



海泡石形成机制及其在地质领域的应用进展

张杰志, 李茜, 朱光有, 高和婷, 李生, 郑凯航, 陈泓州, 刘健勇

引用本文:

张杰志, 李茜, 朱光有, 等. 海泡石形成机制及其在地质领域的应用进展[J]. 沉积学报, 2026, 44(4): 1273-1297.

ZHANG JieZhi, LI Xi, ZHU GuangYou, et al. Formation Mechanism of Sepiolite and Its Geological Application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2026, 44(4): 1273-1297.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

母岩性质对砾岩储层中自生绿泥石发育的影响及油气储层意义-以准噶尔盆地玛湖凹陷玛北地区下乌尔禾组为例

Influence of Source Rock Properties on the Development of Authigenic Chlorite in Conglomerate Reservoirs and Its Significance for Oil and Gas Reservoirs: A case study from the Lower Urhe Formation in the Mahu Depression, Junggar Basin

沉积学报. 2020, 38(2): 367-378 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.033>

玛湖凹陷夏子街地区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征及控制因素

The Characteristics and Controlling Factors of Glutenite Reservoir in the Triassic Baikouquan Formation, Xiazijie Area, Mahu Depression

沉积学报. 2019, 37(5): 945-956 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.002>

砾质辫状河型冲积扇岩相类型、成因及分布规律——以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为例

Research on Lithofacies Types, Cause Mechanisms and Distribution of a Gravel Braided-River Alluvial Fan: A case study of the modern Poplar River alluvial fan, northwestern Junggar Basin

沉积学报. 2019, 37(2): 254-267 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.139>

构造成岩作用研究现状及展望

An Overview of Structural Diagenesis

沉积学报. 2018, 36(6): 1177-1189 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.120>

伊拉克哈法亚油田白垩系Mishrif组碳酸盐岩孔隙结构及控制因素

Pore Structure Characteristics and Control Factors of Carbonate Reservoirs: The Cretaceous Mishrif Formation, Halfaya oilfield, Iraq

沉积学报. 2018, 36(5): 981-994 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.078>

引用格式:张杰志,李茜,朱光有,等. 2026. 海泡石形成机制及其在地质领域的应用进展[J]. 沉积学报, 44(4): 1273-1297.

ZHANG JieZhi, LI Xi, ZHU GuangYou, et al. 2026. Formation Mechanism of Sepiolite and Its Geological Application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1273-1297.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.017

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.017

海泡石形成机制及其在地质领域的应用进展

张杰志,李茜,朱光有,高和婷,李生,郑凯航,陈泓州,刘健勇

长江大学地球科学学院,武汉 430100

摘要 【意义】海泡石作为一种具有独特纤维状晶体结构的黏土矿物,因其高吸附性和热稳定性在地质领域展现出重要的应用潜力。【进展】海泡石的成因有直接沉积型、陆源搬运沉积型、成岩蚀变型。直接沉积型受元素浓度和酸碱度等化学条件的控制,陆源搬运沉积型与地质环境及气候条件密切相关,成岩蚀变型受埋藏深度和热液流体性质的影响。海泡石普遍形成于富镁硅、贫铝的碱性还原环境中,并在热动力演化过程中经历相变,转化为滑石或蒙脱石等矿物,从而构建出不同的沉积—成岩演化路径。在地质应用方面,海泡石凭借优异的吸附性能,可高效富集有机质,为烃源岩的形成提供物质基础,显著提高其生烃潜力和质量。海泡石层系的成岩流体有助于促进凹陷边缘高能滩灰岩转化为优质的白云岩储层,进而孕育出自生自储和下生上储的两种油气成藏模式。此外,含海泡石层系的厚度和分布不仅可以反演古地貌的起伏特征,也能够有效预测油气藏的区域,为油气勘探提供重要的依据。在古环境方面,海泡石形成过程还记录了蒸发环境、水位变化、气候演化以及缺氧事件等多种信息,可用于揭示区域重大地质事件。【结论与展望】海泡石在油气勘探、古地貌重建和古环境恢复中展现出重要的研究价值,利用海泡石获取古环境条件、提升对含海泡石层系厚度的地震资料解析能力、发展含海泡石层系油气的勘探将是未来海泡石的发展走向。

关键词 海泡石;地质特征;成因机理;沉积—成岩作用;地质应用

第一作者 张杰志,男,2000年出生,硕士研究生,地质工程专业,E-mail: geozhangjiezhi@126.com

通信作者 朱光有,男,博士,教授,E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)04-1273-25

0 引言

海泡石是一种富硅镁的纤维状黏土矿物,被称为“耐火白土”(章人骏,1947;陈秋霖等,2024)。由于其具有比表面积大、吸附性能强、热稳定性好等优异的物理化学特性,在多个工业领域得到应用(Fashina and Deng, 2022; 鲜雯等,2024)。在化工领域,海泡石可作为催化剂载体和增稠剂(彭倩等,2024);在环保方面,常用作重金属离子、染料及有机污染物的高效吸附剂(孙迪等,2024);此外,还广泛应用于建材和橡胶塑料等行业,展现出良好的应用前景与经济价值(Bakhshi Ardakani and Rajabi, 2021; 李德生和李伯华,2022;侯占峰等,2023)。

近年来,随着研究的深入,海泡石在地质领域的重要性也逐渐凸显(Djoulah *et al.*, 2023)。海泡石作

为优质储层的标志性矿物,主要赋存于火山岩、灰岩—泥质灰岩和湖相沉积岩中,常指示良好的孔隙结构或活跃的后期流体作用,可用于识别优质储层和流体运移通道(李蓉等,2021;宋金民等,2022; Cavalcante *et al.*, 2023)。其形成受成岩流体环境控制,具有明确的成岩阶段指示意义(Cai *et al.*, 2019; Kassa *et al.*, 2020; Mokatse *et al.*, 2023)。在矿物组合特征上,海泡石常与伊利石、蒙脱石等黏土矿物共生,有助于揭示储层孔隙演化历程和物性变化,为储层评价提供依据(宋金民等,2024a, 2024b; Zhou *et al.*, 2024)。同时,海泡石有利于裂缝保存和次生孔隙发育,是识别“甜点层”的关键矿物之一,在油气储层预测与开发中具有重要的应用价值(刘树根等,2022;宋金民等,2023;Eze and Molwalefhe, 2024)。

尽管海泡石在工业应用中已取得显著成果,但

收稿日期:2025-02-14;修回日期:2025-04-27;录用日期:2025-08-26;网络出版日期:2025-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(42230812)

在地质学领域的系统性研究仍显不足。目前,海泡石的形成过程及微观机制仍不清晰,且在成岩作用中的演化路径受控于多种地质因素(如流体成分、温压条件、围岩性质等),这导致其在古环境重建中的应用存在较大不确定性。特别是在油气地质领域,海泡石与油气藏的成因联系尚未完全阐明,其作为油气运移—聚集的潜在指示矿物的可靠性仍需进一步验证。本文通过梳理近几十年的研究成果,综述了海泡石的地质特征、成因机制、沉积—成岩的关系以及在地质领域的应用,旨在提高研究者对海泡石的认识,并拓宽其在地质学中的应用前景。

1 海泡石的地质特征

海泡石是一种黏土矿物,主要化学成分为水合镁硅酸盐(化学式为 $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$),具有链—层状结构(孟雪芬等, 2020; 赵书华等, 2023; 李勤椿等, 2024)(图1),由硅氧四面体层与镁氧八面体层相互连接构成(侯凯等, 2022; 任一言等, 2024)。其具有多变的物理特征,颜色常见白色、浅灰色、绿色以及浅黄色(彭倩等, 2024),产状以脉状或层状为主(图2),常与凹凸棒石共生(刘德镒, 1990; Post and Crawford, 2007; Martín-Pérez *et al.*, 2021; 郝彤等, 2023)。海泡石在沉积岩(董国军, 2001; 程朝, 2003; 郑正福等, 2023; 宋金民等, 2024a)、火成岩以及变质岩中广泛赋存(表1)(李文

光和张瑛, 1999; 李文光, 2001; Murray *et al.*, 2011; 王润婷等, 2019)。

海泡石资源主要分布于西班牙、土耳其、美国等国家(Murray *et al.*, 2011; Nakasugi *et al.*, 2021)。相比之下,中国目前已经探明的海泡石矿床数量约为60个,主要分布在江西、四川以及湖南等地区(Giustetto *et al.*, 2014; 彭璐, 2017; 张雪婷和阳海, 2022; Shang *et al.*, 2024)。海泡石矿床主要分为热液型和沉积型两大类,其中沉积型又可细分为陆相沉积型、海相沉积型和火山沉积型,分别形成于湖泊、海洋及火山活动相关的沉积环境(杨振强, 1992; Zhu *et al.*, 2020; 王维等, 2023)。

2 海泡石的成因机理

海泡石的成因主要分为沉积型和成岩蚀变型两类(表2)(Tateo *et al.*, 2000; Cai *et al.*, 2019; 宋金民等, 2022)。其中,沉积型又包括直接沉积型与陆源搬运沉积型两种。前者是指在富含镁硅的碱性溶液中,海泡石直接从溶液中沉淀析出;而后者则是海泡石源自陆地或受限海域,以碎屑或胶体形式通过水流或风力搬运至海洋环境并沉积。成岩蚀变型是指在成岩过程中,伴随埋藏深度和温度的增加,经历矿物转化而形成海泡石,进一步细分为镁蒙脱石溶蚀转化型、火山碎屑物质蚀变型、富镁碳酸盐岩蚀变型。

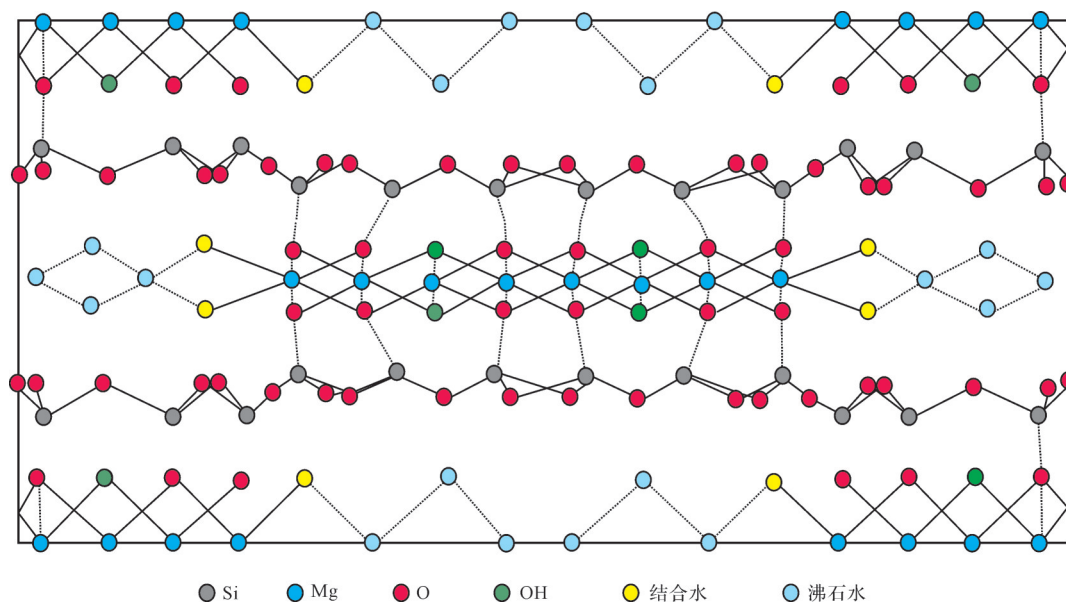


图1 海泡石晶体结构图(据赵书华等, 2023 修改)

Fig.1 Crystal structure of sepiolite (modified from Zhao *et al.*, 2023)

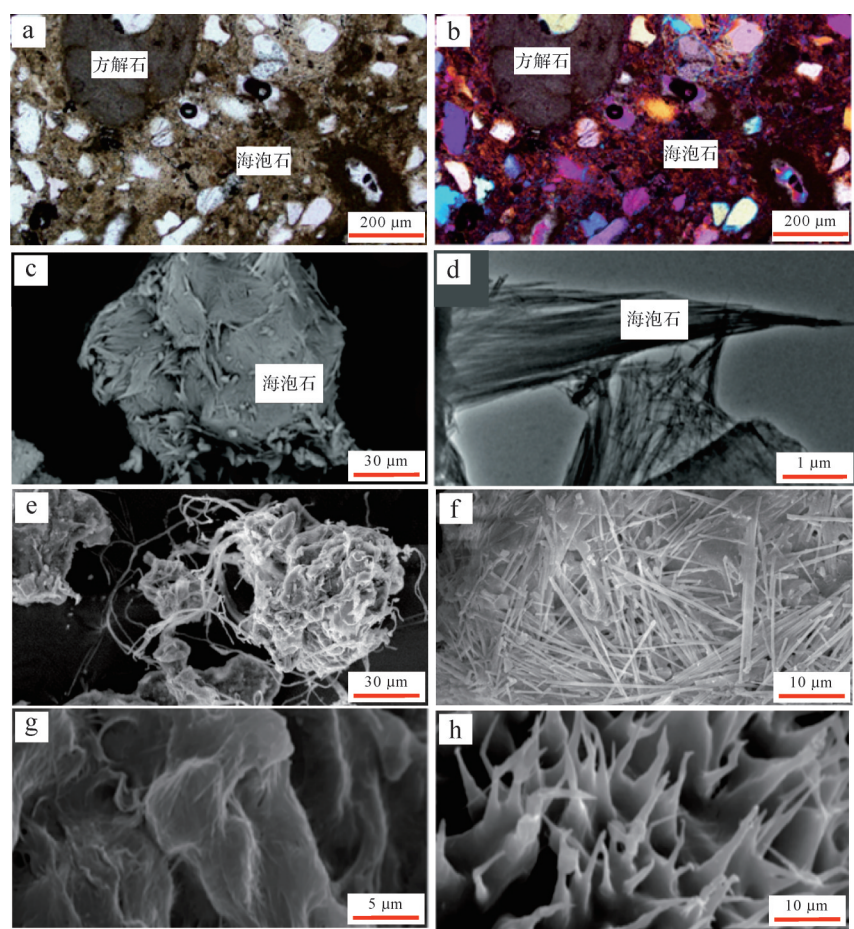


图2 海泡石镜下特征(据 Cavalcante *et al.*, 2011; Martín-Pérez *et al.*, 2021; Mokatse *et al.*, 2023 修改)

(a)在单偏光下观察的纯净海泡石;(b)在交叉偏振光照射下的海泡石;(c)透射电子显微镜图像揭示了一大片连续的海泡石纤维;(d)透射电子显微镜图像展示了石棉形海泡石的有序排列;(e)海泡石聚集体;(f)纤维状海泡石;(g)较长的海泡石纤维形成垫;(h)海泡石的厚聚集体

Fig.2 Microscopic characteristics of sepiolite
(modified from Cavalcante *et al.*, 2011; Martín-Pérez *et al.*, 2021; Mokatse *et al.*, 2023)

(a) photomicrograph of pure sepiolite in plane-polarized light (PPL); (b) photomicrograph of sepiolite in cross-polarized light (XPL); (c) transmission electron microscope (tem) images of a large continuous mass of sepiolite fibers; (d) ordered arrangement of asbestos-shaped sepiolite; (e) sepiolite aggregates; (f) fibrous sepiolite; (g) pads formed from long sepiolite fibers; (h) thick aggregates of sepiolite

表1 海泡石在不同岩石的赋存特征				
Table 1 Occurrence of sepiolite in different rocks				
岩石类型	亚类	共生矿物	产出形态	文献来源
沉积岩	灰岩	石英、方解石、滑石、蒙脱石、高岭石和伊利石等	层状、透镜状、脉状、团块状、透镜状等	董国军, 2001; 程朝, 2003; 宋金民等, 2024a
	页岩	凹凸棒石、方解石、滑石、蒙脱石、石英、白云石、绿泥石等	鳞片状、透镜状等	王润婷等, 2019; 郑正福等, 2023
	泥岩	石英、方解石、绿泥石、伊利石、蒙脱石等	层状、局部纤维状等	程朝, 2003
火山碎屑岩		方解石、绿泥石、菱镁矿等	层状、透镜状、似层状等	李文光和张瑛, 1999; Murray <i>et al.</i> , 2011
火成岩	火山凝灰岩	蒙脱石、石英、长石、凹凸棒石等	脉状、层状等	李文光, 2001
变质岩	花岗岩	方解石、绿泥石、菱镁矿等	脉状、层状等	李文光和张瑛, 1999
	蛇纹岩	滑石、方解石、石英、菱镁矿等	脉状、层状等	李文光和张瑛, 1999; 王润婷等, 2019
	大理岩	绿泥石、方解石、滑石等	脉状、透镜状等	李文光, 2001; 王润婷等, 2019

表2 海泡石成因类型及影响因素
Table 2 Genetic types and influencing factors for sepiolite

海泡石成因类型	亚类	成因机理	影响因素
沉积型	直接沉积型	由富含 Mg^{2+} 和 $Si(OH)_4$ 的溶液在特定物理化学条件下 (如高 pH、低 Al^{3+} 活度、适度盐度等) 直接发生化学沉淀形成	镁元素供应、碱性环境条件、地质构造等
	陆源搬运沉积型	起源于陆地或受限海域, 经历“风化—搬运—沉积”三个阶段的地质过程形成	沉积环境、水流、微生物等
	铁蒙脱石溶蚀转化型	铁蒙脱石在溶蚀作用下发生转化	流体成分、温压条件等
成岩蚀变型	火山碎屑物质蚀变型	火山碎屑物质受热液作用发生蚀变	火山物质成分、热液活动等
	富镁碳酸盐岩蚀变型	富镁碳酸盐岩 (如白云岩、菱镁矿等) 作为海泡石形成物质基础的类型, 其转化过程本质上是热液驱动的镁—硅耦合反应过程	母岩的岩性、硅源供给等

2.1 沉积型

2.1.1 直接沉积型

直接沉积类海泡石形成于干旱—半干旱气候条件下, 主要受制于 pH 值 (8.0~9.5) 和盐度等多重因素的影响, 在富含二氧化硅和镁的贫铝溶液中通过化学沉淀形成 (Tosca *et al.*, 2011)。其中, 铝活性对海泡石形成存在抑制作用。当溶液中铝活性增加时, 铝离子不仅会与海泡石形成过程中所需的镁、硅离子竞争反应位点, 还会改变溶液中的 Mg^{2+}/Si^{4+} 比值, 进而阻碍海泡石的结晶过程, 导致海泡石的形成率显著降低 (Birsoy, 2002)。不同地质环境下海泡石的沉积特征表明, 硅含量与 pH 值存在耦合控制关系。在硅含量丰富的溶液中, 海泡石的直接沉淀作用增强, 这主要得益于充足的硅源为矿物结晶提供了必要的结构单元。而在硅含量较低时, 则需要更高的 pH 环境 (pH 约 9) 以维持矿物结晶的动力学需求 (Galán and Pozo, 2011)。此外, 海泡石的形成受热化学条件和动力学的共同控制, 其中盐度的变化是驱动海泡石溶解—沉淀转化机制的关键因素 (Pozo and Calvo, 2018)。盐度通过双重机制影响海泡石结晶: 一方面, 盐度升高会适度提升 Mg^{2+} 和 $Si(OH)_4$ 的离子活度, 这种改变能够有效促进海泡石的结晶过程。但盐度超过 0.5M 时会破坏 $[Si_6O_{15}]^{2-}$ 结构, 导致非晶态产物; 另一方面, 盐度改变会影响渗透压, 适度增大 ($\Delta\pi < 3$ atm) 有利于沉淀, 过高 ($\Delta\pi > 5$ atm) 则引发溶解 (Eberl *et al.*, 1982; Cavalcante *et al.*, 2011)。

除考虑单因素对直接沉积类海泡石影响外, 区域实例研究进一步佐证了多因素协同作用对其形成控制机制。例如, 尤卡坦半岛及其周边地区的地质风化作用提供了丰富的镁硅来源, 这些溶解物质在浅海边缘的高碱 (pH 为 8~9)、低铝环境中直接沉淀出海泡石 (Schultz *et al.*, 1971; Rateev *et al.*, 2008)。

新近纪深层风化进一步强化, 形成了稳定的高硅、低铝化学环境 (Bristow *et al.*, 2012)。这一过程是通过原位风化溶解作用形成结晶度较高的自生海泡石, 区别于陆源搬运模型中的物理迁移作用机制。且红土风化过程中, $MgO:Al_2O_3$ 比率向海洋方向递增且缺乏碎屑成分, 更加证实该地区的坡缕石—海泡石组合并非陆源搬运产物, 而是由溶解组分直接结晶形成 (Clauer *et al.*, 2012)。类似地, 维卡尔瓦罗矿床的海泡石直接沉淀于 $Mg/Si \approx 0.7$ 、pH 为 8.5 的封闭湖盆 (Pozo and Casas, 1999), 而安纳托利亚盆地海泡石的形成模式通常被认为与古碱性湖泊边缘的周期性洪水—湿地环境密切相关, 这种水文动态促进了海泡石直接沉淀 (Pozo and Calvo, 2018)。

2.1.2 陆源搬运沉积型

陆源搬运型海泡石的形成过程可简要归纳为“风化—搬运—沉积”三阶段模型: 在起始的风化阶段, 镁质母岩, 如蛇纹岩、橄榄岩等超基性岩以及白云岩等富镁碳酸盐岩, 通过季节性降雨淋滤等作用促使镁硅组分逐步析出, 同时微生物分泌的有机酸加速矿物溶解, 共同形成富含 Mg^{2+} 和 $Si(OH)_4$ 的风化流体。随后, 这些溶解组分经地表径流系统搬运至深海环境并沉积 (Madhavaraju *et al.*, 2002)。深海区域因其独特的物理化学特征, 为海泡石的沉淀提供了理想条件。在物理环境方面, 深海区域水动力条件稳定, 极低的水流速度 (通常小于 5 cm/s) 营造出近乎静态的沉积环境, 有利于海泡石晶体的持续生长和聚集。在化学环境方面, 深海稳定的弱碱性环境 (pH=7.8~8.3) 不仅维持了 Mg^{2+} 和硅酸根离子的化学活性, 还有效抑制了竞争性离子的干扰。同时, 较高的恒定盐度通过增强离子活度促进了结晶过程 (Galán and Pozo, 2011; Draidia *et al.*, 2016)。

此类海泡石的物源多来自邻近碳酸盐台地边缘

的潟湖环境,而伴生黏土矿物的发育特征则揭示了其被搬运至深海环境的历史。通过整合意大利南部亚平宁山脉、印度东南部和波斯湾等多个典型地区的地质地球化学数据,建立了海泡石与古气候—沉积环境的耦合关系。在意大利南部亚平宁山脉的黏土层中,海泡石与高岭石含量的负相关性以及与磷酸盐含量的正相关性,暗示了磷酸盐和海泡石的来源与温暖干旱气候下的蒸发作用增强有关,这与始新世早期全球变暖事件的特征相吻合(Cavalcante *et al.*, 2011)。同时,扫描电镜图像中未断裂的长纤维形态表明这些矿物在结晶后并未经过长时间的搬运(Bolle *et al.*, 2000)。因此,可以推断在古新世—始新世期间,海泡石主要形成于潟湖环境,并作为碎屑物质被输送到拉戈内格罗盆地的深海环境。类似地,前人在波斯湾东北部的鲁德—希拉河海底冲积扇区域,记录了河流携带的砂质黏土,揭示了这些黏土矿物的陆地起源(Keller, 2001; Madhavaraju *et al.*, 2002)。并且,该区域多种沉积类型中均观察到海泡石的存在,这不仅支持了海泡石的陆源特性,还暗示了河流输入在其中起着决定性作用。

2.2 成岩蚀变型

成岩蚀变型海泡石可依据其原始物质来源划分为三种类型,包括镁蒙脱石溶蚀转化型、火山碎屑物质蚀变型以及富镁碳酸盐岩蚀变型。

首先,镁蒙脱石溶蚀转化型的关键证据来自海泡石/蒙脱石混合层的发现,其形成机制证实了层状硅酸镁向链状结构转变的重要过渡阶段(Cai *et al.*, 2019)。通过整合土耳其西夫里希萨尔地区海泡石的显微数据,发现呈现皱纹状或者蜂窝状纹理的蒙脱石被保留与继承,表明海泡石是在蒙脱石基础上形成的。这些新生物物质被证明完全是由海泡石组成,进一步佐证了其外生物物质的形成机制(Yeniyol, 2014; Tutolo and Tosca, 2018)。类似地,在镁含量丰富的环境中,海泡石可通过胶体二氧化硅转化。在此过程中,水合硅酸镁前体作为矿物形成的载体,在干燥过程中发生相变,这一发现为理解海泡石的成岩演化提供了新的视角(Galán and Pozo, 2011)。

其次,火山碎屑物质受热液作用发生蚀变。以加那利群岛火山灰蚀变带为例,该过程发生在60℃~120℃的中低温热液环境中。热液携带丰富的化学物质在渗透到火山灰层时,与火山碎屑物质发生复杂反应,释放出 Mg^{2+} 和 $Si(OH)_4$ 等成矿组分。这些组

分随后在火山灰颗粒间隙和原生裂纹中沉淀结晶,形成典型纤维状海泡石。而凹凸棒石和蒙脱石则主要源自火山灰内部的原位蚀变(图3),这一空间分异清晰地揭示了海泡石直接沉淀与蚀变成因黏土矿物的差异(Cuadros *et al.*, 2016)。

最后,富镁碳酸盐岩蚀变型是指以富镁碳酸盐岩(如白云岩、菱镁矿等)为物质基础,其转化本质上是热液驱动镁—硅耦合反应的过程。富含 SiO_2 和 Mg^{2+} 等活性组分的热液沿碳酸盐岩的孔隙、裂隙等渗透通道运移,促使原始矿物(如白云石)在酸性或富 CO_2 环境下发生溶解,导致 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 从矿物晶格中释放($CaMg(CO_3)_2 + 4H^+ \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2H_2O + 2CO_2$),同时造成岩石结构的解构,为海泡石的形成提供了必要的空间条件。随后,热液中的 SiO_2 组分(可能来源于围岩硅化或深部热液)与溶出的 Mg^{2+} 在微尺度环境中发生反应形成海泡石的初始晶核($2Mg^{2+} + 3SiO_2 + 4H_2O \rightarrow Mg_2Si_3O_6(OH)_4 \cdot nH_2O$),在持续的热液作用下逐渐发育为典型的纤维状或片状海泡石晶体(Yalçın and Bozkaya, 2004; Draidia *et al.*, 2016)。

值得注意的是,上述三种类型虽然在物质来源和具体过程上存在差异,但其形成共同受到早期成岩环境的关键控制。这一观点在多个地区的地质研究中得到了证实。例如,在四川盆地的上寺剖面中,通过对微观特征(如海泡石交代方解石等)进行研究,揭示了茅口组中泥质组分海泡石是成岩作用早期阶段的产物(苏成鹏等, 2021)。类似地,美国东南部的巨型中新世海泡石以及北卡罗来纳大陆边缘陆架上的海泡石,均被认为是在早期成岩过程中形成的(Allison and Riggs, 1994)。这些发现的可靠性主要体现在以下两个方面:其一,海泡石与坡缕石和白云石是同生产物,均形成于早期成岩阶段;其二,海泡石中的二氧化硅成分主要来自硅藻和海绵的针状物,这些生物硅质需经历早期成岩改造后转化为纤维状海泡石(Li *et al.*, 2015)。

综合上述分析,成岩蚀变型海泡石与沉积型海泡石在形成环境、控制因素及矿物学特征方面存在显著差异。前者形成于沉积物固结后的埋藏阶段,主要是通过蒙脱石等前驱矿物在特定的温压条件下蚀变形成,表现出较高的铝含量和明显的溶蚀结构,其形成受控于埋藏环境的温度、压力等成岩条件。而后者形成于表生环境,由富 Mg^{2+} - $Si(OH)_4$ 流体在沉积期或沉积物固结前发生化学沉淀形成,其形成严

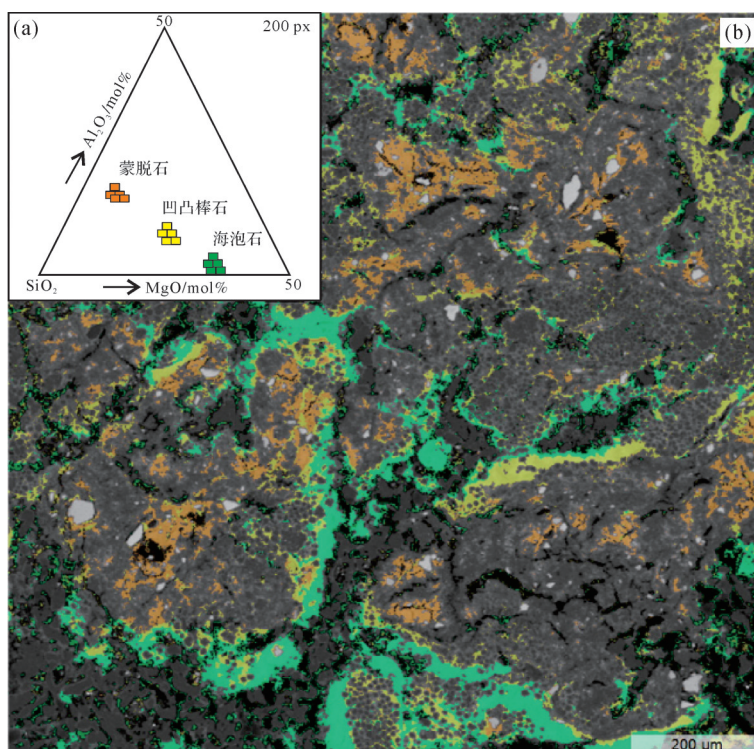


图3 来自 EPMA 的黏土矿物组合 (据 Cuadros *et al.*, 2016 修改)

(a)电子探针显微分析对黏土矿物进行的定量单点分析结果已在 SiO_2 - Al_2O_3 - MgO 的图表上展示;(b)图表中代表了海泡石(以绿色表示)、凹凸棒石(以黄色表示)和蒙脱石(以橙色表示)的EPMA单点分析数据;其中,蒙脱石(橙色)主要分布在蚀变火山灰颗粒的核心区域,海泡石(绿色)则主要分布在颗粒间的空隙中,而凹凸棒石(黄色)多位于颗粒的边缘附近

Fig.3 Single-point electron probe microanalysis (EPMA) data for clay mineral assemblage (modified from Cuadros *et al.*, 2016)

(a) clay minerals plotted on SiO_2 - Al_2O_3 - MgO chart; (b) sepiolite (green), attapulgite (yellow) and montmorillonite (orange); montmorillonite is mainly seen in the core area of altered volcanic ash particles, sepiolite is mainly in interparticle spaces, and attapulgite is mostly located near the edge of particles

格受控于沉积环境的物理化学条件(低 Al^{3+} 活度、高pH值及适度盐度)。

3 海泡石与沉积—成岩的关系

3.1 海泡石的形成环境

3.1.1 沉积时代

海泡石出现的地质时代跨越了古生代到新生代的多个时期(表3),其形成过程与地质构造活动、火山喷发以及海洋化学环境的变化密切相关。具有商业开采价值的矿床主要形成于二叠纪、新近纪。例如,西班牙巴列卡斯海泡石矿床和美国等地的矿床,以及中国江苏盱眙海泡石矿床,其成矿时代均属于新近纪。而中国大多数的矿床属于二叠纪,如江西乐平、湖南永和海泡石矿床等(魏均启等,2014)。这些分布于不同时代与地区的海泡石矿床,为深入研究海泡石的形成规律、地质背景以及后续的商业开发利用提供了丰富且宝贵的样本资源。

3.1.2 沉积环境

海泡石主要形成于偏碱性的半封闭浅海还原环境中,这类环境普遍呈现出富镁硅、贫铝的特征(图4)(Galan *et al.*, 1985)。其沉积过程是一个复杂的多因素耦合过程,受到气候条件、pH值、硅质来源以及水文条件等多重环境因素的综合控制(图5)(Arizaleta *et al.*, 2020)。

首先,气候条件对海泡石的形成具有重要影响。海泡石的形成往往与相对干旱的气候条件密切相关,无论是在蒸发环境还是开阔海洋环境中均有产出。在蒸发环境中,干旱气候引起强烈蒸发作用,显著提升镁离子浓度,并形成中等盐度和碱性(pH为8.0~9.5)的化学环境,这些条件共同促进了海泡石的沉淀。而在开阔海洋环境中,热液活动与陆源风化作用为海泡石形成提供了充足的镁、硅等成矿元素。同时,海水适度的盐度(约35‰)可增强镁离子与硅酸根离子间的静电相互作用,从而提高海泡石的结晶效率。此外,海洋生物活动通过改变局部微环境

表3 国内外海泡石矿床分布及其特征

Table 3 Mineral deposit distribution and characteristics of sepiolite in China and elsewhere

类型	亚类	矿床实例	成矿时代	地质特征
热液型海泡石矿床	无	安徽省全椒热液型海泡石矿床	燕山期	纤维状海泡石富集于断裂带,伴生滑石和石英
		俄罗斯乌拉尔海泡石矿床	二叠纪	与蛇纹岩相关,质地较硬,工业价值高
沉积型海泡石矿床	陆相沉积型	西班牙巴列卡斯海泡石矿床	新近纪	与冲积沉积有关,呈透镜状产出,纯度较高
		西班牙马德里盆地的海泡石矿床	中新世	分布在不同沉积环境(冲积扇、沼泽、泥滩),与多种矿物共生
		江西乐平牯牛岭海泡石矿床	早二叠世	以纤维状、土状为主,常与滑石、石英、蒙脱石等矿物共生
		湖南浏阳永和和海泡石矿床	早二叠世	地层产状平缓,呈近水平状展布,常与凹凸棒石、蒙脱石等共生
	海相沉积型	美国加利福尼亚州蒙特雷海泡石矿床	中新世	赋存于中新世硅藻土中,呈层状分布,伴生蛋白石和方解石
		土耳其埃斯基谢希尔海泡石矿床	渐新世到上新世	海泡石纯度高,全球重要优质产区
		美国佐治亚海泡石矿床	上新世到第四纪	矿体呈透镜状,海泡石与蒙脱石、滑石共生
	火山—沉积型	希腊基克拉泽斯群岛海泡石矿床	中新世到上新世	海泡石呈致密块状或纤维状,常伴生沸石
		江苏盱眙—安徽嘉山海泡石矿床	新近纪	以层状、透镜状形态产出,其主要物质来源于玄武岩的风化

的化学性质(如pH值和离子浓度),也为海泡石的成核与生长创造了有利条件(郑正福等, 2023; 陈思钰等, 2025)。

其次,碱性环境在海泡石形成过程中发挥着双重作用:一方面,通过加速矿物的化学分解过程,持续供给海泡石形成所需的镁硅质来源;另一方面,碱性条件还促进了海泡石八面体化学框架的有序构建,同时维持了二氧化硅的饱和状态(樊金虎等, 2024)。这一复杂的化学过程深刻揭示了海泡石微观晶体结构与宏观沉积环境之间的内在联系。

再者,盐度作为另一个关键的环境因素,对海泡石的沉积起到了调节作用。适当的盐度能够提升 Mg^{2+} 和 $Si(OH)_4$ 的离子活度,有效促进海泡石的结晶过程(Tosca and Masterson, 2014)。实验表明,在高盐度($NaCl=0.46\text{ mol/kg}$)、 $Mg/Si=6$ 且温度为 $25\text{ }^{\circ}C$ 的特殊条件下,pH值成为控制海泡石沉淀的决定性因素。当pH值为8.7时,主要沉淀产物为蒙脱石。随着pH值升高至9.0和9.4时,沉淀产物则转变为斯皂石。相比之下,在低盐度环境中($NaCl=0.01\text{ mol/kg}$),当pH值达到约8.8时即可触发海泡石的沉淀过程(颜佳新, 2004; Pozo *et al.*, 2016)。这种复杂的化学平衡关系反映了海泡石形成过程中多因素耦合作用的本质特征。

此外,显生宙以来,海泡石的分布呈现出与硅质沉积紧密相关的特征。其富集区域往往伴随着硅分泌生物的繁荣活动,这进一步凸显了生物地球化学过程在海泡石形成中的重要作用(García-Romero *et al.*, 2007; 郑凯航等, 2025)。值得注意的是,海泡石的产出高峰时期与燧石沉积事件的时间框架相吻合,特别是在古新世晚期至始新世早期,海泡石的形

成达到了高峰(Beauchamp and Baud, 2002),这一时间上的关联性为研究地质历史时期的沉积事件提供了重要的参考标志。

最后,水文条件亦是影响海泡石形成的重要因素。在富含海泡石层系中,常伴生腕足类、珊瑚类等物质,但在永和海泡石矿床等地区会出现生物暴亡现象。这是风暴事件引发的急剧缺氧环境,导致生物大规模死亡。随后,在深水洋流的搬运与沉积作用下,富含镁、硅的矿质颗粒不断积聚,最终促成了海泡石的沉淀(郑正福等, 2023)。如扬子地台东南边缘的部分海泡石矿床就是由于热泉造成缺氧环境形成的(杨振强, 1992)。类似地,马德里盆地发育良好的中新世海泡石矿床,其形成与湖泊环境密切相关。前人分析了从草地环境到受水控制的泥潭环境的转变,特别关注了植被密集的沼泽和湖泊区域(从永久性沼泽环境到季节性湿润地),证明地下水和湖泊水是影响海泡石等矿物形成的关键因素(Herranz and Pozo, 2018)。随着时间的推移,水文作用的影响也持续增强,不仅改变了海泡石的化学组成,还引发了直接沉淀和重结晶等一系列地质过程(Reijmer *et al.*, 2022; 黄月等, 2025)。马德里盆地生长的海泡石等矿物大部分都位于湖泊序列,这种赋存特征与湖相沉积物中富含的蒸发岩与黏土矿物密切相关。海泡石最初的形成与水体、镁硅离子等因素有关。随着水体的持续汇入, $Si(OH)_4$ 的浓度逐渐上升,尤其在缺镁的环境下会发生海泡石的硅化过程(Cañaveras *et al.*, 2020; 贾凡琛等, 2025)。因此,地下水的补给强化了海泡石的直接沉淀过程,而在沼泽环境下则会发生重结晶现象,形成不同结晶程度的海泡石(图6)。

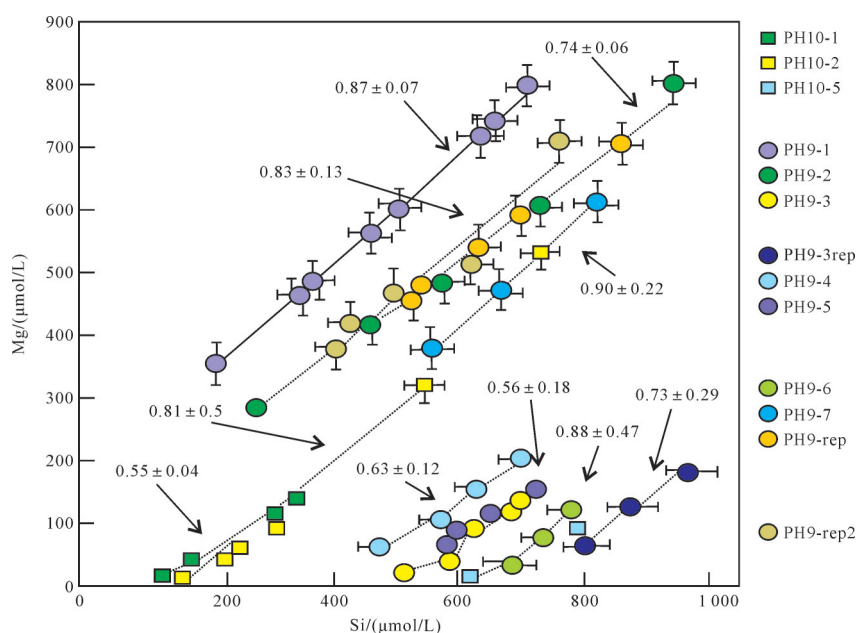


图4 海泡石沉淀中测量的镁硅浓度(据 Arizaleta *et al.*, 2020 修改)

Fig.4 Mg-Si concentration in sepiolite precipitation (modified from Arizaleta *et al.*, 2020)

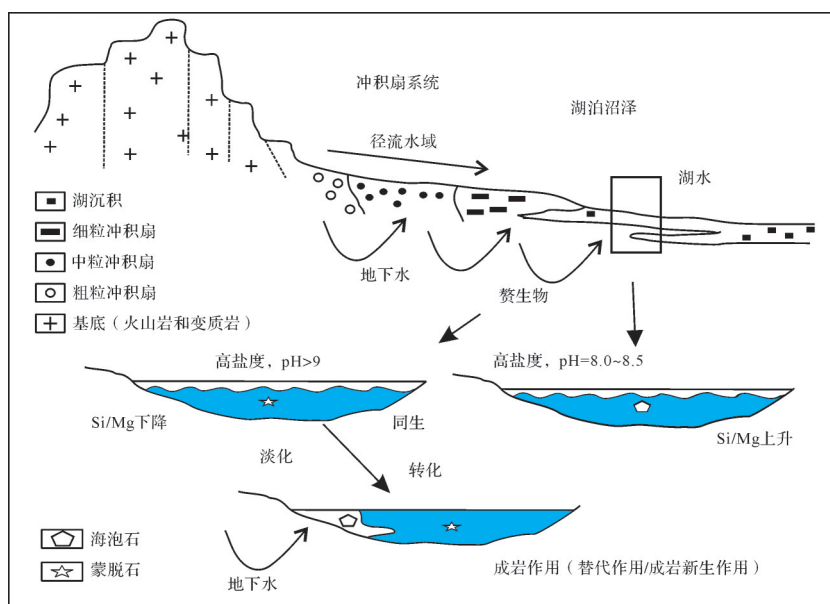


图5 多种因素控制海泡石的形成(据 Galan *et al.*, 1985 修改)

盐度、pH值和Si/Mg比值对海泡石、硅镁石的同生形成起重要作用

Fig.5 Many factors control the formation of sepiolite (modified from Galan *et al.*, 1985)

salinity, pH and Si/Mg ratio play important roles in the syngensis of sepiolite and magnesite

海泡石的实验合成研究也为深入探讨其形成环境提供了强有力的理论支持,并取得了突破性的成果。这些实验不仅模拟了复杂的自然条件,还揭示了海泡石形成的关键控制因素,为理解其地质成因提供了新的视角。例如,通过在地球表面条件下模拟海水蒸发过程,发现海泡石可以在pH值介于8.2~

8.5的溶液中形成,且该过程受到离子浓度和二氧化硅活性的影响。在中等碱性条件下(pH值介于8.2~8.5),海泡石可在相对较低的二氧化硅浓度下形成。而在酸性环境中,即使提高二氧化硅浓度也难以合成纯相海泡石(Birsoy, 2002; Galán and Pozo, 2011; Tosca *et al.*, 2011)。这一结论得到了多位学者的佐

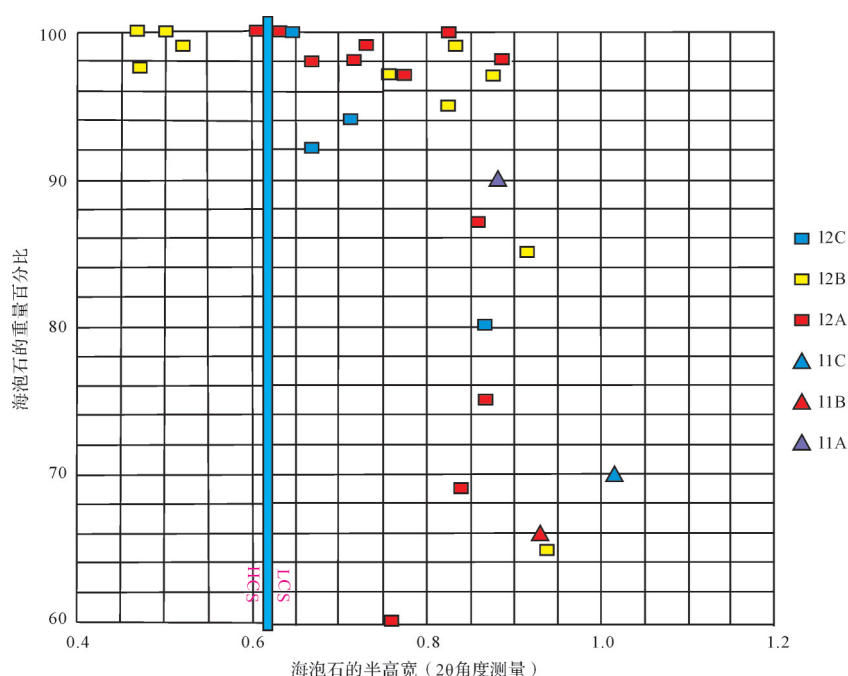


图6 海泡石含量与“结晶度”(FWHM)分布的双变量图(据 Herranz and Pozo, 2018 修改)

I2C. 层状泥质岩; I2B. 角化/球化块状泥质岩; I2A. 层状泥质岩和泥岩; I1C. 黏土内碎屑砂岩; I1B. 泥岩; I1A. 黏土; 蓝线将低结晶度海泡石(LCS)与高结晶度海泡石(HCS)分开

Fig.6 Bivariate plot of sepiolite content and crystallinity (full width at half maximum, FWHM) distribution (modified from Herranz and Pozo, 2018)

I2C. layered argillaceous rock; I2B. keratinized/spheroidized massive argillite; I2A. layered argillite and mudstone; I1C. clastic sandstone within clay; I1B. mudstone; I1A. clay; The blue column indicates separation between low-crystallinity sepiolite (LCS) and high-crystallinity sepiolite (HCS)

证,前人通过向 MgCl_2 —无定形二氧化硅体系中添加 NaOH 的方法,在室温条件下成功合成海泡石(Millero, 1974; Deocampo, 2015; Herranz and Pozo, 2018)。这些实验共同揭示了pH值对海泡石形成动力学的调控机制,即较高pH值提升了溶液中氢氧根离子的浓度,从而加快了海泡石的沉淀速率并促进其晶体结构的有序构建。

3.2 海泡石的相变

在成岩和埋藏演化中,海泡石经历矿物相变,演化生成滑石和蒙脱石等矿物。具体来说,在富镁地质环境中,海泡石偏向转化为滑石或蛇纹石。而在富铝环境中,则更倾向转变为蒙脱石或绿泥石。这一矿物转化过程不仅受控于地球化学环境中的元素丰度,也受到溶液酸碱度的影响。海泡石的稳定性对溶液的酸碱度极为敏感:当溶液呈酸性(pH值<7),海泡石可能发生溶解或转化为滑石、绿泥石等矿物。相反,在碱性条件(pH值介于8~9)中,海泡石则更倾向于保持原始结构或直接从溶液中沉淀(Uddin, 2008)。

3.2.1 海泡石转化为滑石

滑石是三八面体层状硅酸盐矿物,其化学式为 $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$,通常形成于成岩过程中。海泡石在镜下呈现星点状、羽毛状、透镜状以及片状等多种形态(王帅等, 2023)(图7)。

与普通滑石相比,相变产生的滑石展现出一些独特性质(李蓉等, 2021)。首先,相变过程产生的滑石,其晶体尺寸受限于原始海泡石的硅质分离与脱水作用,呈现出典型的黏土级细小颗粒特征(Kring, 2007; Tosca *et al.*, 2011)。其次,在热分析曲线上,相变滑石与普通滑石表现出差异。普通滑石的热分析曲线通常呈现单一对称的吸热谷,而相变滑石则显示出两个明显的吸热谷,这不仅反映了滑石中(OH)键能的异质性,也表明相变过程中海泡石的八面体(OH)键尚未完全消失(Rahman *et al.*, 2015; 胡陈等, 2024)。此外,相变滑石还具有特殊的低温吸热谷(大约在150℃),这是常规滑石所不具备的(陈芸蓉等, 1985)。最后,由海泡石相变形成的滑石比普通滑石含有微量的水分,并且在红外光谱中显示出方英石的特殊吸收带(图8)(章淑华, 1985; 杨振强和许

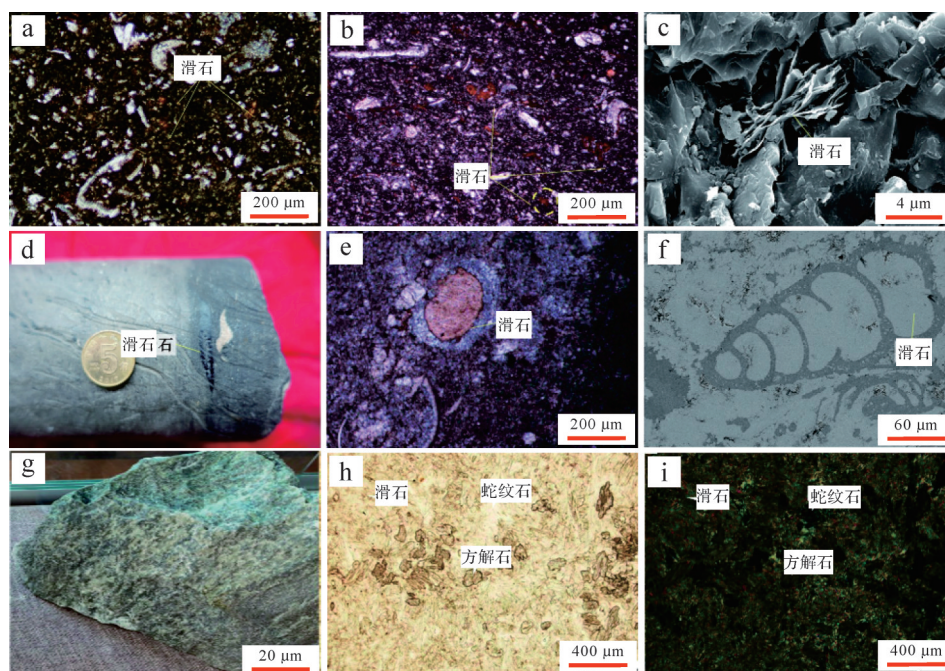


图7 滑石赋存状态(据王帅等, 2023; 宋金民等, 2024a 修改)

(a, b)星点状滑石; (c)在方解石颗粒之间, 形成了羽毛状的滑石结构; (d)滑石呈现透镜状形态; (e)滑石以片状集合体形式存在, 其边缘可见溶蚀裂缝; (f)透镜状滑石内部含有众多孔隙; (g)含绢云母的绿泥片岩; (h)在单偏光显微镜下观察到的矿石的光学特性; (i)在正交偏光显微镜下观察到的矿石的光学特性

Fig.7 Photographs and photomicrographs of talc occurrence (modified from Wang *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2024a)

(a, b) stellar talc; (c) feathery talc structure formed between calcite grains; (d) lenticular talc; (e) talc in the form of a lamellar aggregate with corrosion cracks visible along its edges; (f) lenticular talc containing numerous pores; (g) metamorphic rock with sericite and chlorite components; (h) ore observed by single polarizing microscope; (i) ore observed by orthogonal polarization microscope

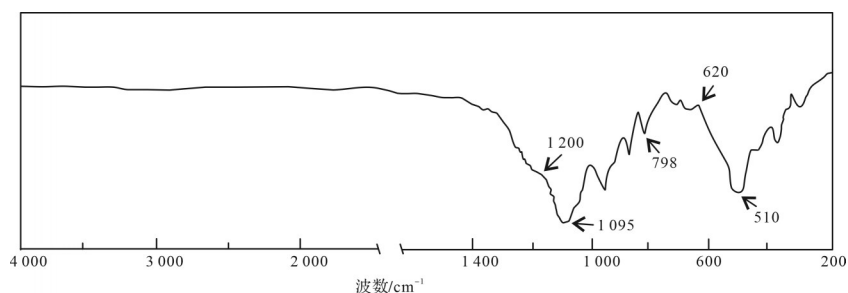


图8 海泡石在1200 °C下的红外光谱(据章淑华, 1985 修改)

方石英的红外光谱特征吸收带主要包括1200 cm⁻¹、1095 cm⁻¹、798 cm⁻¹、620 cm⁻¹、510 cm⁻¹等峰值

Fig.8 Infrared spectrum of sepiolite at 1200 °C (modified from Zhang *et al.*, 1985)

characteristic absorption bands of cristobalite mainly include peaks shown by arrows at 1200 cm⁻¹, 1095 cm⁻¹, 798 cm⁻¹, 620 cm⁻¹ and 510 cm⁻¹

俊文, 1987)。这些发现为识别滑石的成因类型提供了重要的矿物学标志。

海泡石向滑石的相变通常发生在中低温条件下(100 °C~300 °C), 并伴随着晶体结构的重组, 可通过固态直接转化或者溶解重结晶两种机制实现。其中, 固态直接转化是一个相对缓慢的反应过程, 通过晶体调整和逐步脱水完成, 无需经历完全溶解阶段。当温度处于90 °C~130 °C且铝活度($\log[a_{\text{Al}^{3+}}/(a_{\text{H}^+})^3] < 6.5$)较低时, 海泡石结构中的沸石水逐渐排出, 引发

层链塌陷, 开始发生向滑石的不完全转变(张宇等, 2022)。当埋藏加深和温度升高, 结构破坏程度不断加剧, 导致链笼中的键性水析出。此时硅氧四面体链和镁氧八面体重新排列, Mg^{2+} 和 Si^{4+} 发生晶格迁移, 在矿物表面或裂隙处形成滑石晶核并外延生长(Birsoy, 2002)。随着层链塌陷的持续扩展, 滑石区域逐渐扩大, 最终实现完整转变(王吉中等, 2004)。该过程可简化为如下化学反应式: $3\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \rightarrow 8\text{Mg}_3\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2 + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (陈芸菁等,

1985;任磊夫,1988;李旭平和朱钟秀,1993;Chahi *et al.*,1997;刘瑾等,2019)。相比之下,溶解重结晶过程则需要流体参与,相变速率较快。在富硅镁的流体作用下,海泡石发生溶解并释放游离的 Mg^{2+} 和 Si^{4+} 。这些溶解组分在热液或孔隙流体中迁移并在硅镁活度达到过饱和的有利位置重新沉淀,通过界面反应结晶出具有典型三八面体层状结构的滑石晶体(Pozo and Calvo,2018)。

海泡石转化为滑石的过程可通过X射线衍射图谱中的特征峰变化加以确认(图9),其提供了揭示二者成岩关系的直接晶体学证据(宋金民等,2024a)。这些变化不仅证实了滑石作为海泡石成岩转化产物的地位,而且通过分析衍射峰形态的演变,使得我们深入理解海泡石在成岩作用下的微观结构转变。例如,在四川盆地西北部的上寺剖面以及川西南等地的二叠系茅口组中,通过扫描电子显微镜技术观察到丰富的纤维状海泡石单体及其向滑石转化的过渡形态—羽片状海泡石—滑石(任海侠等,2021;苏成鹏等,2021),这一中间产物为滑石形成机制提供了直接证据。同时,X射线衍射分析也清晰地揭示了海泡石向滑石转化的连续过程,进一步证实了滑石由海泡石转化而来。类似地,在中二叠纪期间,华南地区的海泡石经历了成岩转变,分别形成了镁蒙脱石和滑石(李蓉等,2021)。该相变过程明显受到古地温条件的制约:海泡石在地质温度140℃时会经历向滑石的转化,而在155℃时,海泡石可以完全转变为滑石(Cai *et al.*,2019),揭示了古地热条件对海泡石成岩转变的深远影响。

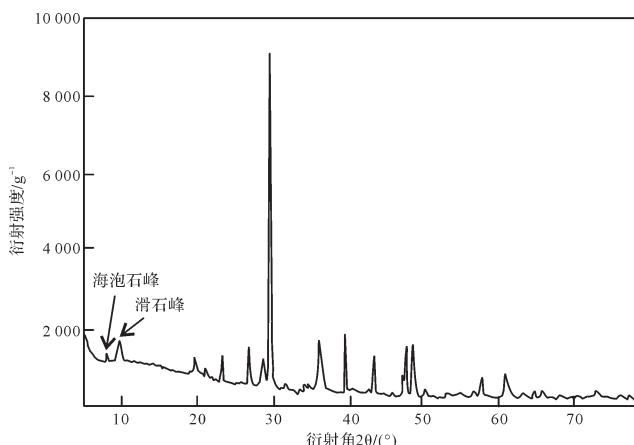


图9 海泡石向滑石转化的XRD图谱特征
(据宋金民等,2024a修改)

Fig.9 X-ray diffraction (XRD) characteristics of the conversion from sepiolite to talc (modified from Song *et al.*, 2024a)

实验研究进一步证实,海泡石的相变过程受温度、压力及时间的协同控制。热液型海泡石在330℃时发生相变,沉积型海泡石则在310℃时相变,而过渡结构的最高温度不超过130℃。这种差异主要源于流体成分、压力以及矿物结构的不同。热液型海泡石形成于高温高压且富含 Mg^{2+} 流体的环境,其晶体结构稳定,相变温度因此较高。而沉积型海泡石则形成于低温常压条件下,结构中吸附水和杂质离子较多,结构相对松散,故在310℃时相变。此外,过渡结构的最高温度不超过130℃,这是由于低压环境下相变动力学的制约,矿物仅能形成局部有序的过渡态结构(章人骏等,1985;杨振强和许俊文,1987;Cañaveras *et al.*,2020)。时间也是推动海泡石相变程度的重要因素,通常随着沉积与成岩作用历程的延续,海泡石的转化过程更为彻底(Chen *et al.*,2022)。

3.2.2 海泡石转化为蒙脱石

蒙脱石是一种具有层状结构的铝硅酸盐矿物,以单斜晶系的排列而著称(Horch *et al.*,2002;葛津宇等,2023)(图10)。其化学表达式为: $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$,通常在海泡石埋藏过程中形成。镜下蒙脱石呈现鳞片状、薄片状以及蜂窝状等多种形态(图11)(曹华等,2024;宋金民等,2024b)。

海泡石转化为蒙脱石的过程可以分为三个阶段。初始阶段,在富铝溶液中海泡石逐渐溶解,释放出硅镁离子以及氢氧根离子,同时溶液中的 Al^{3+} 进入矿物结构。结构重建阶段,溶解组分在流体中重新组合, Al^{3+} 发挥关键作用。一方面取代八面体中的 Mg^{2+} 产生层电荷,另一方面部分替代四面体中的 Si^{4+} ,与保留的硅氧四面体共建蒙脱石的铝硅酸盐层。结晶稳定化阶段,过饱和溶液中的新生蒙脱石微晶开始沉淀。这些微小晶体通过定向聚集生长的方式逐渐构建出稳定的晶格框架,最终形成稳定的蜂窝状等矿物聚集结构。在此过程中,结构层间会固定 Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子用以中和由于铝替代产生的电荷不平衡(Khoury *et al.*,1982;Birsoy,2002;苏成鹏等,2021)。

值得注意的是,海泡石向蒙脱石转化的温度并非一个恒定值,其过程受到多种因素的综合影响,包括所处的地质环境(如埋藏深度、压力条件、热液活动等)以及周围介质的化学成分(如溶液中的离子浓

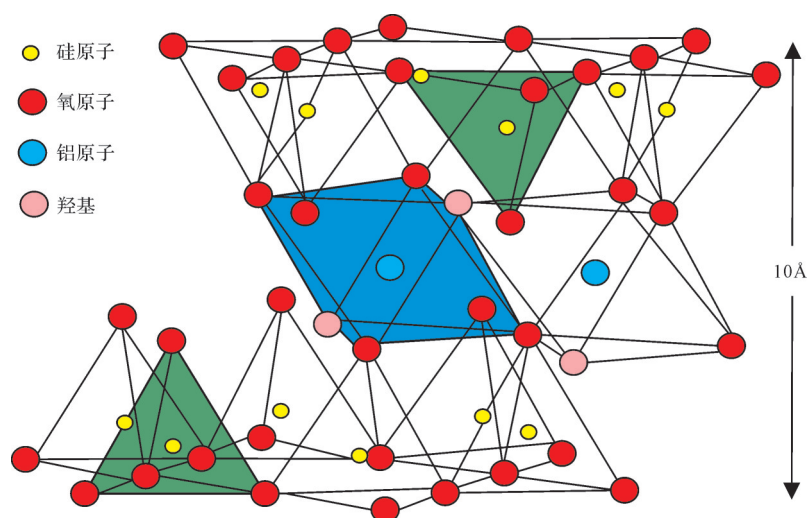
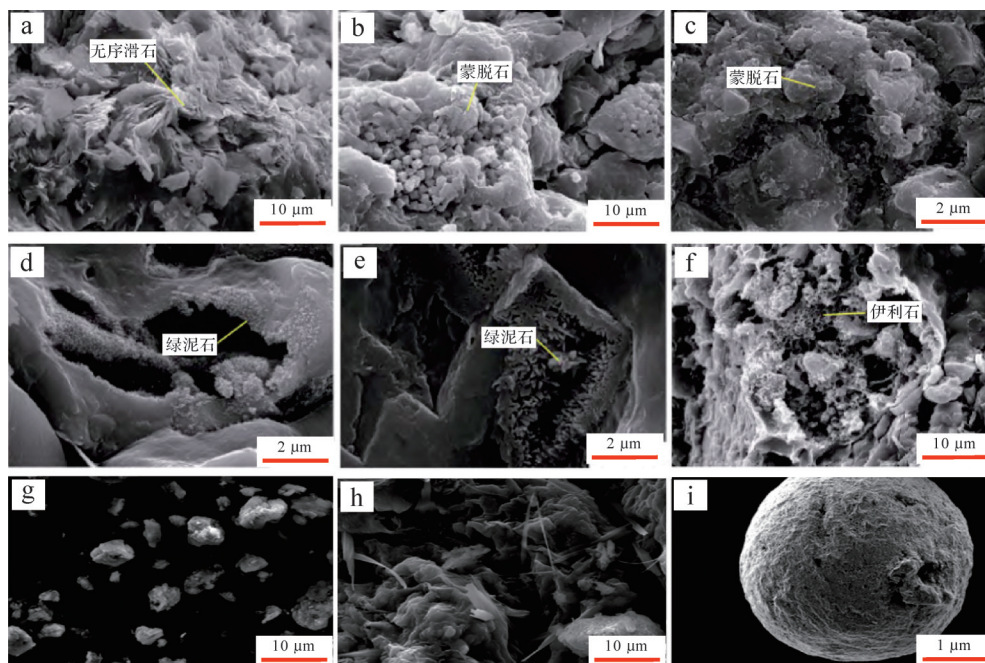
图10 层状蒙脱石三维立体图(据 Horch *et al.*, 2002 修改)Fig.10 3-D stereoscopic diagram of layered montmorillonite (modified from Horch *et al.*, 2002)

图11 蒙脱石等黏土矿物露头产状及扫描电镜特征(据宋金民等, 2024b 修改)

(a)泥质生屑灰岩中,滑石呈片状无序排列;(b)、(c)泥质生屑灰岩含有泥质,蒙脱石以鳞片状形态存在;(d)泥质生屑灰岩中,绿泥石以薄片状单体形式填充孔隙;(e)泥质生屑灰岩中,细小的板状绿泥石集合体作为孔隙衬垫出现;(f)泥质生屑灰岩中,伊利石呈现出蜂窝状结构;(g)蒙脱石粉末;(h)蒙脱石颗粒表面;(i)蒙脱石颗粒剖面

Fig.11 Outcrop occurrence and SEM characteristics of clay minerals such as montmorillonite (modified from Song *et al.*, 2024b)

(a) talc arranged in a sheet-like disorder in argillaceous calcarenite; (b, c) argillaceous bioclastic limestone containing argillaceous montmorillonite in a scaly form; (d) chlorite filling pores in the form of sheet monomers in argillaceous calcarenite; (e) fine plate-like chlorite aggregates appearing as pore liners in argillaceous calcarenite; (f) illite with a honeycomb structure in argillaceous clastic limestone; (g) montmorillonite powder; (h) montmorillonite particle surface; (i) montmorillonite particle profile

度、pH值等)。在自然条件下,当盐度较高和温度(140℃)适宜的条件下,海泡石可转化为蒙脱石。这一转化过程可能会伴随硅与镁的重新排列,促使蒙脱石结构的形成(苏成鹏等,2021)。然而,不同地区的转化条件存在差异。如川东地区的茅口组,海泡

石与蒙脱石常同时出现。在温度低于65℃的早期成岩期间,部分海泡石在富铝的浅层环境中开始向蒙脱石转变。新生成的蒙脱石往往紧贴在方解石晶体的表面,呈现出鳞片状的形态,其四周则保留纤维状的海泡石(胡东风等,2020;宋金民等,2024b)。类

似地,在四川盆地涪陵地区的生油高峰期,灰岩中的海泡石经历了脱水和析硅过程,逐渐转化为富镁蒙脱石。该过程中海泡石晶体体积收缩,并产生少量的收缩孔隙和裂缝(胡东风等,2020)。同样地,湖南醴陵地区海泡石的形成归因于直接的沉淀作用。在成岩过程中受埋藏压力与温度的影响,逐渐转化为滑石,同时伴随少量蒙脱石的生成(章人骏等,1985)。

从热力学机制看,海泡石的相变路径与产物类型主要受热液体系中 Mg^{2+}/Al^{3+} 活度比和温度的协同控制。在高温热液环境中,当 Mg^{2+}/Al^{3+} 活度比值较高时,海泡石倾向于向斯蒂文石转化。而当该比值较低时,则优先形成蒙脱石。以低镁高铝的火山热液区为例,酸性流体促进 Mg^{2+} 大量淋滤, Al^{3+} 得以嵌入矿物结构,从而直接生成蒙脱石。相比之下,在低温热液系统($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$)中,海泡石的溶解速率较低,导致转化过程较为缓慢,镁/铝活度的耦合作用相对较小。如在风化壳等低温($<50\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下,强烈 Mg^{2+} 淋失使得高岭石成为主要产物,仅在局部 Mg^{2+}/Al^{3+} 缓冲区内可形成蒙脱石(Walczyk *et al.*, 2020; 周永兴, 2022)。

实验研究进一步验证了温度对相变过程的控制效应。对比前人多项研究,发现海泡石在约 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时尚未发生显著化学变化。但升温至 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始出现少量富镁蒙脱石,表明其已进入成岩转化阶段。当温度达到 $316\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,无论实验条件是否包含盐类或氢氧化物,海泡石均发生向富镁蒙脱石的转变(Güven and Carney, 1979; Hover *et al.*, 1999; Pozo and Calvo, 2018)。这一结果与前人的研究一致(Cuevas *et al.*, 2003; Cai *et al.*, 2019),他们发现海泡石在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右转化为蒙脱石,超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 则进一步转化为蜡蛇纹石。特殊情况下,火山活动可通过释放富镁硅热液,显著促进海泡石的相变,为其转化过程提供物质来源与热力驱动。

3.3 含海泡石层系的沉积—成岩演化模式

海泡石通常沉积于富硅镁、贫铝的碱性($\text{pH}>8$)还原环境,其形成过程还受盐度、海水温度等环境因素的影响。沉积环境的动态变化是控制海泡石成岩路径分异的关键因素。例如,以四川茅口组含海泡石层系为例,沉积期内温度与淡水输入的波动,促使灰岩与泥质灰岩交替沉积。在约 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地层温度下,富镁硅的成岩流体与周围灰岩发生反应,引发了硅化和白云石化,进而形成了海泡石—滑石—白云

石—石英石矿物组合序列(范建平等, 2022; 宋金民等, 2024a)。

在此基础上,含海泡石层系的沉积与成岩演化模式进一步体现出复杂性与阶段性,其演化路径和矿物相变受到温度、元素迁移、热液作用的协同影响。海泡石成岩演化主要表现为双重路径模型:海泡石—斯蒂文石—无序滑石—滑石和海泡石—蒙脱石—绿泥石/伊利石(图12)。第一条演化序列主要受控于温度梯度变化以及热液活动所调控的连续相变过程。该序列演化始于 $130\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时海泡石层链结构的断裂,在富 Mg^{2+} 的碱性热液环境中, Mg 、 Si 元素发生迁移和重排,形成过渡相斯蒂文石。随着温度升至 $135\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$,在持续的热液循环作用下,斯蒂文石进一步脱水和重组,转化为形态不规则、晶体较小的无序滑石,其表面相较于滑石更为粗糙。超过 $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,演化为片状滑石,并在 $175\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的晚成岩阶段完成转变,热液循环流动在整个转化过程中维持着物质和能量的供应。第二条演化序列则揭示了元素迁移的复杂转化机制。在早成岩阶段(温度低于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$),热液中 Al^{3+} 的介入促进了海泡石向蒙脱石的初始转化。随着温度升至 $65\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$,富 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 的碱性热液驱动蒙脱石经历溶解—再结晶过程,部分蒙脱石进一步转变成了绿泥石。在此过程中,热液作为离子迁移的介质,为转化提供物质与能量传递的通道。当温度介于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, K^{+} 的介入引发了脱水反应,形成绿泥石与伊利石混合层矿物。在 $95\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,虽然伊/蒙混层处于稳定态,但热液环境的波动仍在持续影响其层间结构。随着温度突破 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,层间水逐渐排出且伊利石晶层比例持续增加,最终在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 完全转变为伊利石(马鹏杰等, 2017; Mulders *et al.*, 2018; 范建平等, 2022; 宋金民等, 2024b)。

4 海泡石在地质领域的应用

4.1 海泡石在油气勘探方面的应用

在油气地质领域,海泡石对烃源岩品质和储层物性具有双重控制作用。烃源岩形成方面,低洼地区因海泡石的形成及其优异的吸附特性,成为有机质富集和优质烃源岩形成的重要场所,其吸附量可占自身重量的 $20\%\sim 30\%$ (图13),这一过程导致海泡石颜色也由常见的白色或者浅灰色变为黑色,从而提高了烃源岩的品质与生烃潜力(Wang *et al.*,

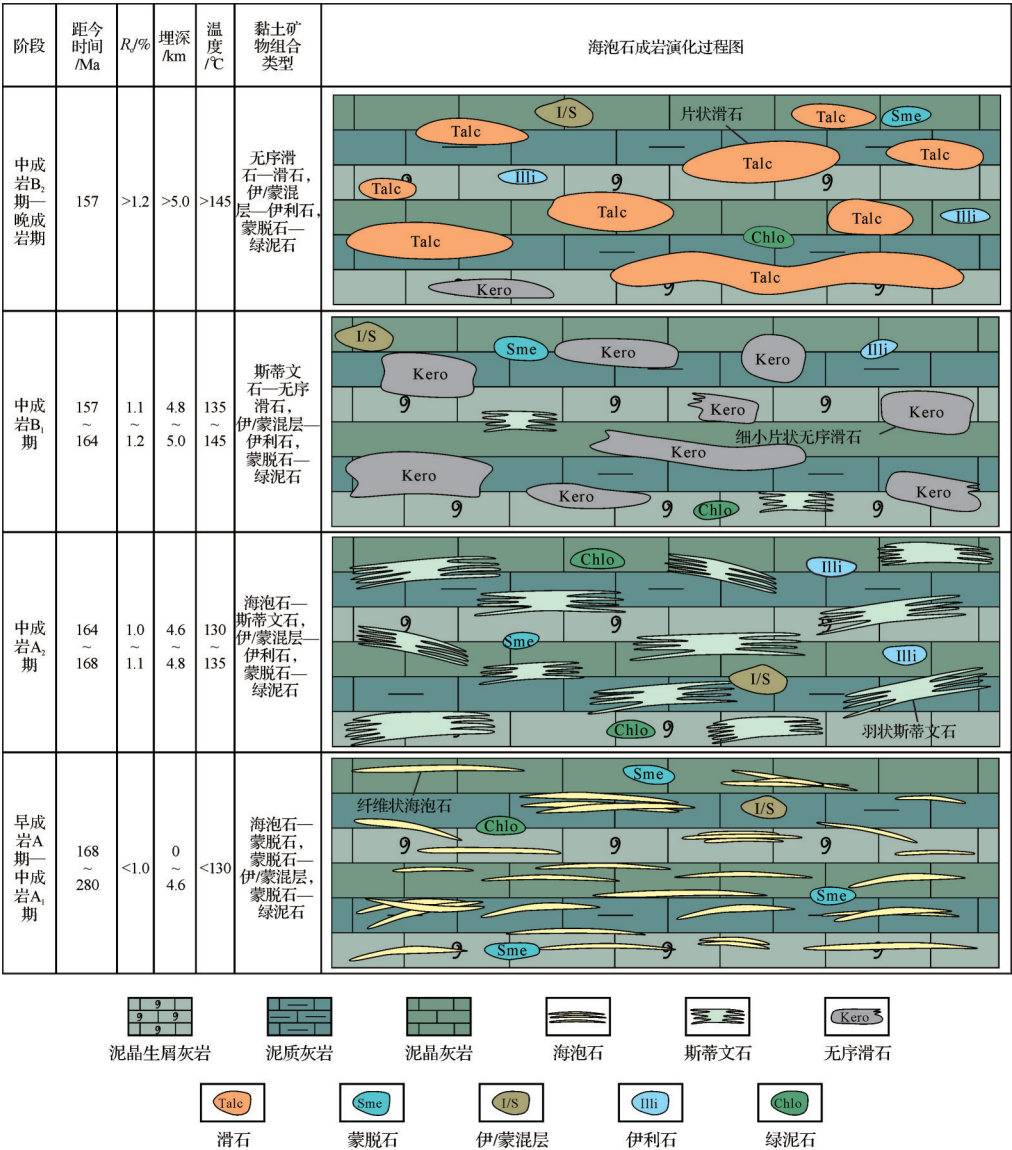


图 12 海泡石成岩演化过程图(据宋金民等, 2024b 修改)

Fig.12 Diagram illustrating evolution of clay minerals during diagenesis (modified from Song *et al.*, 2024b)

2023a; 宋金民等, 2024b)。特别是在二叠系早期低温、还原性的水体环境中, 有机物质得以完整保存, 为高品质烃源岩的形成提供了有利条件(Walczyk *et al.*, 2020)。在储层形成方面, 海泡石成岩演化过程中孔隙网络发育, 主要通过以下三种机制构建储层孔隙系统: (1) 海泡石吸附有机质后, 通过热演化过程转化为有机质孔, 其孔径主要集中在 10~100 nm 范围。(2) 层链结构塌陷过程中伴随着大量黏土收缩孔的形成, 孔隙度介于 15%~20%。(3) 成岩流体对白云石化作用引发晶间孔隙发育, 孔径可达微米级(李蓉等, 2021; 王佳蕊等, 2022; Jiang *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023a; 宋金民等, 2024b)。这些多尺度孔隙网络

显著提升了储层的储物性能, 其渗透率较常规储层提高多倍, 为油气的运移和聚集提供了高效通道。

基于上述发现, 海泡石能够孕育出两种油气成藏模式: 自生自储和下生上储(宋金民等, 2023)。在盆地凹陷区, 海泡石通过吸附—转化机制形成优质烃源岩, 同时成岩过程中发育的孔隙网络构建了优良的储集空间, 实现烃源与储层的耦合发育, 构建自生自储型成藏系统(任海侠等, 2021)。此外, 在海泡石相变过程中, 富镁成岩流体通过侧向和垂直方向的迁移, 能够推动凹陷边缘或内部相邻高部灰岩的白云石化, 进而孕育出大规模的层状或斑块状白云岩储层, 构建下生上储的成藏模式。该模式中, 烃类

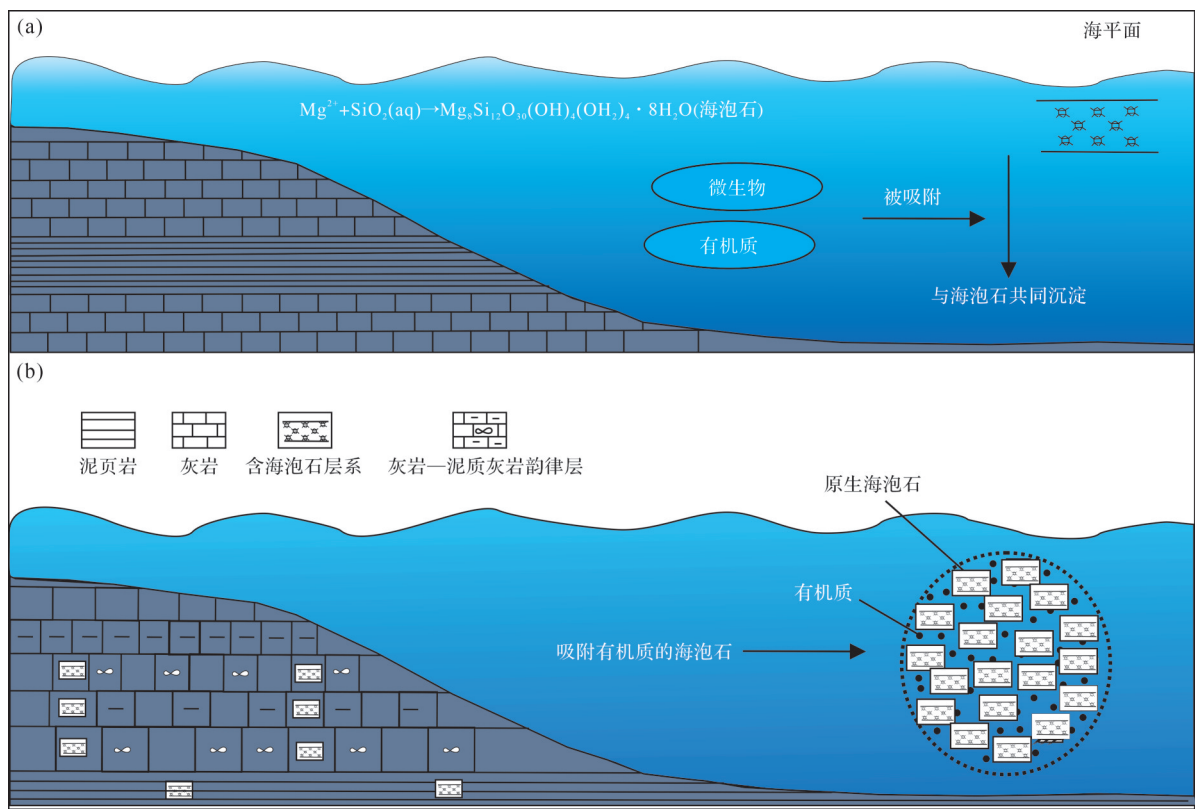


图 13 海泡石吸附有机质模式图(据宋金民等, 2022 修改)

(a)在富镁硅的适宜环境中,海泡石与有机物和微生物共同沉积;(b)沉积物随后被埋藏,形成了富含有机质的海泡石层

Fig.13 Model diagram of organic matter adsorption by sepiolite (modified from Song *et al.*, 2022)

(a) in a suitable environment rich in magnesium and silicon, sepiolite is deposited together with organic matter and microorganisms; (b) sediments are subsequently buried, forming organic-rich sepiolite layers

物质在下部烃源岩生成后,通过地质作用迁移至白云岩储层中实现聚集(Wang *et al.*, 2023b; 宋金民等, 2024a; 高和婷等, 2025)。

此外,前人基于海泡石在不同埋藏阶段成岩流体的变化过程,构建了其时空演化模型(图 14)。在较浅的埋藏阶段,少量的富镁流体主要与灰岩发生白云石化,促成了灰质白云岩等储层类型。在中埋藏阶段,随着埋藏深度的增加,含海泡石层系中的有机质热解加速了海泡石的相变,并释放大成岩流体。在地壳运动驱动下,这些成岩流体沿着断裂处向上迁移至浅层,与灰岩发生白云化反应,促成豹斑状白云岩的形成(Cai *et al.*, 2019; 宋金民等, 2022; 孔悦等, 2023)。到中深埋藏阶段,有机质裂解产生的烃类达到峰值,海泡石也发生剧烈相变,释放出大量富镁的成岩流体。这些流体在压力和重力的共同作用下聚集于低隆地区,构成富烃的白云岩储层(范建平等, 2022; 宋金民等, 2022)。

这一成岩流体演化过程不仅影响了储层的形成

与分布,也进一步揭示了含海泡石层系与油气富集之间的密切关联。研究表明,含海泡石层系总厚度与气藏的分布呈现显著正相关关系,特别是在靠近沉积中心的区域,气藏富集程度与层系厚度呈明显的线性增长趋势(图 15)(宋金民等, 2022)。具体而言,在距沉积中心 20 km 的范围内,当含海泡石层系的厚度处于 40~60 m 时,油气储藏最优。而在距沉积中心 40 km 的范围内,层系厚度介于 20~60 m 的区域也同样具备良好的成藏条件(Fesharaki *et al.*, 2007; Ilic *et al.*, 2015; Herranz and Pozo, 2022; 刘树根等, 2022)。这些区域的含海泡石层系不仅可以形成非常规气藏,还能孕育白云岩气藏,因此海泡石的分布特征可作为油气勘探的重要预测指标。其勘探风险总体上与含海泡石层系距离呈现负相关,因此不同层段的气藏勘探优势区域存在明显差异。例如,在四川盆地中二叠统的通江—长寿凹陷及其周边“C”形区域油气勘探潜力巨大。具体而言,栖霞组一段的优势区主要分布在含海泡石层系累计厚度超过 20 m 的区域,栖霞组二

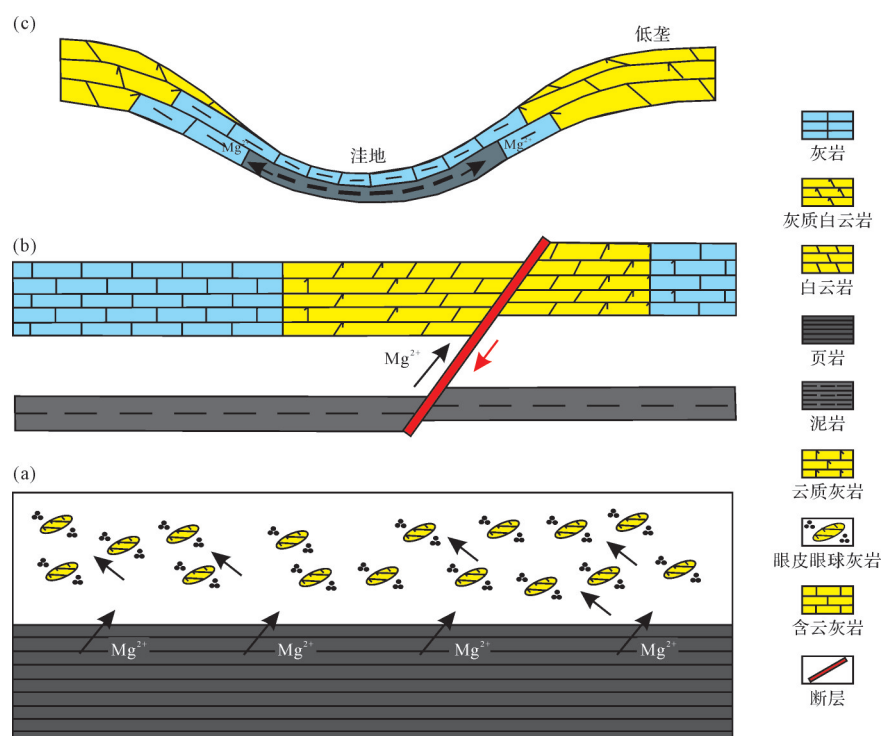


图 14 四川盆地中二叠统含海泡石层系白云石化模式(据宋金民等, 2022 修改)

(a)浅埋藏期; (b)中埋藏阶段; (c)中—深埋藏阶段

Fig.14 Dolomitization model of Middle Permian sepiolite-bearing strata in the Sichuan Basin (modified from Song *et al.*, 2022)

(a) shallow burial period; (b) mesoburial stage; (c) medium-deep burial stage

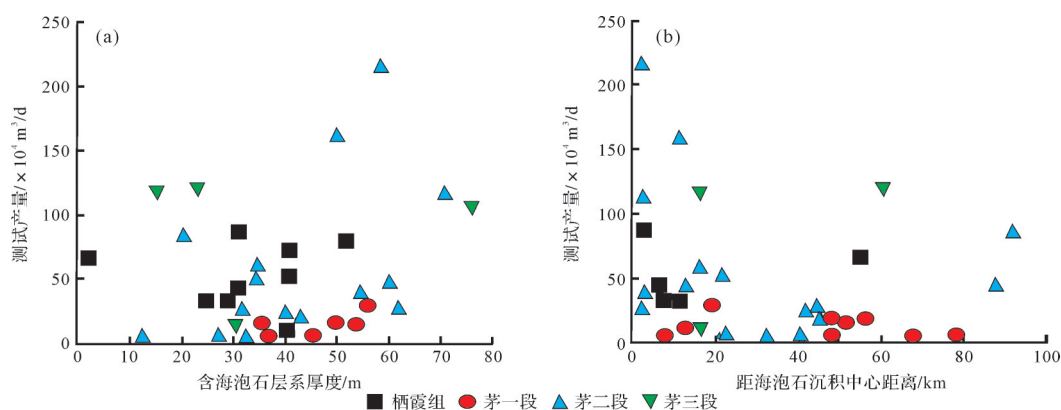


图 15 测试产量与含海泡石层系厚度及距沉积中心距离的关系(据宋金民等, 2022 修改)

(a)含海泡石层系厚度与测试产量的关系; (b)测试产量与距海泡石沉积中心距离的关系

Fig.15 Relationship between test production and the thickness of sepiolite-bearing strata and distance from the depositional center (modified from Song *et al.*, 2022)

(a) relationship between sepiolite thickness and test yield; (b) test of the relationship between production and distance from sepiolite deposition centers

段则集中在 0.3~1 m 的薄层区域, 而茅口组一段则以厚度超过 40 m 的区域最为有利(朱光有等, 2006; 刘树根等, 2022; 宋金民等, 2022)。

4.2 海泡石在古地貌方面的应用

含海泡石层系的累积厚度与中二叠统的地层总厚度之间呈现反比关系。这种现象主要归因于海泡石凹陷区域沉积的倾向, 其厚度变化与古地貌起伏

呈现高度相关性: 当含海泡石层的厚度增加时, 通常表明该地区是沉积作用的中心地带, 即地势较低, 有利于沉积物的聚集, 从而形成了较厚的含海泡石层; 相反, 若含海泡石层的厚度在某个地区减薄, 则反映该地区的沉积环境不利于海泡石的生成, 或因后期侵蚀作用导致沉积物保存较差, 这种情况往往与古地貌中的隆起相吻合(程朝, 2003; 高兆龙等, 2025)。

四川盆地的测井数据进一步证实了这一规律,位于沉积中心的栖霞一段一茅二段的平均厚度虽然低于沉积中心两侧的地区,但该区域含海泡石层系的累积厚度却相对较高(宋金民等,2024a)。

由此可见,海泡石的形成与分布对沉积格局具有重要指示意义。在古地貌形成和演化的过程中,频繁的构造活动促成断裂网络形成,为镁、硅等物质沿着断裂运移提供了良好的通道,进而控制了海泡石的沉淀与富集(宋金民等,2023)。因此,海泡石的聚集中心往往与坳陷区相一致。通常情况下,峨眉地幔柱活动会引发显著的地壳垂向运动与穹隆状隆起。在栖霞组—茅口组沉积阶段,四川盆地深部岩浆活动处于相对缓和期,主要表现为垂向位移,促使穹形隆起逐步成型。这种深部过程引发的差异构造运动,在川西北地区呈现“两台一凹”的沉积格局。其中通江—长寿(“一凹”)低洼带作为沉积中心,在峨眉地幔柱活动作用下,坳陷区较深的水体环境为海泡石沉淀提供了理想条件,导致含海泡石层系厚度显著增加,分布面积达 $7.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均厚度约为50 m。相比之下,蜀南和川东两个隆起区(“两台”)由于处于相对高能环境,含海泡石层系厚度相对较薄。其中,川西北—蜀南台地含海泡石层系分布范围约为 $8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均厚度约为25 m,而川东北台地含海泡石层系分布范围大约 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均厚度仅为14 m。这种分布和厚度变化可以反演古地貌的凹陷与隆起特征(张廷山等,2011;刘树根等,2022;张宏辉等,2022,2024;曹华等,2024;江青春,2024)。

4.3 海泡石在古环境方面的应用

海泡石的形成及其分布特征不仅揭示了古地貌与油气藏之间的关联,还记录了蒸发系统、水位变化、气候条件以及缺氧环境等多种古环境信息,因而成为重建古环境的重要地质指示物。

海泡石的沉淀需要有效的蒸发系统来浓缩镁

硅离子,这种环境常常发育在冲积扇或者湖泊地区,并且与镁黏土泥滩相关(Carrillo *et al.*, 2024)。例如,博茨瓦纳北部地区和西班牙杜罗盆地海泡石的形成揭示了这些地区在干旱和高蒸发环境下曾发生降水,导致水位上升并促进海泡石的沉积,显示出典型的蒸发—泥滩环境特征(图16)(Djoulah *et al.*, 2023)。此外,海泡石纤维的形成不仅反映出河流水位的变化,还受气候和缺氧环境的影响。在干旱的气候环境下,含海泡石的母岩更容易沉积。并且沉积物中的Ni/Co与V/(V+Ni)比值表明海泡石在缺氧的条件下形成,我国扬子台地东南区域海泡石的形成也反映了该地区曾经处于缺氧的环境状态(杨振强,1992;Sanz-Montero and Rodríguez-Aranda, 2009;Kadir *et al.*, 2017)。类似地,有学者在对突尼斯南部进行调研中发现,随着高岭石的减少,海泡石逐渐增多(Bouheli *et al.*, 2023; Cavalcante *et al.*, 2023),进一步证实了海泡石作为干旱气候标志物的可靠性。

除蒸发与气候控制外,风暴和洋流扰动有助于硅、镁等元素大量聚集,从而促进海泡石的大量沉淀。这一过程不仅揭示了海泡石形成的地质背景,还表明其分布可以作为指示风暴和洋流分布等重大事件的重要标志。例如,在扬子地区的中下游地带,海泡石主要分布在江南盆地的东北部台阶和右江盆地的中部台阶,而在中下游地区分布较为稀疏。这种特征揭示了在二叠纪时期,华南板块的风暴主要作用于上扬子台地,而对中下游扬子地区的冲击较小(杨振强,1992;张国伟等,2013;Kadir *et al.*, 2016)。同样地,海泡石中由临界二氧化碳分压引发的非化学计量溶解有效指示了白垩纪—古近纪等重大地质事件(Galan *et al.*, 1985)。如在马德里盆地中,湖泊中海泡石等沉积物可以揭示整个盆地在中新世发生了剧烈的变化,为利用海泡石探寻准层型和地层界限提供了新的方法论支持(Mokatse *et al.*, 2023)。

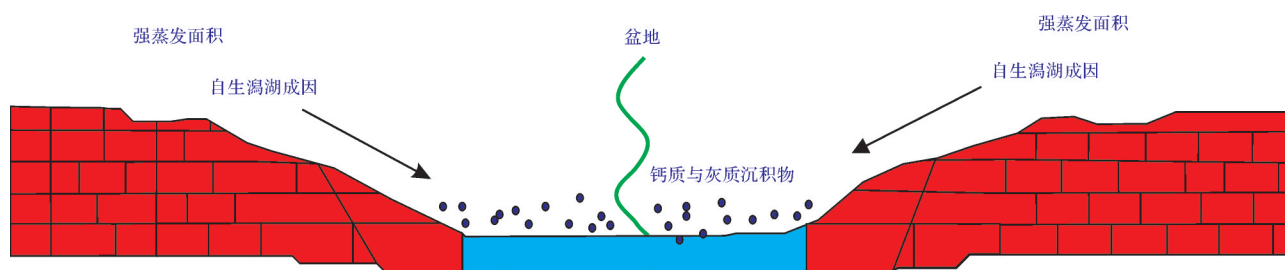


图16 古环境条件的示意图重建(据 Cavalcante *et al.*, 2023 修改)

Fig.16 Schematic reconstruction of paleoenvironmental conditions (modified from Cavalcante *et al.*, 2023)

5 结论与展望

(1) 海泡石的成因可分为沉积型和成岩蚀变型两大类。其中,沉积型中的直接沉积类是原位风化溶解作用形成的自生海泡石,区别于陆源搬运沉积类的物理迁移作用机制。而成岩蚀变型又可依据其原始物质来源划分为铁蒙脱石溶蚀转化型、火山碎屑物质蚀变型以及富镁碳酸盐岩蚀变型。

(2) 海泡石通常形成于富硅镁、贫铝的碱性还原环境,其沉积过程受气候条件、pH值、硅源及水文环境等多种因素的协同控制。在后期埋藏成岩阶段,随着温压升高,海泡石链状结构发生断裂,引发矿物的相变演化,依次形成“海泡石—斯蒂文石—无序滑石—滑石”以及“海泡石—蒙脱石—绿泥石/伊利石”等多样化的演化序列,反映了其复杂的成岩转化机制和热动力响应特征。

(3) 海泡石在油气勘探、古地貌重建及古环境恢复中具有重要的研究价值。其优异的有机质吸附能力,有助于提升烃源岩的有机丰度和生烃潜力。成岩演化过程中,海泡石能形成多样化的孔隙网络,构建有效的渗流通道和储集空间,促进油气的富集与保存。同时,海泡石层系的成岩流体促使凹陷边缘高能滩灰岩白云石化,形成优质储层,支撑自生自储与下生上储的两种成藏模式。在古地貌方面,含海泡石层系的累积厚度与地层总厚度呈负相关,反映出明显的沉积格局差异。此外,海泡石对气候和水文条件有良好指示作用,其微量元素特征还能与区域重大地质事件相对应,进一步拓展了其在古环境与地质历史重建中的应用潜力。

随着海泡石在各个领域影响力的不断扩大,未来研究将重点关注以下几个方向:(1)通过海泡石矿物特征解析古老地球环境信息,建立硅酸盐矿物的生长速率模型;(2)基于海泡石的地球化学特征,构建碳氢化合物勘探的沉积相模式;(3)致力于开发含海泡石岩石的古环境重建技术,提升海泡石层系厚度的地震解释精度,并创新含海泡石层系的油气勘探方法体系。

参考文献(References)

曹华,山述娇,田辰,等. 2024. 川东—川北地区二叠系茅口组沉积演化及其油气地质意义[J]. 石油实验地质, 46(3): 460-471. [Cao Hua, Shan Shujiao, Tian Chen, et al. 2024. Sedimentary evolution and petroleum geological significance of Permian Maokou Forma-

tion in eastern and northern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 46(3): 460-471.]

陈秋霖,张杰,廖祥,等. 2024. 改性海泡石对水中余氯的去除性能研究[J]. 非金属矿, 47(4): 90-92, 97. [Chen Qiulin, Zhang Jie, Liao Xiang, et al. 2024. Study on removal of residual chlorine from water by modified sepiolite[J]. Non-Metallic Mines, 47(4): 90-92, 97.]

陈思钰,李茜,朱光有,等. 2025. 镓同位素在地球科学研究中的进展与挑战[J]. 地质学报, 99(6): 1888-1904. [Chen Siyu, Li Xi, Zhu Guangyou, et al. 2025. Advances and challenges of gallium isotopes in earth sciences[J]. Acta Geologica Sinica, 99(6): 1888-1904.]

陈芸菁,王佩英,任磊夫. 1985. 海泡石在成岩作用过程中向滑石转化的研究[J]. 科学通报, 30(4): 284-287. [Chen Yunjing, Wang Peiying, Ren Leifu. 1985. Transformation of sepiolite into talc during diagenesis[J]. Chinese Science Bulletin, 30(4): 284-287.]

程朝. 2003. 韶山银田寺海泡石粘土矿床控矿因素及成因探讨[J]. 湖南地质, 22(2): 112-117. [Cheng Zhao. 2003. Discussion on the deposit-controlling factors and metallogenic cause of Yintiansi sepiolite clay deposit in Shaoshan[J]. Hunan Geology, 22(2): 112-117.]

董国军. 2001. 湘潭石潭海泡石粘土矿床特征及找矿方向[J]. 湖南地质, 20(4): 259-262. [Dong Guojun. 2001. Characteristics of sepiolite clay deposit at Shitanxiangtan and its prospecting direction [J]. Hunan Geology, 20(4): 259-262.]

范建平,宋金民,江青春,等. 2022. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式[J]. 石油与天然气地质, 43(6): 1413-1430. [Fan Jianping, Song Jinmin, Jiang Qingchun, et al. 2022. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 member in eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 43(6): 1413-1430.]

樊金虎,李鹏,王鹏,等. 2024. 印支—燕山期断裂构造对辽东小窑沟滑石矿床的改造及找矿预测[J]. 中国非金属矿工业导刊, (3): 11-15. [Fan Jinhu, Li Peng, Wang Peng, et al. 2024. Genesis and metallogenic prediction of talc deposit in Xiaoyaogou area, southern Liaoning province[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, (3): 11-15.]

Galan E, Castillo A, 刘德镒. 1985. 西班牙第三纪盆地的海泡石和坡缕石:大陆环境的成因模式[J]. 湖南地质(增刊1): 120-134. [Galan E, Castillo A, Liu Deyi. 1985. Sepiolite and palyzoite in the Tertiary basin of Spain: A genetic model of the continental environment[J]. Hunan Geology (Suppl. 1): 120-134.]

高和婷,李茜,朱光有,等. 2025. 从晶体成核—生长热力学剖析白云岩成因问题的新进展[J]. 地学前缘, 32(5): 165-189. [Gao Heting, Li Xi, Zhu Guangyou, et al. 2025. A review of dolomite genesis analysis based on crystal nucleation-growth thermodynamic and kinetic[J]. Earth Science Frontiers, 32(5): 165-189.]

高兆龙,李跃杰,张玺华,等. 2025. 蜀南地区中二叠统茅口组油气成藏演化与气藏分布规律[J]. 天然气地球科学, 36(2): 307-321. [Gao Zhaolong, Li Yuejie, Zhang Xihua, et al. 2025. Evolution of

- oil and gas formation and distribution of gas reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of Shunan area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 36(2): 307-321.]
- 葛津宇, 韦华, 徐菲, 等. 2023. CSH-蒙脱石界面能对水泥固化蒙脱土抗压强度的影响[J]. *硅酸盐通报*, 42(3): 827-836. [Ge Jinyu, Wei Hua, Xu Fei, et al. 2023. Influence of CSH-montmorillonite interface energy on compressive strength of cement-stabilized montmorillonite clay[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 42(3): 827-836.]
- 郝彤, 乔天龙, 冷发光, 等. 2023. 海泡石对水泥基材料性能影响研究综述[J]. *混凝土* (4): 101-104. [Hao Tong, Qiao Tianlong, Leng Faguang, et al. 2023. Review on the effect of sepiolite on properties of cement-based materials[J]. *Concrete* (4): 101-104.]
- 侯凯, 郑承辉, 张俊华, 等. 2022. 某低品位沉积型海泡石提纯试验研究[J]. *金属矿山* (7): 181-186. [Hou Kai, Zheng Chenghui, Zhang Junhua, et al. 2022. Purification experiments research of a low-grade sedimentary sepiolite[J]. *Metal Mine* (7): 181-186.]
- 侯占峰, 周大伟, 辛振祥. 2023. 海泡石的活化对湿法制备天然橡胶复合材料性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 39(11): 54-63. [Hou Zhanfeng, Zhou Dawei, Xin Zhenxiang. 2023. Effect of sepiolite activation on the properties of natural rubber composites prepared by wet mixing process[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 39(11): 54-63.]
- 胡陈, 张春梅, 苏晓悦, 等. 2024. 海泡石纤维表面包覆二氧化硅增强油井水泥的力学性能[J]. *中国粉体技术*, 30(4): 51-61. [Hu Chen, Zhang Chunmei, Su Xiaoyue, et al. 2024. Mechanical properties of oil well cement reinforced by silica-coated surface of sepiolite fiber[J]. *China Powder Science and Technology*, 30(4): 51-61.]
- 胡东风, 王良军, 张汉荣, 等. 2020. 碳酸盐岩烃源岩气藏的发现及其油气地质意义: 以四川盆地涪陵地区中二叠统茅口组一段气藏为例[J]. *天然气工业*, 40(7): 23-33. [Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Zhang Hanrong, et al. 2020. Discovery of carbonate source rock gas reservoir and its petroleum geological implications: A case study of the gas reservoir in the First member of Middle Permian Maokou Formation in the Fuling area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 40(7): 23-33.]
- 黄月, 朱紫光, 李生, 等. 2025. 铈(Ce)的地球化学特征与同位素分馏效应及其在地球科学中的应用[J/OL]. *地学前缘*. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.3.93>. [Huang Yue, Zhu Ziguang, Li Sheng, et al. 2025. Geochemical characterization and isotopic fractionation effects of cerium (Ce) and its application in earth sciences [J/OL]. *Earth Science Frontiers*. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.3.93>.]
- 贾凡琛, 李茜, 朱光有, 等. 2025. 钡及其同位素地球化学循环与分馏机制进展[J]. *地球科学进展*, 40(6): 621-634. [Jia Fanchen, Li Xi, Zhu Guangyou, et al. 2025. Advances in geochemical cycles and fractionation mechanisms of barium and its isotopes[J]. *Advances in Earth Science*, 40(6): 621-634.]
- 江青春. 2024. 川中—蜀南地区茅口组岩溶储层油气成藏条件与有利区带预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 43(4): 48-58. [Jiang Qingchun. 2024. Hydrocarbon accumulation conditions of karst reservoirs of Maokou Formation in central-southern Sichuan Basin and favorable plays prediction[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 43(4): 48-58.]
- 孔悦, 高晓鹏, 石开波, 等. 2023. 塔北地区奥陶系鹰山组斑状白云岩成因及储层意义[J]. *石油学报*, 44(4): 598-611. [Kong Yue, Gao Xiaopeng, Shi Kaibo, et al. 2023. Genesis and reservoir significance of patchy dolostone of the Ordovician Yingshan Formation in Tabei area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 44(4): 598-611.]
- 李德生, 李伯华. 2022. “双碳”背景下石油地质学的理论创新与迈向能源发展多元化新时代[J]. *地学前缘*, 29(6): 1-9. [Li Desheng, Li Bohua. 2022. Towards a new era of diversified energy development: Innovation in theoretical petroleum geology to meet “dual carbon target”[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 1-9.]
- 李勤椿, 陈佳妮, 许凡萍. 2024. 海泡石应用于重金属污染土壤治理的研究进展[J]. *环境生态学*, 6(11): 76-82. [Li Qinchun, Chen Jiani, Xu Fanping. 2024. Research progress on remediation of heavy metal contaminated soil by sepiolite[J]. *Environmental Ecology*, 6(11): 76-82.]
- 李蓉, 苏成鹏, 石国山, 等. 2021. 川南地区二叠系茅口组一段瘤状灰岩储层成因[J]. *天然气地球科学*, 32(6): 806-815. [Li Rong, Su Chengpeng, Shi Guoshan, et al. 2021. The genesis of nodular limestone reservoirs of the first period of Maokou Formation of Permian in southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 32(6): 806-815.]
- 李文光. 2001. 海泡石粘土矿床的成矿地质特征及找矿远景[J]. *化工矿产地质*, 23(3): 158-164. [Li Wenguang. 2001. Mineralogical geological features of sepiolite clay ore deposit and its prospect of ore-search[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(3): 158-164.]
- 李文光, 张瑛. 1999. 我国海泡石矿床成矿条件及成因类型初探[J]. *陕西地质*, 17(1): 43-47. [Li Wenguang, Zhang Ying. 1999. A preliminary discussion on the ore-forming conditions and genetic types of sepiolite deposits in China[J]. *Geology of Shaanxi*, 17(1): 43-47.]
- 李旭平, 朱钟秀. 1993. 浏阳永和海泡石矿床中海泡石向滑石转变的矿物学研究[J]. *长春地质学院学报*, 23(2): 151-154, 241. [Li Xuping, Zhu Zhongxiu. 1993. Mineralogical study on transformation from sepiolite to talc at Yonghe sepiolite deposit in Liuyang district[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 23(2): 151-154, 241.]
- 刘德镒. 1990. 湖南下二叠统海泡石及其主要伴生粘土矿物的扫描电镜研究[J]. *沉积与特提斯地质*, (1): 46-55. [Liu Deyi. 1990. The use of scanning electron microscopy in the study of Lower Permian sepiolite and its main associated minerals in Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, (1): 46-55.]
- 刘瑾, 夏文谦, 李晶晶, 等. 2019. 川东南地区茅一段储层特征分析[J]. *科技通报*, 35(7): 26-32. [Liu Jin, Xia Wenqian, Li Jingjing, et al. 2019. Analysis of reservoir characteristics of the First mem-

- ber of Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Science and Technology, 35(7): 26-32.]
- 刘树根,文龙,宋金民,等. 2022. 四川盆地中二叠统构造—沉积分异与油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(4): 385-413. [Liu Shugen, Wen Long, Song Jinmin, et al. 2022. Sedimentary topography and tectonic differentiation on the Middle Permian platform and hydrocarbon exploration in Sichuan Basin, SW China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 49(4): 385-413.]
- 马鹏杰,林承焰,张世奇,等. 2017. 碎屑岩储集层中绿泥石包膜的研究现状[J]. 古地志学报, 19(1): 147-159. [Ma Pengjie, Lin Chengyan, Zhang Shiqi, et al. 2017. An overview on study of chlorite films in clastic reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 19(1): 147-159.]
- 孟雪芬,冯辉霞,张斌,等. 2020. 海泡石的改性方法及其应用研究进展[J]. 应用化工, 49(9): 2319-2323. [Meng Xuefen, Feng Huixia, Zhang Bin, et al. 2020. Progress in modification method and application of sepiolite[J]. Applied Chemical Industry, 49(9): 2319-2323.]
- 彭璐. 2017. 湖南浏阳永和海泡石的研究[J]. 资源信息与工程, 32(3): 38-40, 42. [Peng Lu. 2017. Research on sepiolite in Yonghe, Liuyang, Hunan province[J]. Resource Information and Engineering, 32(3): 38-40, 42.]
- 彭倩,邢佳杰,钟婉菱,等. 2024. 氧化铜/海泡石催化过滤膜的制备及其过硫酸盐活化性能[J]. 硅酸盐学报, 52(10): 3180-3191. [Peng Qian, Xing Jiajie, Zhong Wanling, et al. 2024. Preparation of CuO/sepiolite catalytic filtration membrane and its activation performance for peroxymonosulfate[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 52(10): 3180-3191.]
- 任海侠,林小兵,刘叶,等. 2021. 川西南二叠系茅口组一段滑石特征及其形成机理:以A1井茅一段样品为例[J]. 石油实验地质, 43(6): 1038-1047. [Ren Haixia, Lin Xiaobing, Liu Ye, et al. 2021. Characteristics and formation mechanism of talc in Permian Maokou Formation, southwestern Sichuan Basin: A case study of First member of Maokou Formation in well A1[J]. Petroleum Geology and Experiment, 43(6): 1038-1047.]
- 任磊夫. 1988. 试论粘土矿物转化过渡结构[J]. 沉积学报, 6(1): 80-87. [Ren Leifu. 1988. Intermediate structures of clay minerals during transformation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(1): 80-87.]
- 任一言,杨贵才,杨思侠,等. 2024. 改性海泡石涂布纸的制备及其对甲醛的吸附性能[J]. 包装工程, 45(11): 34-43. [Ren Yiyang, Yang Guicai, Yang Sixia, et al. 2024. Preparation of modified sepiolite coated paper and its adsorption performance for formaldehyde[J]. Packaging Engineering, 45(11): 34-43.]
- 宋金民,江青春,刘树根,等. 2024a. 四川盆地中二叠统茅口组一段含海泡石层系古环境与沉积格局指示意义[J]. 石油学报, 45(6): 914-931. [Song Jinmin, Jiang Qingchun, Liu Shugen, et al. 2024a. Paleoenvironment and sedimentary significances of sepiolite-containing succession in the First member of Middle Permian Maokou Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 45(6): 914-931.]
- 宋金民,刘树根,金鑫,等. 2022. 四川盆地中二叠统含海泡石层系源储组合新模式及其油气勘探新领域[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(2): 129-149. [Song Jinmin, Liu Shugen, Jin Xin, et al. 2022. A new model of source-reservoir association and new fields of oil and gas exploration in the Middle Permian sepiolite bearing strata, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 49(2): 129-149.]
- 宋金民,刘树根,李智武,等. 2023. 四川盆地中二叠统油气成藏模式与有利勘探区分布[J]. 天然气工业, 43(11): 54-71. [Song Jinmin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. 2023. Accumulation model and favorable exploration area distribution of the Middle Permian oil and gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 43(11): 54-71.]
- 宋金民,王佳蕊,刘树根,等. 2024b. 含海泡石层系泥质灰岩中自生黏土矿物的类型、组成与成岩演化过程:以川东地区中二叠统茅口组茅一段为例[J]. 石油勘探与开发, 51(2): 311-322. [Song Jinmin, Wang Jiarui, Liu Shugen, et al. 2024b. Types, composition and diagenetic evolution of authigenic clay minerals in argillaceous limestone of sepiolite-bearing strata: A case study of Mao-1 member of Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(2): 311-322.]
- 苏成鹏,李飞,谭秀成,等. 2021. 古代碳酸盐岩台地自生泥质组成分因及意义:以上寺剖面中二叠统茅口组为例[J]. 沉积学报, 39(3): 550-570. [Su Chengpeng, Li Fei, Tan Xiucheng, et al. 2021. Origin and significance of authigenic argillaceous components on the ancient carbonate platform: A case study from the Maokou Formation of the Middle Permian at the Shangsi section, Guangyuan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(3): 550-570.]
- 孙迪,陈灿,龚意辉,等. 2024. 海泡石在农产品及水体重金属污染修复中的研究进展[J]. 生命科学研究, 28(1): 83-94. [Sun Di, Chen Can, Gong Yihui, et al. 2024. Research progress of sepiolite in remediation of heavy metal pollution in agricultural products and water bodies[J]. Life Science Research, 28(1): 83-94.]
- 王吉中,李胜荣,江永宏. 2004. 四川新康风化淋滤型海泡石的热相变研究[J]. 矿物学报, 24(1): 55-60. [Wang Jizhong, Li Shengrong, Jiang Yonghong. 2004. A study on the phase transformation of sepiolite from Xinkang, Sichuan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 24(1): 55-60.]
- 王佳蕊,宋金民,刘树根,等. 2022. 川东地区茅口组一段微孔特征及其主控因素[J]. 非常规油气, 9(3): 32-41. [Wang Jiarui, Song Jinmin, Liu Shugen, et al. 2022. Micropore characteristics and main controlling factors of the Mao-1 member of Maokou Formation in eastern Sichuan[J]. Unconventional Oil & Gas, 9(3): 32-41.]
- 王润婷,李雪,余学磊. 2019. 海泡石粘土矿床地质特征及其找矿概述[J]. 四川有色金属(1): 15-17, 49. [Wang Runting, Li Xue, Yu Xuelei. 2019. Geological characteristics and prospecting of sepiolite clay deposits[J]. Sichuan Nonferrous Metals (1): 15-17, 49.]

- 王帅,刘芝芳,宋涛涛,等. 2023. 山东莱州道刘家滑石矿地质特征及找矿标志[J]. 山东国土资源, 39(12): 1-6. [Wang Shuai, Liu Zhifang, Song Taotao, et al. 2023. Geological characteristics and prospecting criteria of Daoliujia talc deposit in Laizhou city in Shandong province[J]. Shandong Land and Resources, 39(12): 1-6.]
- 王维,薛传东,杨天南,等. 2023. 滇西南惠民超大型铁矿床:一个晚三叠世火山沉积型矿床[J]. 地质学报, 97(4): 1123-1139. [Wang Wei, Xue Chuandong, Yang Tiannan, et al. 2023. The supergiant Huimin iron deposit in southwestern Yunnan province, SW China: A Late Triassic volcanic-sedimentary type deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 97(4): 1123-1139.]
- 魏均启,王芳,鲁力,等. 2014. 湖南湘潭毛塘海泡石矿物特征及定量分析研究[J]. 资源环境与工程, 28(5): 737-742. [Wei Junqi, Wang Fang, Lu Li, et al. 2014. Study on sepiolite mineral characteristics and quantitative analysis of Maotang of Xiangtan city, Hunan province[J]. Resources Environment & Engineering, 28(5): 737-742.]
- 鲜雯,熊惠明,黄阳,等. 2024. 聚多巴胺改性海泡石对有机染料的吸附性能研究[J]. 现代矿业, 40(6): 196-202. [Xian Wen, Xiong Huiming, Huang Yang, et al. 2024. Adsorption properties of polydopamine modified sepiolite for organic dyes[J]. Modern Mining, 40(6): 196-202.]
- 颜佳新. 2004. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义[J]. 沉积学报, 22(4): 579-587. [Yan Jiaxin. 2004. Origin of Permian Chihshian carbonates from South China and its geological implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 22(4): 579-587.]
- 杨振强. 1992. 扬子地台东南边缘早二叠世海泡石沉积与盆地缺氧环境[C]//宜昌地质矿产研究所. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(18). 北京:地质出版社. [Yang Zhenqiang. 1992. Early Permian sepiolite sedimentation and basin anoxic environments at the southeastern edge of Yangtze Platform[C]//Yichang Institute of Geology and Mineral Resources Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (18). Beijing: Geological Publishing House.]
- 杨振强,许俊文. 1987. 萍乐坳陷海泡石的形成及后期变化[C]//宜昌地质矿产研究所. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(12). 北京:地质出版社. [Yang Zhenqiang, Xu Junwen. 1987. The formation and post-sedimentary alternation of sepiolite in the Pingle Depression[C]//Yichang Institute of Geology and Mineral Resources. Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (12). Beijing: Geological Publishing House.]
- 张国伟,郭安林,王岳军,等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学, 43(10): 1553-1582. [Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, et al. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. Science China Earth Sciences, 43(10): 1553-1582.]
- 张宏辉,吴亮,李鸿,等. 2022. 滇东北乌蒙山地区峨眉地幔柱活动与火山—沉积盆地的响应关系[J]. 现代地质, 36(1): 225-243. [Zhang Honghui, Wu Liang, Li Hong, et al. 2022. Relation between the Emeishan mantle plume activity and Wumengshan volcanic-sedimentary basin in northeastern Yunnan[J]. Geoscience, 36(1): 225-243.]
- 张宏辉,杨朝,李致伟,等. 2024. 乌蒙山地区茅口组中上部火山物质的发现:峨眉地幔柱早期活动的证据[J]. 地质通报, 43(7): 1207-1220. [Zhang Honghui, Yang Zhao, Li Zhiwei, et al. 2024. Discovery of volcanic matter in the upper Maokou Formation of the Wumengshan area: Evidence of early activity of the Emeishan mantle plume[J]. Geological Bulletin of China, 43(7): 1207-1220.]
- 章人骏. 1947. 江西乐平县耐火白土概述[J]. 地质论评(增刊2): 241-248. [Zhang Renjun. 1947. Overview of refractory clay in Leping county, Jiangxi province[J]. Geological Review (Suppl. 2): 241-248.]
- 章人骏,丘翠薇,彭长琪,等. 1985. 湖南醴陵地区镁质粘土的特征及成因探讨[C]//宜昌地质矿产研究所. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(9). 北京:地质出版社. [Zhang Renjun, Qiu Cuiwei, Peng Changqi, et al. 1985. The characteristics of magnesium-rich clay in Liling area, Hunan province and a discussion on its genesis[C]//Yichang Institute of Geology and Mineral Resources-Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (9). Beijing: Geological Publishing House.]
- 章淑华. 1985. 用红外光谱法研究海泡石的热相变[J]. 矿物学报, 5(3): 234-238. [Zhang Shuhua. 1985. Thermal transition of sepiolite: An infrared spectrographic study[J]. Acta Mineralogica Sinica, 5(3): 234-238.]
- 张廷山,陈晓慧,刘治成,等. 2011. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. 地质学报, 85(8): 1251-1264. [Zhang Tingshan, Chen Xiaohui, Liu Zhicheng, et al. 2011. Effect of Emeishan mantle plume over the sedimentary pattern of mid-Permian Xixia Period in Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 85(8): 1251-1264.]
- 张雪婷,阳海. 2022. 湘潭海泡石产业多元融合驱动因素与发展路径探究[J]. 商业经济(9): 41-43. [Zhang Xueting, Yang Hai. 2022. Exploring the driving factors and development path of the sepiolite industry in Xiangtan[J]. Business & Economy (9): 41-43.]
- 张宇,曹清古,罗开平,等. 2022. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 43(3): 610-620. [Zhang Yu, Cao Qinggu, Luo Kaiping, et al. 2022. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained[J]. Oil & Gas Geology, 43(3): 610-620.]
- 赵书华,李家波,段云飞,等. 2023. 海泡石在环氧树脂复合涂层中的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 44(9): 65-70. [Zhao Shuhua, Li Jiabo, Duan Yunfei, et al. 2023. Research progress of sepiolite in epoxy resin composite coating[J]. Corrosion and Protection, 44(9): 65-70.]
- 郑凯航,李茜,朱光有,等. 2025. 硅(Si)同位素地球化学与硅质岩成因机理的研究进展[J]. 地质论评, 71(5): 1741-1760. [Zheng Kaihang, Li Xi, Zhu Guangyou, et al. 2025. New progress in silicon

- isotope geochemistry and genetic mechanism of siliceous rocks[J]. *Geological Review*, 71(5): 1741-1760.]
- 郑正福, 陈必河, 杜云, 等. 2023. 湖南省湘潭县毛塘矿区海泡石黏土矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿产与地质*, 37(2): 271-278. [Zheng Zhengfu, Chen Bihe, Du Yun, et al. 2023. Geological characteristics and genesis discussion of sepiolite clay deposit in Maotang mining area, Xiangtan county, Hunan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 37(2): 271-278.]
- 周永兴. 2022. 海泡石形成过程热力学探讨[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (1): 69-74. [Zhou Yongxing. 2022. Discussion on thermodynamics of sepiolite formation[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, (1): 69-74.]
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 2006. 四川盆地天然气特征及气源[J]. *地质前缘*, 13(2): 234-248. [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. 2006. The characteristics of natural gas in Sichuan Basin and its sources[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 234-248.]
- Allison M A, Riggs S R. 1994. Clay-mineral suites in cyclic Miocene sediments: A model for continental-margin deposition in a mixed siliciclastic-phosphatic-dolomitic-biogenic system[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 64(2A): 386-395.
- Arizaleta M L, Nightingale M, Tutolo B M. 2020. A rate law for sepiolite growth at ambient temperatures and its implications for early lacustrine diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 288: 301-315.
- Bakhshi Ardakani S, Rajabi A M. 2021. Laboratory investigation of clayey soils improvement using sepiolite as an additive; Engineering performances and micro-scale analysis[J]. *Engineering Geology*, 293: 106328.
- Beauchamp B, Baud A. 2002. Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: Evidence for end-Permian collapse of thermohaline circulation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 184(1/2): 37-63.
- Birsoy R. 2002. Formation of sepiolite-palygorskite and related minerals from solution[J]. *Clays and Clay Minerals*, 50(6): 736-745.
- Bolle M P, Pardo A, Adatte T, et al. 2000. Climatic evolution on the southeastern margin of the Tethys (Negev, Israel) from the Palaeocene to the Early Eocene: Focus on the Late Palaeocene thermal maximum[J]. *Journal of the Geological Society*, 157(5): 929-941.
- Bouheli F, Chebbi M R, Khalfi C, et al. 2023. Carbonate reservoirs quality assessment using sequence stratigraphy study and diagenetic analysis: A case of the oxic Cenomanian-Turonian deposits in Dahar Cliff, southern Tunisia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 207: 105065.
- Bristow T F, Kennedy M J, Morrison K D, et al. 2012. The influence of authigenic clay formation on the mineralogy and stable isotopic record of lacustrine carbonates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90: 64-82.
- Cai Z X, Li J, Chen H R, et al. 2019. Genesis of Mg-phyllsilicate occurrences in the Middle Permian marine successions of South China [J]. *Applied Clay Science*, 181: 105242.
- Cañaveras J C, Calvo J P, Ordóñez S, et al. 2020. Tectono-sedimentary evolution of the Madrid Basin (Spain) during the Late Miocene: Data from paleokarst profiles in diagenetically-complex continental carbonates[J]. *Geosciences*, 10(11): 433.
- Carrillo I, Atanes-Sánchez E, Fernández-Martínez F. 2024. Structure and morphology of red pigments based on sepiolite[J]. *Dalton Transactions*, 53(15): 6766-6778.
- Cavalcante F, Belviso C, Bentivenga M, et al. 2011. Occurrence of palygorskite and sepiolite in Upper Paleocene–Middle Eocene marine deep sediments of the Lagonegro Basin (southern Apennines—Italy): Paleoenvironmental and provenance inferences[J]. *Sedimentary Geology*, 233(1/2/3/4): 42-52.
- Cavalcante F, Perri F, Belviso C, et al. 2023. Clayey sediments analysis as a useful tool to assessing the geodynamic evolution of fold-and-thrust belts: The case study of the Monte Alpi area (southern Apennines, Italy)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 151: 106204.
- Chahi A, Fritz B, Duplay J, et al. 1997. Textural transition and genetic relationship between precursor stevensite and sepiolite in lacustrine sediments (Jbel Rhassoul, Morocco)[J]. *Clays and Clay Minerals*, 45(3): 378-389.
- Chen Y H, Wen L P, Chen J X, et al. 2022. *In situ* growth of g-C₃N₄ on clay minerals of kaolinite, sepiolite, and talc for enhanced solar photocatalytic energy conversion[J]. *Applied Clay Science*, 216: 106337.
- Clauer N, Fallick A E, Galán E, et al. 2012. Varied crystallization conditions for Neogene sepiolite and associated Mg-clays from Madrid Basin (Spain) traced by oxygen and hydrogen isotope geochemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 94: 181-198.
- Cuadros J, Diaz-Hernandez J L, Sanchez-Navas A, et al. 2016. Chemical and textural controls on the formation of sepiolite, palygorskite and dolomite in volcanic soils[J]. *Geoderma*, 271: 99-114.
- Cuevas J, de La Villa R V, Ramirez S, et al. 2003. Chemistry of Mg smectites in lacustrine sediments from the Vicalvaro sepiolite deposit, Madrid Neogene Basin (Spain)[J]. *Clays and Clay Minerals*, 51(4): 457-472.
- Deocampo D M. 2015. Authigenic clay minerals in lacustrine mudstones[M]//Larsen D, Egenhoff S O, Fishman N S. Paying attention to mudrocks: Priceless! Geological Society of America: 49-64.
- Djoulah B, Hamimed M, Belghar N, et al. 2023. Sepiolite as paleo-CO₂ barometer of dramatic climate change, and a basic element for paleogeographic reconstitution across Cretaceous–Paleogene, As-serdoune boundary, El Kouif region (Algerian–Tunisian border) [J]. *Carbonates and Evaporites*, 38(1): 6.
- Draïdia S, El Ouahabi M, Daoudi L, et al. 2016. Occurrences and genesis of palygorskite/sepiolite and associated minerals in the Barzaman Formation, United Arab Emirates[J]. *Clay Minerals*, 51(5): 763-779.
- Eberl D D, Jones B F, Khoury H N. 1982. Mixed-layer kerolite/stevensite from the amargosa desert, Nevada[J]. *Clays and Clay Minerals*, 30

- (5): 321-326.
- Eze P N, Molwalefhe L N. 2024. Late Quaternary palaeoenvironmental reconstruction of a Chobe Enclave landform (NW Botswana) based on pedological and geochemical indices[J]. *Journal of Sedimentary Environments*, 9(1): 35-45.
- Fashina B, Deng Y J. 2022. Smectite, sepiolite, and palygorskite for inactivation of pyocyanin, a biotoxin produced by drug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 331: 111668.
- Fesharaki O, García-Romero E, Cuevas-González J, et al. 2007. Clay mineral genesis and chemical evolution in the Miocene sediments of Somosaguas, Madrid Basin, Spain[J]. *Clay Minerals*, 42(2): 187-201.
- Galán E, Pozo M. 2011. Palygorskite and sepiolite deposits in continental environments. Description, genetic patterns and sedimentary settings[J]. *Developments in Clay Science*, 3: 125-173.
- García-Romero E, Suárez M, Santarén J, et al. 2007. Crystallochemical characterization of the palygorskite and sepiolite from the Allou Kagne deposit, Senegal[J]. *Clays and Clay Minerals*, 55(6): 606-617.
- Giustetto R, Seenivasan K, Belluso E. 2014. Asbestiform sepiolite coated by aliphatic hydrocarbons from Perleto, Aosta Valley region (western Alps, Italy): Characterization, genesis and possible hazards [J]. *Mineralogical Magazine*, 78(4): 919-940.
- Güven N, Carney L L. 1979. The hydrothermal transformation of sepiolite to stevensite and the effect of added chlorides and hydroxides [J]. *Clays and Clay Minerals*, 27(4): 253-260.
- Herranz J E, Pozo M. 2018. Authigenic Mg-clay minerals formation in lake margin deposits (the Cerro de los Batallones, Madrid Basin, Spain)[J]. *Minerals*, 8(10): 418.
- Herranz J E, Pozo M. 2022. Sepiolite and other authigenic Mg-clay minerals formation in different palustrine environments (Madrid Basin, Spain)[J]. *Minerals*, 12(8): 987.
- Horch R A, Golden T D, D'Souza N A, et al. 2002. Electrodeposition of nickel/montmorillonite layered silicate nanocomposite thin films [J]. *Chemistry of Materials*, 14(8): 3531-3538.
- Hover V C, Walter L M, Peacor D R, et al. 1999. Mg-smectite authigenesis in a marine evaporative environment, Salina ometepc, Baja California[J]. *Clays and Clay Minerals*, 47(3): 252-268.
- Ilic M, Janackovic D, Janackovic B. 2015. Sepiolite from Serbian deposits as an industrial mineral[J]. *Tehnika*, 70(6): 957-963.
- Jiang Q C, Wang W M, Lyu Q. 2023. Characteristics and controlling factors of tight marl reservoirs with an eyelid-shaped structure of the First member of the deep Maokou Formation in eastern Sichuan [J]. *Energies*, 16(5): 2353.
- Kadir S, Eren M, İlkeç T, et al. 2017. An approach to genesis of sepiolite and palygorskite in lacustrine sediments of the Lower Pliocene Sakarya and Porsuk Formations in the Sivrihisar and Yunussemre-Biçer regions (Eskişehir, Turkey)[J]. *Clays and Clay Minerals*, 65 (5): 310-328.
- Kadir S, Erkoyun H, Eren M, et al. 2016. Mineralogy, geochemistry, and genesis of sepiolite and palygorskite in Neogene lacustrine sediments, Eskişehir province, West Central Anatolia, Turkey[J]. *Clays and Clay Minerals*, 64(2): 145-166.
- Kassa A, Benhamida A, Kaci M, et al. 2020. Effects of montmorillonite, sepiolite, and halloysite clays on the morphology and properties of polycaprolactone bionanocomposites[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 28(5): 338-347.
- Keller G. 2001. The end-Cretaceous mass extinction in the marine realm: Year 2000 assessment[J]. *Planetary and Space Science*, 49 (8): 817-830.
- Khoury H N, Eberl D D, Jones B F. 1982. Origin of magnesium clays from the Amargosa Desert, Nevada[J]. *Clays and Clay Minerals*, 30 (5): 327-336.
- Kring D A. 2007. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous – Tertiary boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 255(1/2): 4-21.
- Li P P, Hao F, Zhang B Q, et al. 2015. Heterogeneous distribution of pyrobitumen attributable to oil cracking and its effect on carbonate reservoirs: Feixianguan Formation in the Jiannan gas field, China [J]. *AAPG Bulletin*, 99(4): 763-789.
- Madhavaraju J, Ramasamy S, Ruffell A, et al. 2002. Clay mineralogy of the Late Cretaceous and Early Tertiary successions of the Cauvery Basin (southeastern India): Implications for sediment source and palaeoclimates at the K/T boundary[J]. *Cretaceous Research*, 23(2): 153-163.
- Martín-Pérez A, La Iglesia Á, Almendros G, et al. 2021. Precipitation of kerolite and sepiolite associated with Mg-rich carbonates in a cave environment[J]. *Sedimentary Geology*, 411: 105793.
- Millero F J. 1974. The physical chemistry of seawater[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2: 101-150.
- Mokatse T, Prud'Homme C, Vainer S, et al. 2023. Sepiolite as a multifactorial indicator of paleoenvironments in the Chobe Enclave (northern Botswana)[J]. *Sedimentary Geology*, 454: 106459.
- Mulders J J P A, Harrison A L, Christ J, et al. 2018. Non-stoichiometric dissolution of sepiolite[J]. *Energy Procedia*, 146: 74-80.
- Murray H H, Pozo M, Galán E. 2011. An introduction to palygorskite and sepiolite deposits—location, geology and uses[J]. *Developments in Clay Science*, 3: 85-99.
- Nakasugi F, Shimanaga M, Nomaki H, et al. 2021. Simple harpacticoid composition observed at deep hydrothermal vent sites on sea knoll calderas in the north-west Pacific[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 101(6): 947-956.
- Post J L, Crawford S. 2007. Varied forms of palygorskite and sepiolite from different geologic systems[J]. *Applied Clay Science*, 36(4): 232-244.
- Pozo M, Calvo J P. 2018. An overview of authigenic magnesian clays [J]. *Minerals*, 8(11): 520.
- Pozo M, Carretero M I, Galán E. 2016. Approach to the trace element geochemistry of non-marine sepiolite deposits: Influence of the

- sedimentary environment (Madrid Basin, Spain)[J]. *Applied Clay Science*, 131: 27-43.
- Pozo M, Casas J. 1999. Origin of kerolite and associated Mg clays in palustrine-lacustrine environments. The Esquivias deposit (Neogene Madrid Basin, Spain)[J]. *Clay Minerals*, 34(3): 395-418.
- Rahman A, Kishimoto N, Urabe T. 2015. Adsorption characteristics of clay adsorbents – sepiolite, kaolin and synthetic talc – for removal of Reactive Yellow 138: 1[J]. *Water and Environment Journal*, 29(3): 375-382.
- Rateev M A, Sadchikova T A, Shabrova V P. 2008. Clay minerals in recent sediments of the World Ocean and their relation to types of lithogenesis[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 43(2): 125-135.
- Reijmer J J G, Blok C N, El-Husseiny A, et al. 2022. Petrophysics and sediment variability in a mixed alluvial to lacustrine carbonate system (Miocene, Madrid Basin, Central Spain)[J]. *The Depositional Record*, 8(1): 317-339.
- Sanz-Montero M E, Rodríguez-Aranda J P. 2009. Silicate bioweathering and biomineralization in lacustrine microbialites: Ancient analogues from the Miocene Duero Basin, Spain[J]. *Geological Magazine*, 146(4): 527-539.
- Schultz L G, Shepard A O, Blackmon P D, et al. 1971. Mixed-layer kaolinite: montmorillonite from the Yucatan peninsula, Mexico[J]. *Clays and Clay Minerals*, 19(3): 137-150.
- Shang Z X, E L, Chen Y N, et al. 2024. Sepiolite fiber reinforced TiO₂/SiO₂ composite aerogel based on CTAB “template” effect[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(29): 1894.
- Tateo F, Sabbadini R, Morandi N. 2000. Palygorskite and sepiolite occurrence in Pliocene lake deposits along the River Nile: Evidence of an arid climate[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 31(3/4): 633-645.
- Tosca N J, Macdonald F A, Strauss J V, et al. 2011. Sedimentary talc in Neoproterozoic carbonate successions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 306(1/2): 11-22.
- Tosca N J, Masterson A L. 2014. Chemical controls on incipient Mg-silicate crystallization at 25°C: Implications for early and late diagenesis[J]. *Clay Minerals*, 49(2): 165-194.
- Tutolo B M, Tosca N J. 2018. Experimental examination of the Mg-silicate-carbonate system at ambient temperature: Implications for alkaline chemical sedimentation and lacustrine carbonate formation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 225: 80-101.
- Uddin F. 2008. Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12): 2804-2814.
- Walczyk A, Michalik A, Napruszewska B D, et al. 2020. New insight into the phase transformation of sepiolite upon alkali activation: Impact on composition, structure, texture, and catalytic/sorptive properties[J]. *Applied Clay Science*, 195: 105740.
- Wang L, Cheng J W, Jin Z J, et al. 2023a. High-pressure hydrogen adsorption in clay minerals: Insights on natural hydrogen exploration [J]. *Fuel*, 344: 127919.
- Wang Z H, Ma Z L, Zheng L J, et al. 2023b. Dynamic evolution characteristics of the “source-reservoir” integration of gray marl and its geological significance to unconventional gas: Insights from pyrolysis experiments[J]. *Petroleum Science*, 20(2): 705-720.
- Yalçın H, Bozkaya Ö. 2004. Ultramafic-rock-hosted vein sepiolite occurrences in the Ankara ophiolitic mélange, central Anatolia, Turkey[J]. *Clays and Clay Minerals*, 52(2): 227-239.
- Yeniyol M. 2014. Characterization of two forms of sepiolite and related Mg-rich clay minerals from Yenidoğ an (Sivrihisar, Turkey)[J]. *Clay Minerals*, 49(1): 91-108.
- Zhou H, Zhai H F, Yang Y, et al. 2024. Effective microwave regeneration of natural sepiolite and montmorillonite as adsorbents for tetracycline removal and mechanism insight[J]. *Separation and Purification Technology*, 348: 127767.
- Zhu W X, Zheng X H, Li G M. 2020. Micro-bubbles size, rheological and filtration characteristics of Colloidal Gas Aphron (CGA) drilling fluids for high temperature well: Role of attapulgite[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186: 106683.

Formation Mechanism of Sepiolite and Its Geological Application

ZHANG JieZhi, LI Xi, ZHU GuangYou, GAO HeTing, LI Sheng, ZHENG KaiHang,
CHEN HongZhou, LIU JianYong

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: [Significance] Sepiolite is a clay mineral with a unique fibrous crystal structure; it has a significant potential application in the geological field due to its high adsorptive capacity and thermal stability. [Progress] The genesis types for sepiolite include direct deposition, terrestrial transport sedimentation and diagenetic alteration. Direct deposition is influenced by chemical conditions such as element concentration and pH. Terrestrial transport sedimentation is closely related to the geological environment and climatic conditions. Diagenetic alteration of sepiolite is affected by the burial depth and the properties of the hydrothermal fluids. Sepiolite is generally formed in an alkaline reducing environment rich in Mg and Si, but with a low Al content. During the thermodynamic evolution process, it undergoes mineral phase transitions and is transformed into minerals such as talc or montmorillonite, which imply different depositional and diagenetic evolutionary paths. In terms of geological applications, sepiolite has an excellent adsorptive behavior, and thus it can efficiently enrich organic matter, providing a basis for the formation of hydrocarbon source rocks with significantly enhanced oil- and gas-generating potential and quality. The diagenetic fluids of the sepiolite layer help promote the transformation of high-energy beach limestone at the edge of a depression into a high-quality dolomite reservoir, thereby giving rise to either of two oil and gas accumulation models: self-generation and self-storage, or lower generation and greater storage. In addition, the thickness and distribution of sepiolite strata inverts undulating paleolandforms and is also an effective indicator of oil and gas reservoir regions, thus providing an important basis for oil and gas exploration. In terms of paleoenvironment, the formation process of sepiolite also records a range of information (e.g., evaporation environment, water level changes, climate evolution and anoxic events) that can be used to reveal major geological events in the region. [Conclusions and prospects] Sepiolite has shown significant research value in oil and gas exploration, paleogeomorphic reconstruction and paleoenvironmental restoration. Future development trends of sepiolite will include its use in defining paleoenvironmental conditions, enhancing the analytical ability of seismic data on the thickness of sepiolite strata, and developing the exploration of oil and gas in sepiolite strata.

Key words: sepiolite; geological characteristics; genetic mechanism; sedimentation-diagenesis; geological applications