEI-modified diatomite/chitosan composites as bone tissue engineering scaffold for sustained release of BMP-2[J]. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 32(10): 1337–1355.
- Wu Zhaoyang, Zhang Yongxing, Zhang Lizhen, Tan Xiumin. 2019. Characteristics of diatomite resources and its application in strategic emerging industries[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(6): 134–141 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Liguang, Zhao Zhuang, Yu Wanzeng. 2010. The development status and prospects of diatomite[J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 27(2): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jianjun, Zhang Chuanshun, Guan Jinan. 2011. Application and research progress of diatomite[J]. Guangxi Journal of Light Industry, (5): 23–24 (in Chinese).
- Yang Huaize, Luo Huiping, Luo Xicheng, Li Zimin, Kuang Yuanzhong. 2017. Geological features and genesis of the diatomite ore deposit in Toupai of Guangchang County, Jiangxi Province[J]. Journal of Geological, 41(4): 573–581 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qintao, Nong Jieliang, Xie Qinglin, Chen Nanchun. 2022. Research progress on the application of modified diatomite in wastewater treatment[J]. New Chemical Materials, 50(1): 298–302 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haojing, Liu Xiaojing, Zhao Mingjie, Li Yongtian. 2020. Application of magnesium hydroxide modified diatomite in phosphorous wastewater treatment[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, (9): 97–98 (in Chinese).
- Zhang Xinyu, Peng Jingdong. 2018. On adsorption of Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} ions by modified diatomite[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 43(9): 90–94 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiwei, Zheng Ligu. 2017. Diatomite deposit characteristics and prospecting direction in Changbai, Jilin[J]. Western Exploration Engineering, 29(2): 89–91 (in Chinese).
- Zheng Liduan. 2020. Late Neogene Environmental Changes and Ecological Responses Recorded by Geological Lipids in the Lake and Swamp Facies of the Zhaotong Basin, Yunnan Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–150 (in Chinese).
- Zhou F, Li Z, Lu Y Y, Shen B, Guan Y, Wang X X, Yin Y C, Zhu B S, Lu L L, Ni Y, Cui Y, Yao H B, Yu S H. 2019. Diatomite derived hierarchical hybrid anode for high performance all-solid-state lithium metal batteries[J]. Nature Communications, 10(1): 2482.
- Zhou Kaican. 1988. Geological characteristics of diatomite deposits in my country[J]. Building Materials Geology, (2): 28–33, 50 (in Chinese).
- Zhou Tingting, Wu Zhaowei. 2017. The status and development of diatomite utilization in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, (4): 87–92 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongqing. 1990. Geological features and exploitation prospect of the diatomite deposits in Leizhou peninsula[J]. Guangdong Geology, 5(2): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler W H. 1975. Outline of the geological history of the North Sea[J]. Applied Science Publishers, 1: 165–187.

附中文参考文献

- 陈其龙, 覃峰, 唐银青, 庞彬. 2022. 橡胶-硅藻土复合改性沥青混合料抗水侵蚀性能研究[J]. 新型建筑材料, 49(2): 66–69.
- 程帅, 姜蔚, 汪林, 黄小侨, 韩晓斌, 刘志航, 卢泽宇, 余剑英. 2022. 硅藻土对 SBS 改性沥青物理和老化性能的影响[J]. 公路, 67(7): 353–358.
- 丁瑞. 2014. 敦化市高松树硅藻土矿床地质特征及成因[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 41–43.
- 冯璜, 张惠芬, 王辅亚. 1995. 雷州半岛硅藻土中的硅藻及其化学成分[J]. 矿物学报, (1): 29–35.
- 姜玉芝, 贾嵩阳. 2011. 硅藻土的国内外开发应用现状及进展[J]. 有色矿冶, 27(5): 31–37.
- 李振, 张皓东, 卜鸡明, 谭耿, 张明月. 2018. 氢氧化镁改性硅藻土处理含镉废水的研究[J]. 化学研究与应用, 30(10): 1621–1628.
- 李志威, 王鸽, 李忠水, 王宏, 郭霞, 赵琪, 南瑶. 2021. 我国硅藻土矿利用现状及开发利用对策[J]. 中国非金属矿工业导刊, (3): 1–5.
- 李忠水, 刘小楼, 吴彦岭. 2013. 我国硅藻土矿新应用及资源保障对策[J]. 中国非金属矿工业导刊, (5): 1–3, 7.
- 李忠水. 2018. 吉林省重要非金属矿产资源地质特征及勘查新进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, (4): 31–34, 60.
- 刘振敏. 2018. 中国硅藻土矿资源特征及找矿方向[J]. 化工矿产地质, 40(4): 235–240.
- 陆浩. 2001. 硅藻土资源及开发利用概况[J]. 浙江地质, (1): 52–59.
- 吕华芳, 杨汉波, 伍鑫源, 朱学舟, 雷慧闽. 2022. “硅藻土-过滤器”型土壤墒情传感器研制及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 53(1): 207–218.
- 马骏雨. 2021. 吉林省长白县虎洞沟硅藻土矿床地质特征及成因浅析[J]. 吉林地质, 40(2): 18–23, 39.
- 马小顺, 黄静, 刘健峰. 2020. 吉林省长白县二道阳岔硅藻土矿床地质特征和找矿标志[J]. 世界有色金属, (5): 249–250.
- 潘标开, 宁思远, 弓帅, 张东婷, 田斌升. 2021. 雷琼地区硅藻土矿床地质特征与成矿规律[J]. 中国非金属矿工业导刊, (1): 39–42.
- 屈荣英, 陈水安. 2005. 雷州半岛硅藻土矿床控矿地质因素及成矿规律[J]. 西部探矿工程, 17(4): 91–92.
- 王春连, 王九一, 游超, 余小灿, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 薛燕, 刘延亭,

- 刘雪, 尹传凯. 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. [地球学报](#), 43(3): 267–278.
- 王登红, 蒋成兴, 应汉龙, 陈从喜, 李志伟. 2002. 云南腾冲观音庙硅藻土矿床的地球化学特征及其与火山作用的成因联系[J]. [矿床地质](#), 21(S1): 917–920.
- 王健, 程绍恒, 庞仙笛. 2022. 吉林硅藻土矿产资源分布特征及开发现状[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (1): 7–9, 17.
- 王继梅. 2014. 长白县北岗参场硅藻土矿床地质特征及成因浅析[J]. [中国非金属矿工业导刊](#), (5): 38–41.
- 王磊, 任鹏. 2013. 吉林省临江市南岗硅藻土矿床地质特征及成因探讨[J]. [西部探矿工程](#), 25(10): 122–128.
- 王涛, 刘燕海, 薛曙斌. 2020. 长治盆地东南部硅藻土矿床地质特征及成矿分析[J]. [科学技术与工程](#), 20(9): 3441–3447.
- 吴照洋, 张永兴, 张利珍, 谭秀民. 2019. 硅藻土资源特点及在战略新兴产业中的应用[J]. [矿产保护与利用](#), 39(6): 134–141.
- 肖力光, 赵壮, 余万增. 2010. 硅藻土国内外发展现状及展望[J]. [吉林建筑工程学院学报](#), 27(2): 26–30.
- 徐建军, 张传顺, 管继南. 2011. 硅藻土的应用及研究进展[J]. [广西轻工业](#), (5): 23–24.
- 杨华泽, 罗辉平, 罗喜成, 李自敏, 况沅忠. 2017. 江西广昌头陂硅藻土矿床地质特征及成因[J]. [地质学刊](#), 41(4): 573–581.
- 杨勤桃, 农接亮, 解庆林, 陈南春. 2022. 改性硅藻土在污水处理中的应用研究进展[J]. [化工新型材料](#), 50(1): 298–302.
- 张颢竞, 刘晓静, 赵明杰, 栗勇田. 2020. 氢氧化镁改性硅藻土在含磷污水处理中的应用[J]. [资源节约与环保](#), (9): 97–98.
- 张馨予, 彭敬东. 2018. “微超酸”改性硅藻土对 Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} 的吸附性能研究[J]. [西南师范大学学报 \(自然科学版\)](#), 43(9): 90–94.
- 张致伟, 郑立国. 2017. 吉林长白地区硅藻土矿床特征及找矿方向[J]. [西部探矿工程](#), 29(2): 89–91.
- 郑丽端. 2020. 云南昭通盆地湖沼相地质脂类记录的晚新近纪环境变化与生态响应[D]. 武汉: 中国地质大学, 1–150.
- 周开灿. 1988. 我国硅藻土矿地质特征[J]. [建材地质](#), (2): 28–33, 50.
- 周婷婷, 吴肇伟. 2017. 我国硅藻土加工利用现状与研究进展[J]. [矿产保护与利用](#), (4): 87–92.
- 周永清. 1990. 雷州半岛硅藻土矿床地质特征和开发前景[J]. [广东地质](#), 5(2): 22–27.