

浙闽地区叶蜡石矿床成矿规律研究*

叶泽富¹, 叶帆¹, 缪仁谷¹, 吴义¹, 李伟¹, 王磊¹, 刘源², 李奇维², 赵军红²

(1 浙江省第十一地质大队, 浙江 温州 325006; 2 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 叶蜡石矿床是一种重要的非金属矿产, 主要分布于东南沿海地区侏罗纪—白垩纪的中酸性火山岩地层中, 受控于区域大规模断裂和伸展断陷盆地。文章对中国内外叶蜡石矿床的地质和矿产特征进行了综合分析, 总结了浙闽地区叶蜡石矿床特征和成因。浙闽地区叶蜡石矿床的赋矿原岩为流纹质火山碎屑岩和凝灰岩等, 具有高硅高铝的特点。矿床成因类型主要包括火山热液交代型和火山热液充填型。结合泰顺龟湖、青田周村和山口等典型叶蜡石矿床的实例研究, 文章揭示了火山热液交代型叶蜡石矿床普遍发育硅化、叶蜡石化、明矾石化、黄铁矿化的垂直分带特征, 中酸性火山岩组分在热液作用下发生交代、分解, 使铝有规律的富集成矿; 火山热液充填型叶蜡石矿床围岩蚀变分带不明显, 从围岩中淋滤、萃取的硅铝组份沿着构造裂隙运移, 在有利的空间成矿。因此, 笔者认为侏罗纪—白垩纪中酸性火山岩与凝灰岩、区域断裂带和火山岩带、围岩蚀变垂直分带以及陡峭山峰是叶蜡石矿的重要找矿标志。

关键词 地质学; 叶蜡石矿床; 地质特征; 矿床特征; 浙闽地区

中图分类号: P578.958

文献标志码: A

Ore genesis of pyrophyllite deposit in Zhejiang-Fujian area

YE ZeFu¹, YE Fan¹, MIAO RenGu¹, WU Yi¹, LI Wei¹, WANG Lei¹, LIU Yuan², LI QiWei² and ZHAO JunHong²

(1 No. 11 Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou 325006, Zhejiang, China; 2 China University of Geosciences, School of Earth Sciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

The pyrophyllite deposit is an important non-metallic mineral. In China, it is mainly developed in the Jurassic—Cretaceous intermediate-acid volcanic strata along the Southeast coastal area, and the mineralization is controlled by the large-scale regional faults and extensional faulted basins. This study analyzed the geological and deposit features of the pyrophyllite deposits around the world, and summarized their mineralization mechanisms in the Zhejiang-Fujian area. The host rocks of the pyrophyllite deposits consist of rhyolitic volcanoclastic rocks and tuffs, which are characterized by high Si and Al contents. The pyrophyllite deposits can be divided into two types, including the volcanic hydrothermal metasomatic type and the filling type. According to the detailed case studies of the Guihu deposit in Taishun, Zhoucun and Shankou deposits in Qingtian, the volcanic hydrothermal metasomatic pyrophyllite deposits are characterized by vertical alteration zonings of silicification, pyrophyllitization, alunitization and pyritization which were formed by Al enrichment during the hydrothermal metasomatism of intermediate-acid volcanic materials. In comparison, the zoning patterns are absent in the volcanic hydrothermal filling pyrophyllite deposits, which were formed by enrichment and deposition of Si and Al during the hydrothermal fluid transportation along extensional faults. Therefore, the Jurassic-Cretaceous intermediate-acid volcanic rocks

* 本文得到“浙江省叶蜡石矿资源远景调查评价”省资金项目(编号:[省资]2019006)和“浙江省青田县山口矿区外围叶蜡石矿普查”省资金项目(编号:[省资]2019001)联合资助

第一作者简介 叶泽富,男,1973年生,高级工程师,从事地质调查与矿产勘查工作。Email:418808572@qq.com

收稿日期 2021-11-18;改回日期 2022-11-16。孟秋熠编辑。

and tuffs, faults, vertical alteration zonings of the wall-rocks and steep mountain peaks are important indicators for exploring pyrophyllite deposits in southeastern China.

Key words: geology, pyrophyllite deposit, geological feature, deposit feature, Zhejiang-Fujian area

中国东南沿海一带广泛分布明矾石、叶蜡石、萤石、沸石岩、膨润土、高岭土等非金属矿产(杨文宗等, 1985; 麻土华等, 2000; 黄国成等, 2015; 徐志刚等, 2015; 陈正国等, 2019)。其中, 叶蜡石、红宝石、蓝宝石等工艺美术及宝石类非金属矿产具有珍贵的收藏和观赏价值, 因而受到越来越多的关注(徐志刚等, 2015)。

叶蜡石是晶体结构为2:1型的层状铝硅酸盐黏土矿物, 化学式为 $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, 其中 $w(\text{SiO}_2)$ 为66.7%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为28.3%, $w(\text{H}_2\text{O})$ 为5.0%, 常见于低级变质岩和酸性火山岩(Mukhopadhyay et al., 2010)。叶蜡石晶体四面体层的硅可被少量铝置换, 八面体层的铝可被少量镁、铁置换, 可容纳少量铁、钛、钾、钠和钙, 因而自然界少见纯叶蜡石。其矿物结构单位层之间具有较弱的化学键, 发育一组平行于{001}的极完全解理(王濮, 1982)。它的硬度(1~2)和密度(2.65~2.90 g/cm³)较小、熔点高、电传导性低、耐热性良好、水中无膨胀和可塑性、热反射率高、化学惰性, 具有理想的内摩擦性能和良好的传压特性, 常用作陶瓷、防火器材、水泥和电器等重要的矿物材料(姚文君等, 2007; 张少颖等, 2017)。结晶完好的叶蜡石质纯细腻、色泽美观, 常作为雕刻和印章石原料(汪灵, 1994; 陈仁表, 2018)。

叶蜡石矿床在世界上分布广泛, 形成于不同的地质背景(如陆内伸展、大陆边缘、岛弧等), 具有复杂的围岩类型(如钙碱性安山岩-流纹岩、玄武岩等), 发育不同的矿体形态(Zaykov et al., 1988; Sinyakovskaya et al., 2005)。研究表明叶蜡石蚀变主要受控于区域上深大断裂, 与变质或热液蚀变作用有关。不同成因的热液不仅提供了成矿流体, 也是成矿物质的重要来源(叶孔凯, 2019)。叶蜡石矿床通常发育复杂的围岩蚀变分带, 以矿体为中心, 向外逐渐转变为水铝石化、明矾石化、高岭石化和硅化; 矿体形态多变, 主要有脉状、透镜状、似层状、团块状等, 与围岩界线清晰。前人通过大量区域地质调查和矿化特征分析, 发现热液成因叶蜡石矿床的时空分布与多金属矿床紧密相关, 主要位于泥质岩盖底部, 形成于斑岩成矿体系中晚期, 经历了早期岩浆出溶且快速上升的挥发分与围岩的反应; 或产于高硫型浅成低温热液矿床的外围蚀变带中, 形成于岩浆

演化晚期热液流体与围岩的相互作用(汪灵, 1994; 1997; Corbett et al., 1998; Seedorff et al., 2005; Zhang et al., 2020)。作为流体演化的重要标型矿物和深部多金属矿化的伴生矿物, 叶蜡石及其矿床的成因对理解成矿流体属性、金属成矿作用和动力学机制, 以及评估深部金属成矿潜力具有重要意义(Evans et al., 1988; Brown et al., 2006; Will et al., 2016; 张少颖等, 2017)。

中国学者经过几十年的研究, 在国内相继发现了一系列叶蜡石矿床, 已探明储量和预测资源量均居世界前列(汪灵, 1994; 洪军新等, 2005; 王亮, 2018; 艾娟等, 2019; 文旭东, 2019; 寇贵存, 2021)。尽管如此, 叶蜡石矿因其广泛的用途仍属于相对短缺的矿产资源(叶孔凯, 2019)。中国叶蜡石矿床主要分布在浙东和闽东等东南沿海一带, 处于环太平洋成矿带, 是构造-岩浆-火山活动的产物(汪灵等, 1996)。浙闽地区叶蜡石矿床矿石矿物共生组合复杂, 矿石类型多样、质量优良, 具有巨大的经济价值。随着叶蜡石矿产资源开发和找矿技术的不断提升, 系统的矿床分类和成矿理论研究对叶蜡石矿产勘查和矿床开采具有重要的指导意义。本文聚焦浙闽地区叶蜡石矿床, 综合分析它们的矿床分布特点、矿床地质和围岩蚀变特征, 在典型矿床实例分析基础上, 总结叶蜡石矿床的成因和成矿规律, 为今后的找矿勘探工作提供重要信息。

1 叶蜡石矿床类型与分布

1.1 国外叶蜡石矿床

国际上根据叶蜡石形成的大地构造环境和成矿地质作用将叶蜡石矿床分为5种类型(Zaykov et al., 1988; Sinyakovskaya et al., 2005)。类型I赋存于大陆火山带的交代岩石中, 主要发育在古裂谷和活动大陆边缘, 在欧洲东部、美洲、澳洲、亚洲中部和东部广泛分布(Mihalik, 1976; Cornish et al., 1981; Fujii, 1983; Neal, 1983; Pimenta, 1988; Ray et al., 2003; Sinyakovskaya et al., 2005; Son et al., 2014), 如加拿大纽芬兰地区叶蜡石矿床形成于绿片岩相变质的流纹岩和火山碎屑岩的热液蚀变作用(Bryndzia, 1988); 澳大利亚东部造山带叶蜡石矿床的形成与晚泥盆纪火

山岩的喷发有关(Cornish et al., 1981),其东南部新南威尔士州部分火山岩中的叶蜡石矿床形成于安山质熔岩的蚀变作用(Ray et al., 2003)。

类型Ⅱ赋存于岛弧和边缘海的交代岩石中,主要分布在欧洲和亚洲东部(Udachin, 1991; Ray et al., 2003; Shikazono, 2003; Sinyakovskaya et al., 2005),如乌拉尔地区Kul-Urt-Tau叶蜡石矿床形成于晚古生代动力变质作用中流纹英安岩在300~420℃条件下的叶蜡石化作用(Zaykov et al., 1994);日本Ashio漏斗状叶蜡石矿床形成于石英斑岩的叶蜡石化作用(Shikazono, 2003; Sinyakovskaya et al., 2005)。

类型Ⅲ赋存于陆源变泥质岩地层中,主要分布于欧洲中部和西南部、南美洲及亚洲西部(Zalba, 1979; Sinyakovskaya et al., 2005; Oner et al., 2013; Will et al., 2016),如土耳其Pötürge地区的叶蜡石矿床多沿断层呈透镜体分布,形成于蓝晶石的高温退变质作用(Oner et al., 2013)。

类型Ⅳ在热液成因的石英脉中较为发育,在欧洲东部和西南部、南美洲及亚洲南部呈零星分布(Phin'ko, 1984; Cassedanne, 1989; Lopez et al., 1993; Sinyakovskaya et al., 2005; Das et al., 2012),如印度Madrangjodi地区的叶蜡石矿床形成于花岗岩的热液蚀变作用(Das et al., 2012)。

类型Ⅴ为风化壳中的叶蜡石矿床(Bryndzia, 1988; Sinyakovskaya et al., 2005),仅在北美洲、欧洲东部和西南部呈零星分布(Kazarinova, 1972; Sanchez-Camazano et al., 1988; Zaykov et al., 1994; Ray et al., 2003)。

1.2 中国叶蜡石矿床

中国东部是环太平洋成矿带的重要组成部分,是世界上少数盛产叶蜡石的地区之一(汪灵等, 1996)。中国叶蜡石矿产资源丰富,矿区数量多达78个,查明资源储量和资源量(表1)分别为10001万t和7048万t,储量为1123万t。大部分叶蜡石矿床分布在浙东-闽东-粤东一带(宋祥铨等, 1988),少量分布在华北和西北地区(如山西、甘肃、内蒙古等)。按照国际叶蜡石矿床的分类方案,中国叶蜡石矿床大多属于第一类(Sinyakovskaya et al., 2005)。中国学者根据矿床成因将叶蜡石矿床分为变质型和火山热液型,其中,变质型根据变质作用方式分为区域变质型、埋藏变质型和动力变质型;火山热液型根据成矿方式分为火山热液交代型和火山热液充填型(宋祥铨等, 1988)。

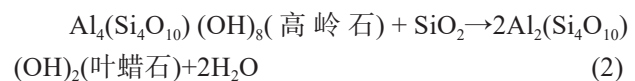
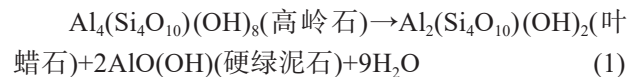
表1 中国叶蜡石储量统计表

Table 1 Statistical table of pyrophyllite reserves in China

地区	矿区数	储量/万t	资源量/万t	查明资源储量/万t
浙江	33	609.30	3989.70	4885.76
福建	30	277.86	1105.41	2868.09
江西	5	38.00	1242.69	1242.69
新疆	3	35.80	219.39	259.19
北京	1	131.10	177.04	292.46
内蒙古	1	/	184.10	281.03
黑龙江	1	19.90	48.70	72.68
安徽	1	11.20	/	17.30
广东	1	/	40.50	40.50
广西	1	/	31.70	31.70
甘肃	1	/	9.70	9.70
合计(中国)	78	1123.16	7048.93	10001.10

注:资料来源于舒降(2021)和2020年中国矿产资源储量统计表,不包括港澳台数据;“/”为未统计数据。

变质型叶蜡石矿床在中国分布比较有限,其中动力变质型叶蜡石矿床形成于中酸性火山碎屑岩和火山沉积岩的局部应力作用,具有鳞片变晶结构,片状和片理状构造。区域变质型叶蜡石矿床形成于区域构造运动中富铝岩石或中酸性火山岩不同程度的变质作用,具有显微鳞片变晶结构,片状和片麻状构造,典型代表为浙江省常山芳村叶蜡石矿床,赋存于前震旦纪上墅组次生石英岩中,与千枚岩化区域变质作用紧密相关。埋藏变质型叶蜡石矿床是在上覆岩石压力和地热梯度影响下,埋藏于地下的硅铝质粘土或沉积物经过大规模的重结晶作用而形成,具有土状、鳞片状结构,块状、薄层状、页片状构造,常伴生水铝石、地开石、伊利石等矿物,围岩轻微硅化但无明显蚀变分带(反应式(1)和(2)),主要分布于北京门头沟杨坡元-赵家台、江苏丹徒十里长山等地区(何英才, 1986)。与矿化相关的反应式为:



火山热液型是中国叶蜡石矿床的主要类型,大部分位于福建和浙江一带,是本文的重点研究和讨论对象。福建地区火山热液交代型叶蜡石矿床以福州峨眉矿床为代表,矿床规模较大,形成于火山碎屑岩的交代和蚀变作用。矿床以叶蜡石矿体为中心,常发育横向和纵向的蚀变分带,表现为叶蜡

石矿体—叶蜡石化—水铝石化、明矾石化—高岭土化、硅化(叶孔凯,2019)。在浙江地区,叶蜡石矿床大多为火山热液交代型,主要分布于浙东南(图1),如泰顺龟湖、青田山口、青田周村等矿床,呈北东向-南西向带状分布,赋存于晚侏罗世西山头组、九里坪组和高坞组的火山岩中;少数矿床呈点状分布于浙西南(如龙泉兰头),赋存于晚侏罗世大爽组,是火山热液蚀变的产物。此外,甘肃南金山叶

蜡石矿床也属于火山热液交代型,其叶蜡石化发生于流纹质凝灰岩、含砾凝灰砂岩的破碎带中,热液交代作用使酸性长英质矿物转变为叶蜡石(王亮,2018)。热液充填型叶蜡石矿床在浙闽地区分布相对较少,以福州寿山矿床为代表,高铝的岩浆热液上升并充填火山喷发带内的区域构造断裂带、挤压破碎带和火山机构形成的容矿空间而成矿(叶孔凯,2019)。

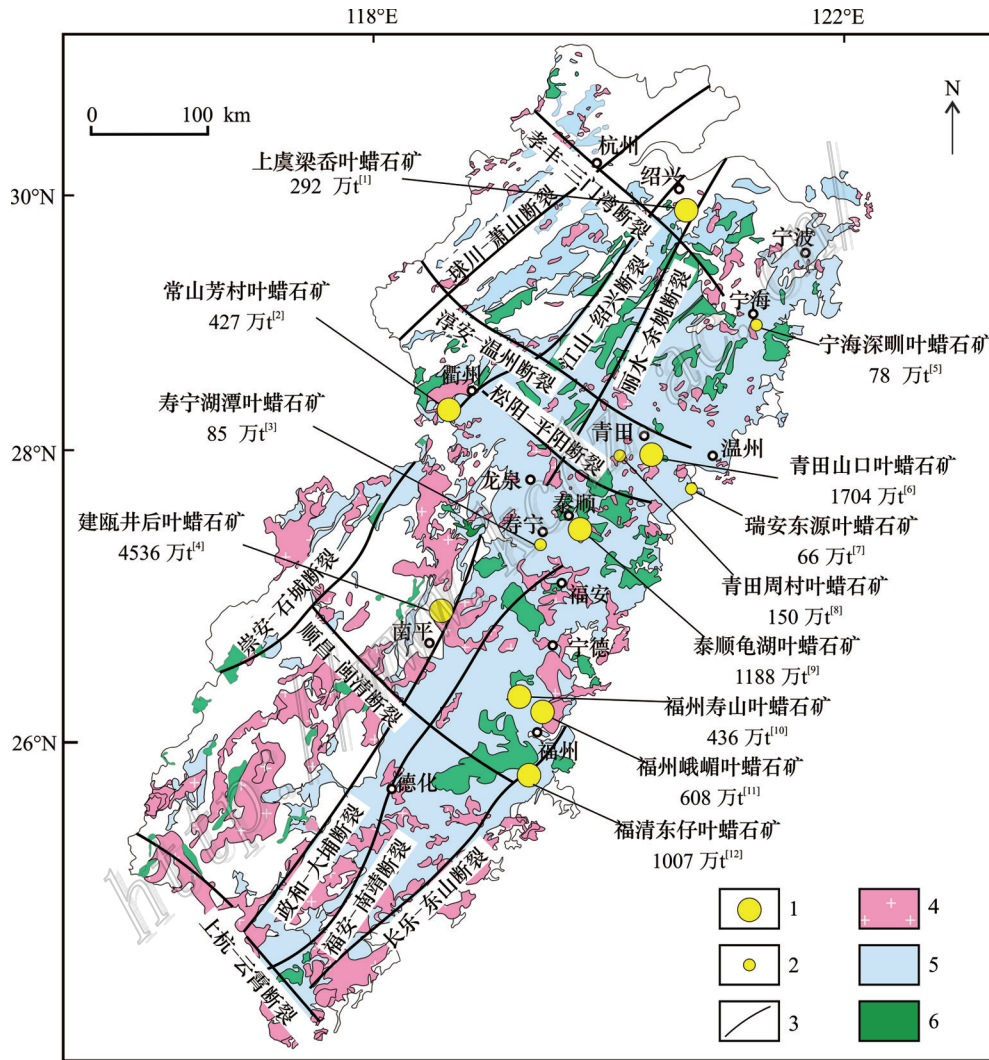


图1 浙闽地区叶蜡石矿分布图(据李迎春,1988;罗炎水等,1999;吴资龙,2003;叶孔凯,2019修改)

1—大型叶蜡石矿床;2—中型叶蜡石矿床;3—断裂带;4—中生代岩浆岩;5—侏罗纪;6—白垩纪

数据来源:[1]—吴亚平,1994;[2]—裘建国,2011a;[3]—余泽新,1991;[4]—卢林,2018;[5]—裘建国,2011b;[6]—陈朝永,1988;[7]—温积远,2005;[8]—叶泽富,2006;[9]—苏三俊,2007;[10]—陈亨亮,1990;[11]—宋祥铨,1975;[12]—陈维华,1988

Fig. 1 Distribution of the pyrophyllite deposits in Zhejiang and Fujian provinces (modified after Li, 1988; Luo et al., 1999; Wu, 2003; Ye, 2019)

1—Large pyrophyllite deposits; 2—Medium-sized pyrophyllite deposits; 3—Faults; 4—Mesozoic magmatic rocks; 5—Jurassic; 6—Cretaceous
Date from: [1]—Wu, 1994; [2]—Qiu, 2011a; [3]—Yu, 1991; [4]—Lu, 2018; [5]—Qiu, 2011b; [6]—Chen, 1988; [7]—Wen, 2005; [8]—Ye, 2006; [9]—Su, 2007; [10]—Chen, 1990; [11]—Song, 1975; [12]—Chen, 1988

2 浙闽地区叶蜡石矿床成矿地质背景

2.1 浙闽地区叶蜡石矿床的控矿构造

浙闽地区是中国叶蜡石矿产资源重要储地,其中,浙江有33个叶蜡石矿区,查明资源储量4885万t,占全国49%;福建有30个叶蜡石矿区,查明资源储量2868万t,占全国29%(表1)。据中国矿产地志(浙江卷)相关资料,浙江省叶蜡石资源丰富,截止到2018年底,发现叶蜡石矿产地45处,已探明资源储量25处,其中超大型2处,大中型12处,主要分布在丽水-温州地区,占浙江省叶蜡石探明资源储量的80%以上。据福州市勘测院相关资料,福建省大中型叶蜡石矿床有5处,主要位于晋安、福清、罗源等地,远景储量达5000万t,占福建省叶蜡石探明资源储量的90%以上。

浙闽沿海地区属环太平洋火山岩带,处于欧亚板块和太平洋板块的交汇处,发育新元古代—古生代和中生代2期裂谷。白垩纪时期,区域上形成了若干规模较大的NE向条带状断陷盆地。区内以NE向、NEE向、NW向断裂为主,形成于晚侏罗世太平洋-菲律宾海板块的俯冲作用。自北向南主要有孝丰-三门湾断裂、江山-绍兴断裂、松阳-平阳断裂、顺昌-闽清断裂、政和-大埔断裂、上杭-云霄断裂等(图1)。叶蜡石矿床呈北东向带状分布,整体受控于同方向断裂带。这些大型断裂带的发育为成矿流体的运移提供了合适的通道。如上虞梁岙叶蜡石矿床位于丽水-余姚断裂带,建瓯井后叶蜡石矿床位于政和-大埔断裂带,福清东仔叶蜡石矿床位于长乐-东山断裂带(图1)。此外,大部分叶蜡石矿区发育破火山构造。如福州峨嵋和寿山叶蜡石矿床的形成与破火山构造密切相关,其破碎带为叶蜡石成矿提供了充足的容矿空间(李迎春,1987;高天钧,1997)。

2.2 浙闽地区叶蜡石矿床赋矿岩浆岩

浙闽地区以江山-绍兴和政和-大埔两条北北东向断裂为界,分为浙江的华南地层区和福建的东南沿海地层区(图1),广泛发育中生代火山沉积岩(图2)。浙闽地区中生代火山活动具有多阶段、多旋回的特点,经历了晚三叠世—早侏罗世、晚侏罗世以及白垩纪3个期和7个沉积-喷发旋回,构成了浙闽火山岩带的主体。江山-绍兴断裂带东南侧发育与大陆边缘环境相关的晚中生代岩浆作用(始于约180

Ma),广泛出露火山岩、火山碎屑岩和次火山岩(徐夕生等,2005;潘振杰等,2017;廖圣兵等,2019)。燕山期酸性岩和基性岩多以小岩株形式产出(廖圣兵等,2019)。中酸性岩富硅、铝、钾,属于高钾钙碱性系列。基性火山岩零星出露,富镁、钛、钙、铁,属中钾-高钾钙碱性系列(周建等,2012)。政和-大埔断裂带以东,晚侏罗世火山活动强烈且持续时间较长,岩性以英安岩、流纹岩和凝灰岩为主,岩石呈面状分布,发育两个岩浆演化旋回。白垩纪岩浆作用规模较晚侏罗世小,岩性以流纹岩、凝灰熔岩、凝灰岩、粗面岩为主,具有明显的双峰式特征,主体受北西向和北东向区域断裂控制。

叶蜡石矿床赋存于晚侏罗世—早白垩世火山岩中。浙东南地区叶蜡石矿赋存于晚侏罗世高坞组、西山头组、九里坪组火山岩,主要岩石类型为流纹质火山碎屑岩、晶屑玻屑凝灰岩、角砾凝灰岩、熔结凝灰岩等,如泰顺龟湖、青田山口和青田周村矿床。浙西南地区叶蜡石矿赋存于晚侏罗世大爽组次火山岩,岩石类型包括霏细岩和花岗斑岩,如龙泉兰头叶蜡石矿床。闽东地区叶蜡石矿赋存于晚侏罗世坂头组、长林组,晚侏罗世—早白垩世南园组和早白垩世小溪组、黄坑组等,主要岩石类型为流纹质火山碎屑岩、熔结凝灰岩和凝灰熔岩等,如建瓯井后、福安上后等矿床。锆石U-Pb定年表明,大爽组、高坞组、西山头组、九里坪组火山岩形成于155~120 Ma(Liu et al., 2012; Li et al., 2014; 王加恩等, 2015; 廖圣兵等, 2019)。

赋矿岩石主要为流纹质火山岩,含大量玻屑(>50%)和晶屑(石英、斜长石、钾长石,<25%),以及少量岩屑和火山灰。岩石具有变余凝灰结构或鳞片变晶结构,块状构造,呈团块状或透镜状产出(高原等,2016;徐艳晓等,2021)。它们有高的 $w(\text{SiO}_2)$ (70.9%~81.6%)、 $w(\text{K}_2\text{O})$ (3.1%~7.6%)、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (11.5%~17.0%),低的 $w(\text{TiO}_2)$ (0.1%~0.7%)和 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (<2.3%),以及较高的铝饱和指数(ASI=0.95~1.99),属于高钾钙碱性和过铝流纹质系列(图3a~d;附表1;乐振卿等,1990;罗炎水等,1999;卢林,2018;廖圣兵等,2019)。这些岩石具有右倾的稀土模式,富集轻稀土元素和大离子亲石元素(如Rh、Th、U等),亏损高场强元素(如Nb、Ta、Ti),类似于大陆弧花岗岩(图4a~b)。大部分样品具有明显的Sr和Eu负异常,指示成岩过程中斜长石的分离结晶。

地层分区		浙江华南地层分区	福建东南沿海分区			
层序						
新生界 Kz	第四系 Q	全新统 Qh	大古塘组、钟家垅组: 粉砂质泥、泥炭 皇天畷、河姆渡组: 粉砂质泥、黏土、泥炭	冲洪积: 黏土、砂质黏土、砂、砂砾卵石; 海积: 砂、砂卵石、泥炭		
		更新统 Qp	宁波组、东浦组: 粉砂质泥、砂			
			前港组: 粉砂质泥、黏土	冲洪积: 砂砾卵石、粘质沙土、砂质黏土; 海积: 石英砂、细砂、黏土		
		新近系 N	上新统N2	嵊县群: 橄欖玄武岩, 夹砂砾、黏土、硅藻土、褐煤	佛昙群: 玄武岩, 上部及下部为砂砾岩、砂页岩夹油页岩、褐煤	
	中新统N1					
	古近系 E	始新统—渐新统E2-3	长河群: 泥岩、砂岩, 夹灰岩、白云岩、石膏及玄武岩			
		古新统E1				
	中生界 Mz	白垩系 K	上统K2	赖家组: 砂岩、泥岩夹火山碎屑岩	石牛山组: 下部为紫红色凝灰质砂砾岩、砂岩、粉砂岩, 上部为熔结凝灰岩夹流纹岩, 顶部为粒状碎斑熔岩	
			下统K1	塘上组: 以酸性火山岩为组, 夹砂岩、砂砾岩		
				方岩组: 砾岩、砂岩		
朝川组: 砂岩、砂砾岩、中酸性火山岩			石帽山群: 凝灰质砂砾岩、砂页岩、粉砂岩夹凝灰岩, 玄武岩、英安岩、流纹岩、局部为石英粗面岩, 组成2-3个沉积-喷发旋回			
侏罗系 J		上统 J3	磨山石群上亚群	祝村组: 中酸、中性火山岩夹基性火山岩	坂头组: 火山碎屑沉积岩、酸性火山碎屑夹熔岩	
			九里坪组: 酸性熔岩, 偶夹中性火山岩			
			茶湾组: 砂岩、泥岩、中基性火山岩			
			西山头组: 中、酸性火山碎屑岩夹沉积岩			
		磨山石群下亚群	高坞组: 中酸性、酸性火山碎屑岩夹沉积岩	南园组: 酸、中酸性熔岩、火山碎屑岩、粒状碎斑熔岩夹凝灰质砂砾岩、粉砂岩及硅质岩		
			大爽组: 砂岩、中酸性火山岩	长林组: 凝灰质砂砾岩、砂岩、粉砂岩夹凝灰岩、页岩、硅质岩和少量凝灰熔岩、流纹岩		
中统J2	毛弄组: 含砾砂岩、砂岩、页岩夹煤层, 下部为中酸性火山岩	漳平组: 以紫红色为主的杂色粉砂岩、细砂岩夹长石石英砂岩、含砾砂岩, 局部夹凝灰岩				
下统J1	枫坪组: 含砾石英砂岩夹粉砂岩、泥岩及薄煤层	梨山组: 石英粗砂岩、砂砾岩、细砂岩及粉砂岩、泥岩夹煤线, 局部夹中酸性火山岩				
三叠系 T	上统T3	乌灶组: 砾岩、砂岩夹炭质页岩、薄煤层	焦坑组: 复成分砾岩、角砾岩、中粗粒石英砂岩、粉砂岩夹泥岩, 煤层及中性火山岩			
	中统T2	?	大坑组: 灰黑色细砂岩、粉砂岩、泥岩夹煤层			
	下统T1		安仁组: 灰、灰绿色钙质砂岩、粉砂岩、紫红色泥质砂岩、粉砂岩夹长石石英岩 溪尾组: 以紫红色为主的杂色粉砂岩、泥岩、钙质粉砂岩夹含长石云母细砂岩 溪口组: 钙泥质粉砂岩、泥岩夹厚层细砂岩、泥灰岩, 下部局部为条带状角岩、角石化硅泥岩			

图2 浙闽地区中生界—新生界地层对比图(据马丽芳, 2002 修改)

波浪线代表角度不整合,虚线代表平行不整合

Fig. 2 Stratigraphic correlation in the Zhejiang-Fujian area (modified from Ma, 2002)

The wavy line represents the angular unconformity, and the dashed line represents the parallel unconformity

2.3 浙闽地区叶蜡石矿床地质和地球化学特征

浙闽地区叶蜡石矿床主要为火山热液型,交代型和充填型矿石同时发育。火山热液型叶蜡石成

矿取决于地层岩性、火山构造和成矿物质来源。成矿原岩一般为富铝胶结较差的砂岩和火山碎屑岩(李迎春, 1987;叶孔凯, 2019), 渗水性好, 利于热液

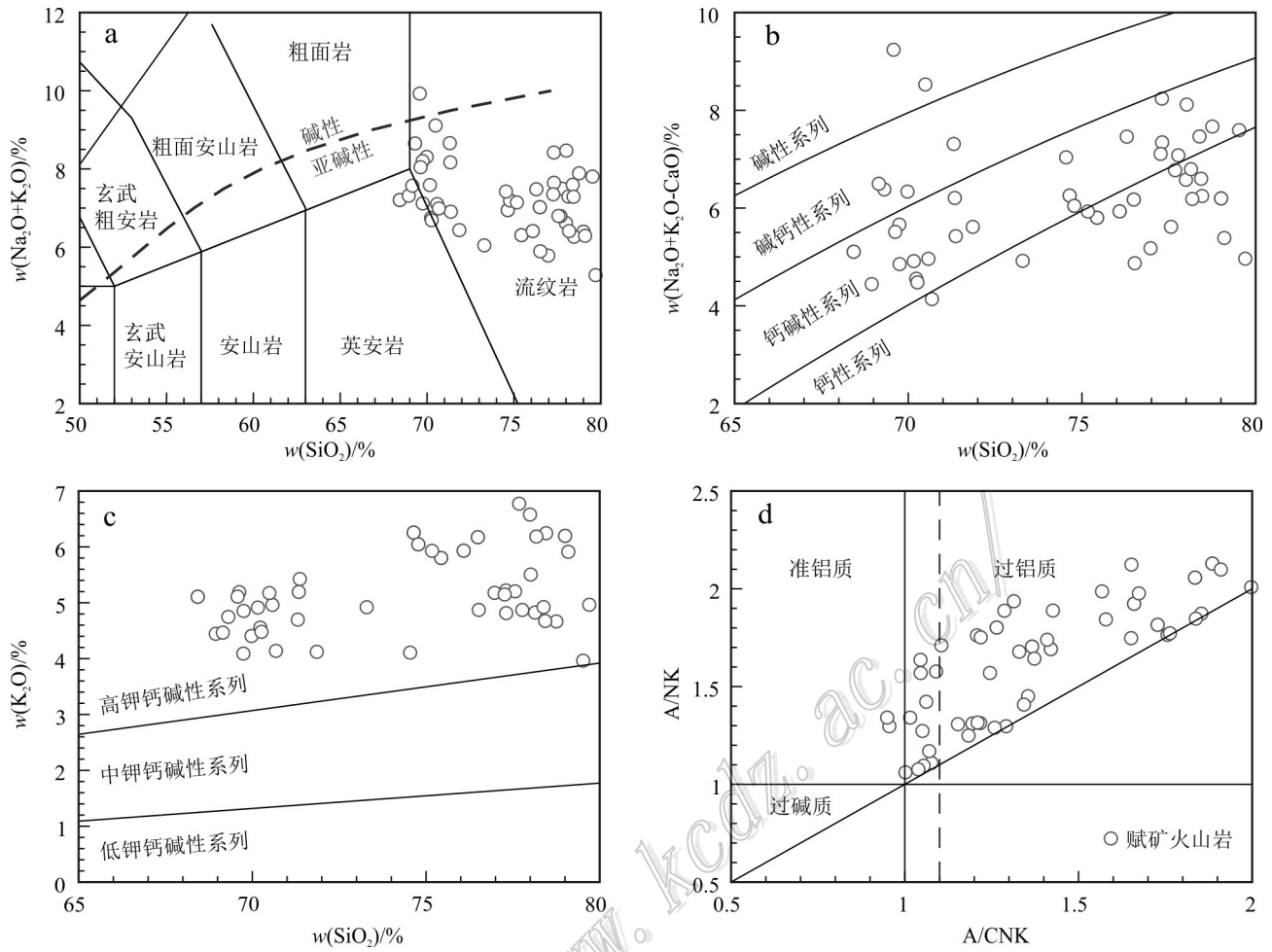


图3 浙闽地区赋叶蜡石火山岩的主量元素图(a~d)

数据来源:乐振卿等,1990;罗炎水等,1999;卢清地,2008;卢林,2018;唐增才等,2018;廖圣兵等,2019

Fig. 3 Plots of major elements for the host volcanic rocks in the Zhejiang-Fujian area (a~d)

Data from: Le et al., 1990; Luo et al., 1999; Lu, 2008; Lu, 2018; Tang et al., 2018; Liao et al., 2019

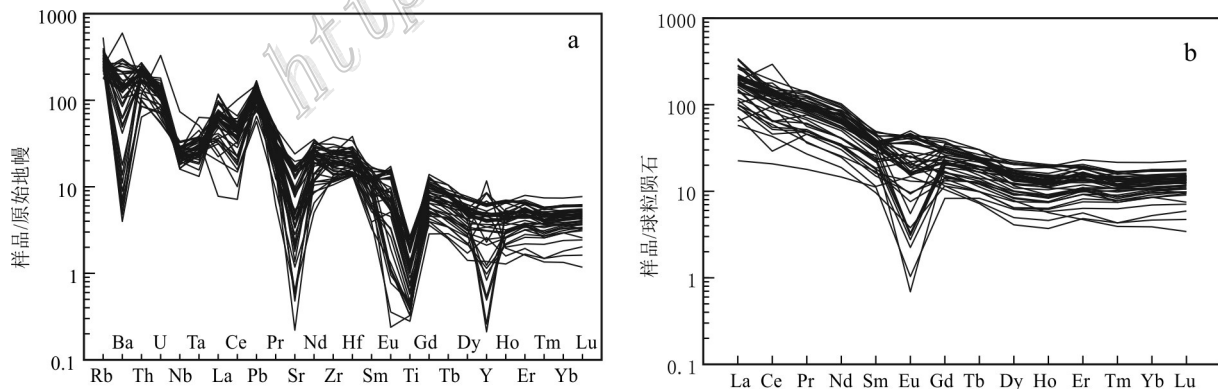


图4 浙闽地区赋叶蜡石火山岩的稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

数据来源:卢清地,2008;唐增才等,2018;廖圣兵等,2019

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) for the host volcanic rocks in the Zhejiang-Fujian area

Data from: Lu, 2008; Tang et al., 2018; Liao et al., 2019

交代。火山构造控制成矿位置、矿体形态和产状。一般环状、放射状断裂多为充填型雕刻用叶蜡石矿体的控矿构造,火山热液对围岩的交代作用在构造带附近较为发育,常形成层状、似层状、不规则团块状和葡萄状叶蜡石矿体(图5a、b)。热液交代形成的矿体通常规模较大、品质较差,发育明显的围岩蚀变。相比而言,充填型叶蜡石矿床的热液来自富铝岩浆热液,直接充填区域构造形成的容矿空间(叶孔凯, 2019)。这类矿体一般呈条带状、夹板状和透镜状(图

5c、d),充填形成的矿石品质较好,质地更加细腻(图5e、f),围岩较致密,与矿体界线清晰。

浙闽地区叶蜡石矿石化学成分变化较大,见附表(表2、表3), $w(\text{SiO}_2)$ 和 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 分别为55%~86%和10%~42%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 较低(<1%)。在稀土元素配分图中,叶蜡石含量高的矿石稀土元素总量和重稀土元素含量较高(图6a)。而在微量元素蛛网图中,它们整体表现出富集轻稀土元素(如La、Ce、Pr)和大离子亲石元素(如Th、U、Pb)的特征(图6b)。叶蜡石

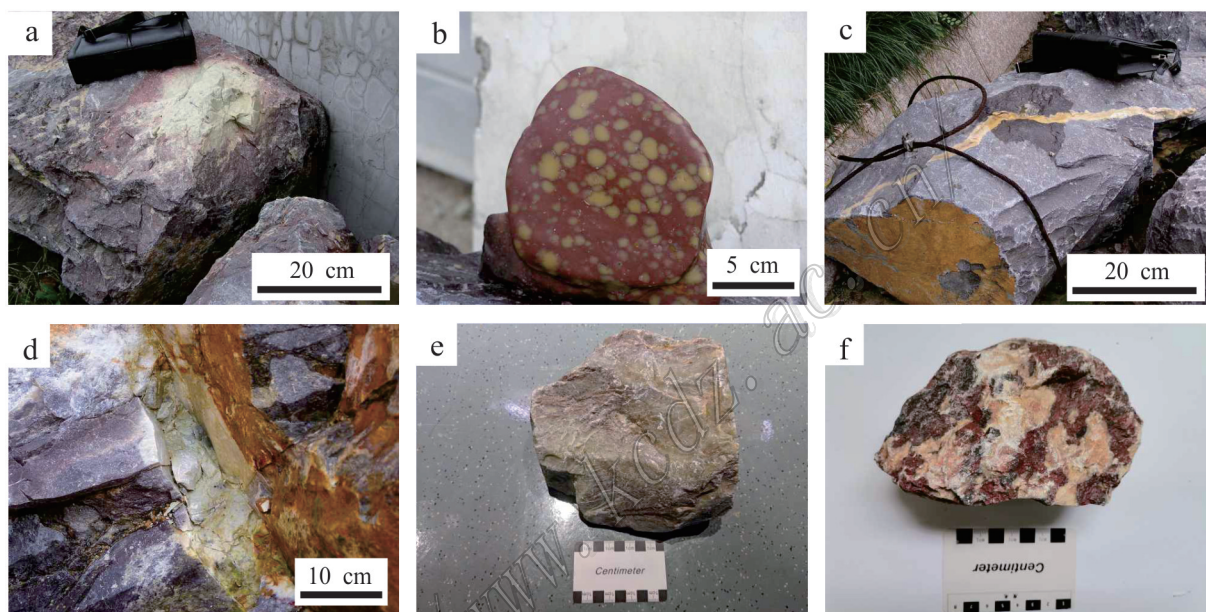


图5 不同类型叶蜡石矿石的构造特征

a. 不规则团块状叶蜡石; b. 葡萄状叶蜡石; c. 条带状叶蜡石; d. 透镜体状叶蜡石; e. 交代叶蜡石矿石; f. 充填叶蜡石矿石

Fig. 5 Structures of different types of pyrophyllite ores

a. Irregular massive pyrophyllite; b. Botryoid pyrophyllite; c. Banded pyrophyllite; d. Lenticular pyrophyllite; e. Metasomatic pyrophyllite ore; f. Filling pyrophyllite ore

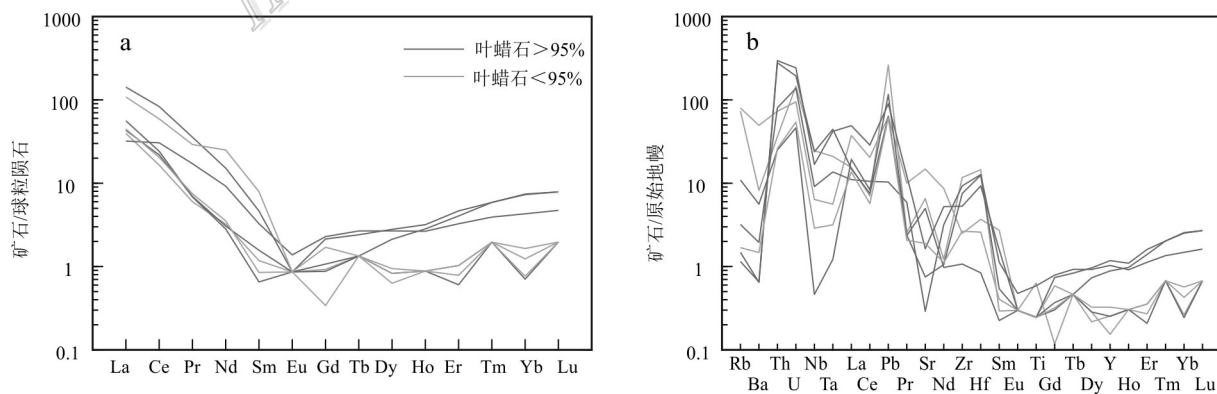


图6 浙闽地区叶蜡石矿石的稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(数据来自沈崇辉等, 2020)

Fig. 6 REE patterns and spider diagrams of pyrophyllite ores from the Zhejiang-Fujian area (data from Shen et al., 2020)

矿物成分富硅($w(\text{SiO}_2)=65\%\sim 75\%$)、铝($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=23\%\sim 35\%$)而贫铁($w(\text{Fe}_2\text{O}_3)<1\%$)(附表2)。

根据叶蜡石的化学组成,浙闽地区叶蜡石矿石分为硅铝质叶蜡石、水铝质叶蜡石、碱铝质叶蜡石3大类。其中,硅铝质叶蜡石贫水($w(\text{H}_2\text{O})\leq 5\%$)、贫铝($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=12\%\sim 30\%$)、富硅($w(\text{SiO}_2)\geq 65\%$),主要矿物组成为叶蜡石和石英。根据叶蜡石和石英的相对含量将硅铝质叶蜡石进一步分为叶蜡石质叶蜡石($w(\text{SiO}_2)$ 约65%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为23%~30%),含石英质叶蜡石($w(\text{SiO}_2)$ 约70%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为18%~23%)和石英质叶蜡石($w(\text{SiO}_2)$ 约80%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为12%~18%)。水铝质叶蜡石富水富铝($w(\text{Al}_2\text{O}_3)>30\%$),根据其矿物组合进一步分为硬水铝石质叶蜡石、地开石质叶蜡石和高岭石质叶蜡石。碱铝质叶蜡石以富碱富铝为特征($w(\text{Al}_2\text{O}_3)>30\%$, $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})\geq 1.2\%$),根据其矿石矿物组合进一步分为绢云母质叶蜡石、明矾石质叶蜡石、绿泥石质叶蜡石。热液蚀变交代成矿作用可形成上述各种叶蜡石矿石,普遍发育交代残余结构;而热液充填成矿作用一般仅形成叶蜡石质叶蜡石、地开石质叶蜡石和绢云母质叶蜡石,通常为隐晶-微晶结构(表2)。

3 浙闽地区叶蜡石矿床实例分析及成矿规律研究

3.1 典型矿床实例分析

本文以泰顺龟湖、青田周村和青田山口的叶蜡

石矿床为例,总结了浙闽地区火山热液型叶蜡石矿床的地质特征。这3个矿床主要出露侏罗纪—白垩纪西山头组和九里坪组,普遍发育NW向-NE向断裂构造和小规模中酸性岩浆岩。断裂带长度变化较大,在青田山口矿区长达24 km,而在泰顺龟湖矿区最短仅260 m。断裂带倾角变化较大,在泰顺龟湖和青田周村矿区接近垂直,而在青田山口矿区较为平缓。断裂破碎带宽窄不一(1~15 m),发育碎裂岩化和角岩化。矿区围岩蚀变明显,具有相似的蚀变分带特征。从上到下分别为石英带、叶蜡石-石英带、绢云母-石英带、黄铁矿-石英带(图7)。叶蜡石矿体主要赋存于西山头组陆源碎屑岩和火山碎屑岩中,呈似层状或透镜状。矿体走向主要呈北西和南东向,长52~602 m,宽3.16~160.00 m。矿石的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (15.93%~21.21%)、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (0.34%~1.88%)、 $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (0.20%~4.48%)等变化较大,矿石类型主要为含石英质叶蜡石,含少量叶蜡石-石英型、叶蜡石型、含高铝矿物叶蜡石型、绢云母叶蜡石型、含铁质叶蜡石型以及地开石叶蜡石型等。矿石通常具有变余凝灰结构和变晶结构,条带状、流纹状及块状构造(陈朝永,1988;叶泽富,2006;苏三俊,2007)。

这些叶蜡石矿床形成于火山热液作用,矿体受地层岩性控制。围岩蚀变以中低温热液蚀变为主,包括黄铁矿化、叶蜡石化、绢云母化、高岭石化、硅化等(李广有,2005;高原等,2016),反映成矿温度

表2 浙闽地区叶蜡石矿石类型及矿物组合

Table 2 Ore types and mineral assemblages of the pyrophyllite deposits in the Zhejiang-Fujian area

大类	亚类	主要矿物	次要矿物	矿床成因	主要产地
硅铝质 叶蜡石	叶蜡石质叶蜡石	Prl	Qz±Dsp±Co±Kao±Se±Chl±Mm	热液交代 热液充填	青田山口、泰顺龟湖、 上虞梁岙、福州峨嵋、 福州寿山、闽清白中
	含石英质叶蜡石	Prl±Qz	Qz±Kao±Se±Mm±Dic	热液交代	
	石英质叶蜡石	Prl+Qz	Qz±Kao±Se±Dic±Mm	热液交代	
水铝质 叶蜡石	硬水铝质叶蜡石	Prl±Dsp	Dsp±Co±And±Kao±Dic±Boe±Qz	热液交代	
	地开石质叶蜡石	Prl±Dic	Dic±Kao±Boe±Se±Qz	热液交代 热液充填	青田山口、泰顺龟湖、 福州寿山、上虞梁岙
	高岭石质叶蜡石	Prl±Kao	Kao±Dic±Boe±Se±Chl±Qz±Dsp±Mm	热液交代	
碱铝质 叶蜡石	绢云母质叶蜡石	Prl+Se	Se±Qz±Alu±Kao±Dic±Mm±Chl	热液交代 热液充填	
	明矾石质叶蜡石	Prl±Alu	Alu±Qz±Se±Kao±Dic	热液交代	宁海深甌、福州峨嵋、 福清东仔、上虞梁岙
	绿泥石质叶蜡石	Prl±Chl	Chl±Kao±Dic±Se±Qz±Mm	热液交代	

注: Prl—叶蜡石; Qz—石英; Dsp—硬水铝石; Co—刚玉; And—红柱石; Dic—地开石; Kao—高岭石; Se—绢云母; Boe—勃姆石; Chl—绿泥石; Alu—明矾石; Mm—蒙脱石; 数据来源: 何英才, 1986; 李迎春, 1987; 1988; 乐振卿等, 1990; 汪灵, 1994; 1997; 陈延芳, 2013; 梁鹏, 2015; 高原等, 2016; 卢林, 2018; 林子华, 2018; 杨晓燕, 2018; 刘秋平等, 2020; 沈崇辉等, 2020; 徐艳晓等, 2021; 叶孔凯, 2021。

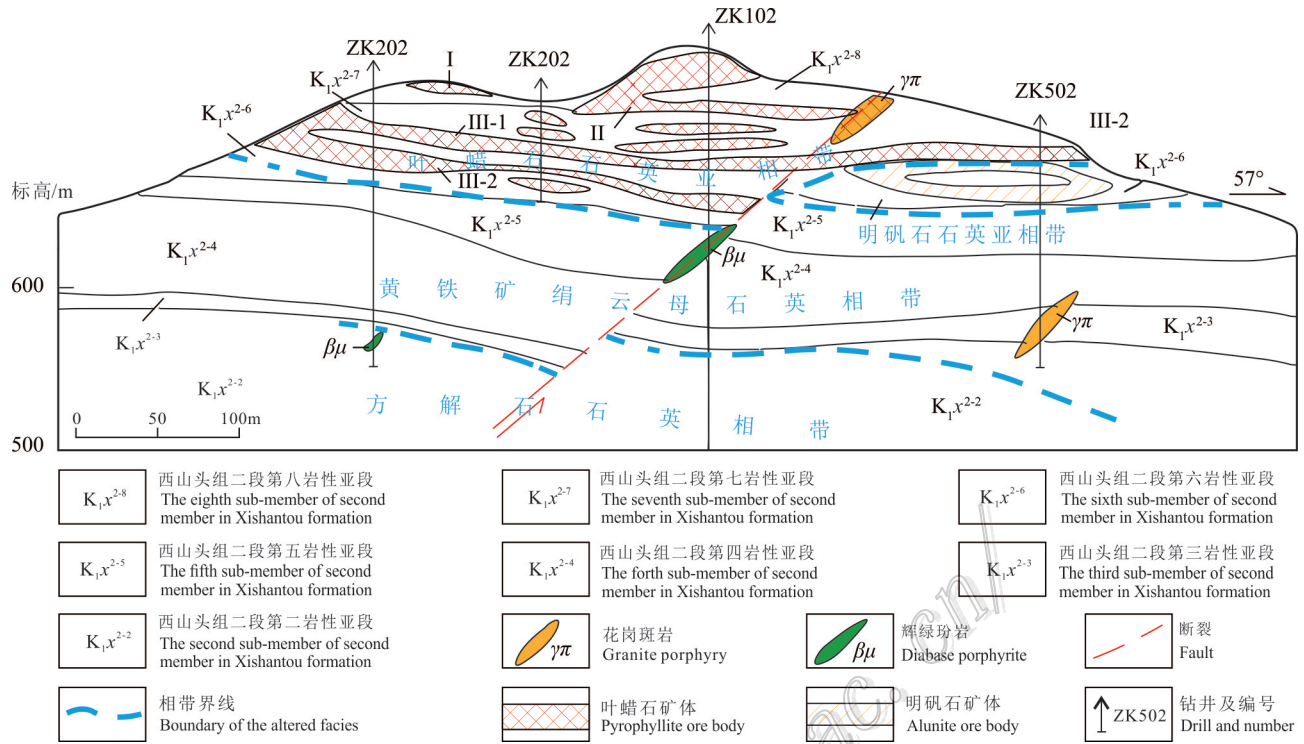


图 7 泰顺龟湖叶蜡石矿区垂向蚀变分带图(据苏三俊, 2007)

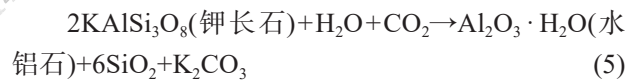
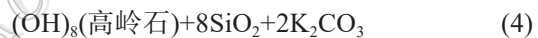
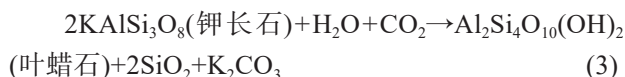
Fig. 7 Vertical alteration zoning map of the Guihu pyrophyllite deposit, Taishun (after Su, 2007)

较低(50~400°C),成矿深度较浅(<3 km),酸性和氧化的成矿环境。流纹质火山碎屑岩和凝灰岩为叶蜡石矿床的形成提供了充足的物质,岩浆作用为原岩改造和成矿提供了热液来源,岩浆期后的断裂构造及次级构造为岩浆热液的运移提供了容矿空间。

3.2 成矿规律

3.2.1 矿床成因

浙闽地区叶蜡石矿床多为火山热液型,形成于岩浆热液与围岩的相互作用。围岩蚀变过程中,热液流体沿断裂通道运移,与中酸性围岩发生水岩交代反应,使长英质矿物分解,导致大量的硅、铝等组分进入热液流体。在交代作用的初始阶段,成矿温度较高,围岩中的活性组分(如K、Na)被淋滤,硅被部分淋滤,稳定性组分(如Al)残留在岩石中,中酸性火山岩的钾长石逐渐转变为叶蜡石(3)。随着温度降低和热液流体的持续运移,钾长石进一步转变成高岭石(4)。当硅被完全淋滤时,钾长石转变成水铝石(5)。化学反应式如下:



叶蜡石矿化在空间上常具有分带性,多发育以叶蜡石矿为中心,向外逐渐转变为水铝石化、明矾石化、高岭石化和硅化等现象(图7)。持续的热液流体供给使蚀变程度增强,蚀变产物的铝含量升高,硅含量降低,叶蜡石等矿物含量增加,从而形成具有经济价值的叶蜡石矿床。火山热液交代型叶蜡石矿床的硅铝质组分来自中酸性火山岩围岩,原岩组分被交代、分解,使铝有规律地富集而成矿。火山热液充填型叶蜡石矿床的硅铝质组分则是从围岩中淋滤、萃取,沿构造裂隙运移,在有利的空间位置聚集成矿(图8)。

3.2.2 矿床分布、时代和找矿标志

东南沿海发育多旋回、多期次火山活动,根据喷发时间可分为晚三叠世—早侏罗世、晚侏罗世和白垩纪3个期、7个沉积-喷发旋回,这构成了浙闽火山岩带的主体。它们以中酸性岩石为主,富硅、铝和钾。浙闽地区叶蜡石矿床处于东南沿海火山活动带,属于浙闽粤沿海Pb-Zn-Cu-Ag-W-Sn-Mo-Nb-Ta-叶蜡石-明矾石-萤石成矿带(徐志刚等, 2008)。其

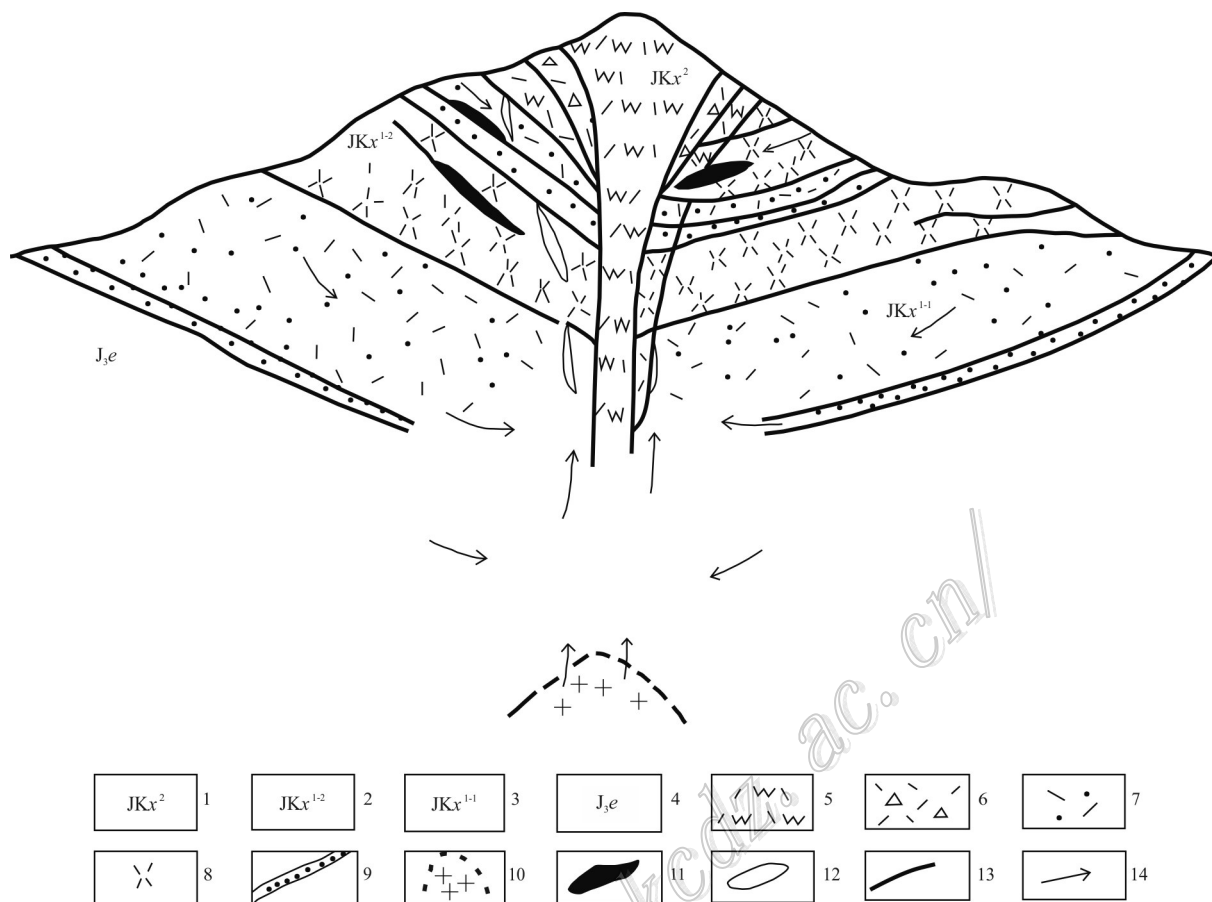


图8 浙闽地区火山热液型叶蜡石矿床成矿模式图(据高天钧等, 1997)

1—侏罗系—白垩系小溪组上段; 2—侏罗系—白垩系小溪组下段上部; 3—侏罗系—白垩系小溪组下段下部; 4—侏罗系南园群鹅宅组;
5—熔结凝灰岩; 6—火山角砾岩; 7—凝灰岩; 8—流纹岩; 9—粉砂岩; 10—潜火山岩; 11—交代叶蜡石矿; 12—充填型叶蜡石矿脉;
13—环状断裂; 14—热水、地表水运移方向

Fig. 8 Metallogenic model of the volcanic hydrothermal pyrophyllite deposits in the Zhejiang-Fujian area (after Gao et al., 1997)

1—The Upper Member of Jurassic—Cretaceous Xiaoxi Formation; 2—The upper part of lower member of Jurassic—Cretaceous Xiaoxi Formation;
3—The lower part of lower member of Jurassic—Cretaceous Xiaoxi Formation; 4—Ezhai Formation of Jurassic Nanyuan Group; 5—Welded tuff;
6—Volcanic breccia; 7—Tuff; 8—Rhyolite; 9—Siltstone; 10—Subvolcano; 11—Metasomatic pyrophyllite ore; 12—Filled pyrophyllite ore;
13—Ring faults; 14—Migration of fluid

中,泰顺龟湖超大型叶蜡石矿床位于宁波-温州火山喷发带,青田周村中型叶蜡石矿床位于宁波-青田火山喷发带,而青田山口超大型叶蜡石矿床位于这2个火山喷发带之间。

浙闽地区中生代火山带和大规模断裂紧密共生,这些岩浆和构造事件与古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲密切相关。区域上叶蜡石矿床主要赋存于中生代,如泰顺龟湖、青田周村和青田山口叶蜡石矿床赋存于早白垩世—晚侏罗世西山头组,其火山岩锆石 U-Pb 年龄表明沉积时代为 126~155 Ma(段政, 2013; 王加恩等, 2016); 福州寿山叶蜡石矿床赋存于早白垩世小溪组,火山岩锆石 U-Pb 年龄限定沉积时

间为 117~125 Ma(王飞飞等, 2020); 福建政和-建瓯叶蜡石矿床赋存于早白垩世—晚侏罗世南园组,其火山岩锆石 U-Pb 年龄为 138~163 Ma(段政, 2013)。叶蜡石矿床的成矿物质主要来源于中生代,成矿后被燕山运动形成的断裂所切割,因而其成矿时代主要为中生代。

浙闽地区叶蜡石矿床有 4 个主要的找矿标志。① 地层: 侏罗纪—白垩纪酸性火山岩与凝灰岩地层; ② 构造: 与火山岩、次火山岩带交汇的区域断裂带、挤压破碎带或层间破碎带; ③ 围岩蚀变: 硅化、叶蜡石化、明矾石化、黄铁矿化的垂直蚀变分带; ④ 地形: 高硅、抗风化能力强的次生石

英岩构成的悬崖峭壁和陡峭山峰。

4 结 论

(1) 中国叶蜡石矿床主要分布于浙闽地区, 占全国查明资源储量的78%。叶蜡石矿床的成因类型以火山热液交代型叶蜡石矿床为主, 火山热液充填型叶蜡石矿床次之, 含少量变质型叶蜡石矿床。

(2) 叶蜡石矿床的赋矿地层主要为侏罗纪—白垩纪的中酸性火山碎屑岩, 容矿构造为区域内发育的深大断裂和断陷盆地。火山热液交代型叶蜡石矿床具有明显的围岩蚀变分带, 而火山热液充填型叶蜡石矿床围岩蚀变分带不明显。

(3) 叶蜡石矿床的形成受控于中酸性火山岩原岩提供的铝、硅等成分, 在热液交代或充填作用下, 长石类矿物的叶蜡石化作用。因此, 侏罗纪—白垩纪的中酸性火山岩、断裂带、围岩蚀变分带以及陡峭山峰是叶蜡石矿床的重要找矿标志。

致 谢 本论文得到浙江省第十一地质大队省级院士专家工作站的支持。

References

- Ai J, Wang D L, Wang P, Li S P and Kou L F. 2019. Geological characteristics of Hualibao pyrophyllite deposit in Keyouqianbanner, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 18:53+146(in Chinese).
- Brown A J, Cudahy T J and Walter M R. 2006. Hydrothermal alteration at the Panorama Formation, North pole dome, Pilbara Craton, Western Australia[J]. Precambrian Research, 151: 211-223.
- Bryndzia L T. 1988. The origin of diaspore and pyrophyllite in the Foxtrap pyrophyllite deposit, Avalon Peninsula, Newfoundland; a re-interpretation[J]. Econ. Geol., 83(2).
- Cassedanne J. 1989. Pyrophyllite from Ibitiara, Brazil[J]. Mineral Record, 20: 465-467.
- Chen C Y. 1998. Detailed investigation of geological report of Fengmen-Bayang Sanyang deposit in Qingtian County, Zhejiang Province[R]. Zhejiang Province 11th Geological Brigade(in Chinese).
- Chen H L. 1990. A detailed survey of the geological report of the Shoushan pyrophyllase mining area in Fuzhou City, Fujian Province[DS]. National Geological Archive(in Chinese).
- Chen R B. 2018. Metallogenic geological condition and prospecting target prediction of carved pyrophyllite ore in Shoushan volcanic basin[J]. Geology of Fujian, 37(3): 193-201(in Chinese with English abstract).
- Chen W H. 1998. Detailed geological report of Dongzi pyrophyllite mining area in Fuqing County, Fujian Province[DS]. National Geological Archive(in Chinese).
- Chen Y F. 2013. Rock characteristic and formation of Qingtian and Changhua stone[D]. Supervisor: Yu X H. Beijing: China University of Geosciences.1-95(in Chinese with English abstract).
- Chen Z G, Yu H J, Li C C, Chen J Y and Xiong J. 2019. Discussion of non-metallic classification in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry, (2):1-5(in Chinese with English abstract).
- Corbett G J and Leach T M. 1998. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization[J]. Society of Economic Geologists Special Publication, 6: 1-240.
- Cornish B E. 1981. Australian pyrophyllite and its growing influence in world markets[C]. Proceedings of the 4th Industrial Minerals International Congress, Atlanta. 179-183.
- Das M, Monalisa S M, Paul A K, Mishra R K and Mohanty J K. 2012. Geochemistry and petrogenesis of pyrophyllite deposit of Madrangodi, Keonjhar district, Orissa[J]. Journal of the Geological Society of India, 79(5): 460-466.
- Duan Z. 2013. Time sequence and petrogenesis of Late Mesozoic volcanism in the area of Zhejiang-Fujian boundary[D]. Supervisor: Xing G F. Beijing: Chinese Academy of Geology Sciences. 1-85 (in Chinese with English abstract).
- Evans B W and Guggenheim S. 1988. Talc, pyrophyllite and related minerals[J]. Hydrous Phyllosilicates Reviews in Mineralogy, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 19: 225-294.
- Fan Z J, Zhang Q and Chen G. 2017. Relation between Mesozoic magmatism and plate subduction in the eastern China: Comparison among Zhejiang-Fujian, Japan arc and Andes arc[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1507-1523(in Chinese with English abstract).
- Fujii N. 1983. The present position of Japanese pyrophyllite[J]. Industrial Mineral(Great Britain), 194: 21-27.
- Gao T J, Zhang Z L and Liu Z X. 1997. The minerogenic condition and prospects for mineral exploration of the Shoushan stone (Agalmatolite) in Fujian Province[J]. Geology of Fujian Province, (3): 110-131(in Chinese with English abstract).
- Gao Y, Yu C, Dai G G and Yang Z K. 2016. Anaysis of geological characteristics and genesis of Pyrophyllite ore in Taishun County white rock mining area, Zhejiang Province[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 18(1):4-7+45(in Chinese with English abstract).
- He Y C. 1986. Significant buried metamorphic wax deposits[J]. Geology of China, (1): 23-25(in Chinese).
- Hong J X and Zeng H Q. 2005. Geological characteristics of Fengshun Tangxi[J]. West-China Exploration Engineering, (Supp.): 175(in Chinese).
- Huang G C, Zhang Y S and Chen H Y. 2015. A study of regional metallogenic regularity and prospecting direction of fluorite deposits in

- Zhejiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 34(6):1209-1222(in Chinese with English abstract).
- Kazarinova V. 1972. Some peculiarities of Kamensk clay deposit as raw material for production of facade ceramic[J]. *Publications of Altai Polytechnic Institute*, 21: 80-84.
- Kou G C. 2021. Geological characteristics and prospecting marks of Jian'ou City, Fujian Province[J]. *Metallurgy and Materials*, 41 (3): 163-164(in Chinese).
- Li G Y. 2005. Geological characteristics and controlling conditions of Non-metal deposits in continental volcanic sedimentary rock series[J]. *Geoscience*, (3):361-368(in Chinese with English abstract).
- Li J, Ma Z, Zhang Y, Dong S, Li Y, Lu M and Tan J. 2014. Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: Structural and geochronological constraints[J]. *International Geology Review*, 56(13): 1602-1629.
- Li Y C. 1987. A discussion on the characters of Emei Pyrophyllite ore deposit and the mechanism of its minerogenesis[J]. *Geology of Fujian*, (2):108-127(in Chinese with English abstract).
- Li Y C. 1988. Mineral composition and commercial application of pyrophyllites in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, (4): 19-36 (in Chinese with English abstract).
- Liang P, Liu Q P and He G W. 2015. Mineralogical Characteristics and Genesis of pyrophyllite from the Hongmiaoling formation in Tanzhesi region, western Beijing, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (6):1223-1230(in Chinese with English abstract).
- Liao S B, Chen R, Chu P L, Zeng J W, Zhang Y J, Wang C Z and Huang W C. 2019. Geochemical characteristics, petrogenesis and tectonic environment of the Late Mesozoic volcanic rocks in eastern Zhejiang area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 54(2):504-528 (in Chinese with English abstract).
- Lin Z H. 2018. Geological characteristics and prospecting criteria of the Jinghou Pyrophyllite deposit in Jianou, Fujian[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 40(2):27-33(in Chinese with English abstract).
- Liu L, Xu X and Zou H. 2012. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction[J]. *Lithos*, 154: 166-180.
- Liu Q P, Tang J X, Hu G Y, Song Y, Xie F W, Dai J J, Sun M, Yu X H, Ye Z F, Fu Z Y and Guo X Y. 2020. Geological and mineral characteristics of the Houkeng lithocap in the southeastern Zhejiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(2):599-614(in Chinese with English abstract).
- Lopez J G, Porez I S and Fernández-nieto C. 1993. Lithium-bearing hydrothermal alteration phyllosilicates related to Portalet fluorite ore (Pyrenees, Huesca, Spain)[J]. *Clay Minerals*, 28: 275-283.
- Lu L. 2018. Analysis of geological characteristics of Jinghou pyrophyllite deposit in area of Jian'ou city, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 37(1):21-30(in Chinese with English abstract).
- Lu Q D. 2008. Research report on Mesozoic volcanic lithostratigraphic division and age correlation in eastern Fujian and southwestern Zhejiang[M]. Fuzhou: Fujian Map Publishing House(in Chinese).
- Lu Y S and Zhou Z Q. 1999. The Pyrophyllite deposits in south-eastern Zhejiang and their metallogenic prospects[J]. *Geology of Zhejiang*, (1):16-24(in Chinese with English abstract).
- Ma L F. 2002. Geological Atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-348(in Chinese).
- Ma T H and Zhu X S. 2000. Spatial distribution of fluorite deposits in Zhejiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 19(3):8(in Chinese with English abstract).
- Mihalik A. 1976. The occurrence of pyrophyllite in hydrothermal volcanic rocks of Javoria (Middle Slovenia)[J]. *Mineralia Slovaca*, 7: 105-112.
- Ministry of Natural Resources. 2021. Statistical Table of National Mineral resources reserves in 2020[R], 11(in Chinese).
- Mukhopadhyay T K, Ghatak S and Maiti H S. 2010. Pyrophyllite as raw material for ceramic applications in the perspective of its pyro-chemical properties[J]. *Ceramics International*, 36(3): 909-916.
- Neal J P. 1983. North Carolina-mineral producer for the ceramic industry[C]://Wiley Online Library.
- Oner F and Tas A. 2013. Geochemistry, mineralogy and genesis of pyrophyllite deposits in the Pötürge Region (Malatya, eastern Turkey)[J]. *Geochemistry International*, 51(2): 140-154.
- Phin'ko V. 1984. Age of diaspore-pyrophyllite deposits of Central India[J]. *Geology and Economic Minerals of Ancient Platforms*, 138-143.
- Pimenta M. 1988. Agalmatolite: A Brazilian white extender[J]. *Proc. 8th Ind. Mineral. Intern. Congr.*, Boston, 117-126.
- Qiu J G. 2011a. Resources and reserves verification report of Shaojia pyrophyllite mining area, Fangcun, Changshan County, Zhejiang Province[R]. Zhejiang Geological Survey Institute(in Chinese).
- Qiu J G. 2011b. Resources and reserves verification report of Shenzhen pyrophyllite Mining Area, Ninghai County, Zhejiang Province[R]. Zhejiang Geological Survey Institute(in Chinese).
- Ray H N, MacRae G P, Cain L J and Malloch K R. 2003. New South Wales industrial minerals database, 2nd edition. Geological Survey of New South Wales, Sydney[M/CD].
- Sanchez-camazano M, Forteza J and Lorenzo L. 1988. Occurrence of pyrophyllite in soils from Sierra de San Pedro (Caceres, Spain)[J]. *Clay Minerals*, 23: 339-345.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi M, Zurcher L, Stavast W, Johnson D and Barton M. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[J]. *Econ. Geol.*, 100: 251-298.
- Shen C H, Bai F, Yang X Y and Wang Y K. 2020. Mineral geochemistry characteristics and genesis of the multicolor Qingtian stone from Zhejiang Province[J]. *Geoscience*, 34(1): 13-14(in Chinese with English abstract).
- Shikazono N. 2003. Developments in geochemistry[M]. Amsterdam:

- Elsevier. 1-463.
- Sinyakovskaya I, Zaykov V, and Kitagawa R. 2005. Types of pyrophyllite deposits in foldbelts[J]. *Resource Geology*, 55(4):405-418.
- Son Y S, Kang M K and Yoon W J. 2014. Pyrophyllite mapping in the Nohwa deposit, Korea, using ASTER remote sensing data[J]. *Geosciences Journal*, 18(3): 295-305.
- Song X Q and Bi D. 1988. Phyllite mineral resources in China[J]. *Geology in China*, (8):12-14(in Chinese).
- Song X Q. 1975. Geological exploration report of Emei pyrophyllite deposit in Fuzhou, Fujian Province[DS]. China Geological Archive(in Chinese).
- Su F. 2021. Application status and development trend of pyrophyllite in fiberglass industry in China[J]. *Fiberglass*, 4:39-41(in Chinese with English abstract).
- Su S J. 2007. Geological Report of pyrophyllite Survey in the west Section of the 6th Line of Guhu Mining Area, Taishun County, Zhejiang Province[R]. Zhejiang Province 11th Geological Brigade(in Chinese).
- Tang Z C, Dong X F, Meng X S, Zhao X D, Yu S Q, Wu X Y, Hu K M and Chen Z D. 2018. Geochronology and geochemistry of cretaceous rhyolites in the Shenxianju area, Zhejiang Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 42(2): 167-178(in Chinese with English abstract).
- Udachin V. 1991. Pyrophyllite-containing metasomatites of Dombarov ore area (South Ural)[J]. *Geology, Mineralogy and Technology of Pyrophyllite Raw Material*, 97-104.
- Wang F F, Han Z Z, Lin X H, Bu X J and Lai Z Q. 2020. Geochemistry and pyrogenesis of Late Mesozoic volcanic rocks at Dayushan islands of northern Fujian[J]. *Marine Geology Frontiers*, 36(3):31-43(in Chinese with English abstract).
- Wang J E, Liu Y D and Wang Z. 2015. Geochronology of volcanic rocks in Cretaceous Red-bed basin in Lishui, Zhejiang Province and its geological significance[J]. *Geoscience*, 29(4): 873-883(in Chinese with English abstract).
- Wang L. 1994. Study on ore types of pyrophyllite in China[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, (6):8-13(in Chinese).
- Wang L and Liu D S. 1996. Construction and mineralization of pyrophyllite ore-bearing volcanic rocks in southeast China[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, (4):14-18(in Chinese).
- Wang L. 1997. Genetic types and geological characteristics of pyrophyllite deposits in southeast China[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, (5):9-12(in Chinese).
- Wang L. 2018. Study on the characteristics and genesis of Jinshan pyrophyllite deposit in Beishan, Gansu Province[J]. *Science and Technology*, (21):121(in Chinese).
- Wang P, Pan Y L and Weng L B. 1982. Mineralogy of systems (volume one)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-666(in Chinese).
- Wen J Y. 2005. Geological survey report of pyrophyllite ore in Dongyuan Mining area, Ruian City, Zhejiang Province[DS]. China Geological Archive(in Chinese).
- Wen X D. 2019. Analysis on the Metallogenic Regularity of pyrophyllite Deposit in Xiaosantai-Santaigou area, Jimsar County, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 42(2):28-29+31(in Chinese).
- Will P, Lüders V, Wemmer K and Gilg H A. 2016. Pyrophyllite Formation in the thermal aureole of a hydrothermal system in the Lower Saxony Basin, Germany[J]. *Geofluids*, 16: 349-363.
- Wu Y P. 1994. The geological report of the middle part of the southern ore section of Liangaoye wax mining area, Shangyu City, Zhejiang Province[DS]. China Geological Archive(in Chinese).
- Wu Z L. 2003. Geological characteristics of Upper Jurassic pyrophyllite deposits in the Shouning-Fuzhou area[J]. *Geology of Fujian*, 24(3): 125-130(in Chinese with English abstract).
- Xu X S and Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318-334(in Chinese with English abstract).
- Xu Y X, Wang C W, Liu M J, Zhou W B, Chen T, Yang M X and Hong H L. 2021. Mineralogical characteristics of the 'Taishunshi' and their genetic significances[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(2): 213-223(in Chinese with English abstract).
- Xu Z G, Chen Y C, Wang D H and Chen Z H. 2008. Division scheme of metallogenic belt in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-138(in Chinese).
- Xu Z G and Zhu M Y. 2015. Discussion about division schemes of mineral resources and commodity of China[J]. *Mineral Deposits*, 34(6):25(in Chinese with English abstract).
- Yang X Y. 2018. Mineralogical study of yellow series of Qingtian stone from Zhejiang[D]. Supervisor: Bai F and Liu Y. Beijing: China University of Geosciences 1-65(in Chinese with English abstract).
- Yang Z W and Xu Q. 1985. Nonmetallic metallogenic regularity and prospecting direction of Mesozoic volcanic rocks in southeast coastal area[J]. *Zhejiang Land and Resources*, (1):40-50(in Chinese).
- Yao W J, Zhang P P, Wang S F, Ma L Y and Shu K. 2007. Review of present status on pyrophyllite and its application development[J]. *World Geology*, (1):124-129(in Chinese with English abstract).
- Ye K K. 2019. Distribution and types of pyrophyllite deposits in Fujian Province[J]. *Metallurgy and Materials*, 39(6): 181 + 183(in Chinese).
- Ye K K. 2021. The rock characteristics and prospecting marks of the pyrophyllite ore belt in Zhenghe-Jian'ou, Fujian Province[J]. *Metallurgy and Materials*, 41(3):77-79(in Chinese).
- Ye Z F. 2006. Geological survey report of sculptural pyrophyllite ore in Zhoucun mining area, Fushan Town, Qingtian County, Zhejiang Province[R]. Zhejiang Province 11th Geological Brigade(in Chinese).
- Ye Z Q and Wang Z Y. 1990. The primary study of geological features and origination about the alteration zone in Shenzhen pyrophyllite

- deposit. Ninghai County, Zhejiang Province[J]. Zhejiang Land & Resources, (1):44-51(in Chinese with English abstract).
- Yu Z X. 1991. Geological report of Hutun pyrophyllite mining area, Shouning County, Fujian Province[DS]. China Geological Archive (in Chinese).
- Zalba P E. 1979. Clay deposits of Las Aguilas Formation, Barker, Buenos Aires Province, Argentina[J]. Clays and Clay Minerals, 27(6): 433-439.
- Zaykov V and Udachin V. 1994. Pyrophyllite and pyrophyllite raw materials in the sulfide-bearing areas of the Urals[J]. Applied clay science, 8: 417-435.
- Zaykov V, Udachin V and Sinyakovskaya I. 1988. Pyrophyllite deposits[J]. International Geology Review, 30: 90-103.
- Zhang S Y and Zhang H F. 2017. Element mobility and fluid characteristics during pyrophyllite alteration: A case study from the Baiyun pyrophyllite deposit, Wutai County, Shanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(6): 1872-1892(in Chinese with English abstract).
- Zhang S Y and Zhang H F. 2020. Genesis of the Baiyun pyrophyllite deposit in the central Taihang Mountain, China: Implications for gold mineralization in wall rocks[J]. Ore Geology Reviews, 120: 103313.
- Zhou J, Xu S F, Chi Q H, Chen E K, Zhang B M and Wang W. 2012. Geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic belt in the southeast coast of China[J]. Earth Science Frontiers, 19(3):93-100 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 艾娟, 王德力, 王鹏, 李世平, 寇立峰. 2019. 内蒙古科右前旗好力宝叶蜡石矿地质特征[J]. 内蒙古科技与经济, 18:53+146.
- 陈朝永. 1988. 浙江省青田县山口叶蜡石矿丰门-白坪矿段详查地质报告[R]. 浙江省第十一地质大队.
- 陈亨亮. 1990. 福建省福州市寿山叶蜡石矿区详查地质报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 陈仁表. 2018. 寿山火山盆地雕刻用叶蜡石矿成矿地质条件及找矿靶区预测[J]. 福建地质, 37(3): 193-201.
- 陈维华. 1988. 福建省福清县东仔叶蜡石矿区普查——详查地质报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 陈延芳. 2013. 青田石、昌化石的岩石学特征与成因分析[D]. 导师: 喻学惠. 北京: 中国地质大学. 1-95.
- 陈正国, 于海军, 李朝灿, 陈军元, 熊军. 2019. 我国非金属矿产分类探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊, (2):5.
- 段政. 2013. 浙闽相邻区晚中生代火山活动时序与成因研究[D]. 导师: 邢光福. 中国地质科学院. 1-85.
- 高天钧, 张智亮, 刘志逊. 1997. 寿山石成矿地质条件及找矿前景[J]. 福建地质, (3):110-131.
- 高原, 于春, 戴刚刚, 杨仲可. 2016. 浙江泰顺县白岩叶蜡石矿成因及成矿模式[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 18(1):4-7+45.
- 何英才. 1986. 值得重视的埋藏变质型叶蜡石矿床[J]. 中国地质, (1): 23-25.
- 洪军新, 曾华泉. 2005. 广东丰顺汤西叶蜡石矿成矿地质特征[J]. 西部探矿工程, (增):175.
- 黄国成, 张永山, 程海艳. 2015. 浙江省萤石矿床区域成矿规律与找矿方向研究[J]. 矿床地质, 34(6):14.
- 寇贵存. 2021. 福建省建瓯市水源乡叶蜡石矿地质特征及找矿标志[J]. 冶金与材料, 41(3):163-164.
- 李广有. 2005. 陆相火山沉积岩系非金属矿床的地质特征及控矿条件[J]. 现代地质, (3):361-368.
- 李迎春. 1987. 福州峨嵋叶蜡石矿床地质特征及成矿机制探讨[J]. 福建地质, (2):108-127.
- 李迎春. 1988. 福建省叶蜡石矿物质组份及工业应用[J]. 福建地质, (4):19-36.
- 梁鹏, 刘钦甫, 何广武. 2015. 京西潭柘寺地区红庙岭组叶蜡石矿物学特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, (6):1223-1230.
- 廖圣兵, 陈荣, 褚平利, 曾剑威, 张彦杰, 王存智, 黄文成. 2019. 浙东地区晚中生代火山岩地球化学特征、岩石成因及构造环境[J]. 地质科学, (2):504-528.
- 林子华. 2018. 福建省建瓯市井后叶蜡石矿床地质特征及找矿标志[J]. 化工矿产地质, 40(2):27-33.
- 刘秋平, 唐菊兴, 胡古月, 宋杨, 谢富伟, 代晶晶, 孙渺, 余旭辉, 叶泽富, 傅正圆, 郭晓宇. 2020. 浙东南后坑酸性蚀变岩帽地质及矿物学特征[J]. 地质学报, 94(2):599-614.
- 马丽芳. 2002. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社. 1-348.
- 卢林. 2018. 福建建瓯井后叶蜡石矿床地质特征剖析[J]. 福建地质, 37(1):21-30.
- 卢清地. 2008. 福建东部、浙江西南部地区中生代火山岩石地层划分与时代对比研发报告[M]. 福州: 福建省地图出版社.
- 罗炎水, 周洲强. 1999. 浙东南地区蜡石矿及其成矿远景[J]. 浙江地质, (1):16-24.
- 麻土华, 朱兴盛. 2000. 浙江萤石矿床的空间分布[J]. 矿床地质, 19(3):8.
- 潘振杰, 张旗, 陈刚. 2017. 中国东部中生代岩浆活动与板块俯冲的关系—浙闽与日本弧和安第斯弧的对比及其意义[J]. 岩石学报, 33(5): 1507-1523.
- 裘建国. 2011a. 浙江省常山县芳村邵家叶蜡石矿区资源储量核查报告[R]. 浙江省地质调查院.
- 裘建国. 2011b. 浙江省宁海县深圳叶蜡石矿区资源储量核查报告[R]. 浙江省地质调查院.
- 沈崇辉, 白峰, 杨晓燕, 王裕坤. 2020. 浙江多色青田石岩石地球化学特征及成因[J]. 现代地质, 34(1): 13-14.
- 舒锋. 2021. 我国叶蜡石在玻璃纤维行业中的应用现状及发展趋势[J]. 玻璃纤维, 4: 39-41.
- 宋祥铨, 毕东. 1988. 中国叶蜡石矿产资源[J]. 中国地质, (8):12-14.
- 宋祥铨. 1975. 福建省福州市峨嵋叶蜡石矿地质勘探报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 苏三俊. 2007. 浙江省泰顺县龟湖矿区6线以西矿段叶蜡石普查地质报告[R]. 浙江省第十一地质大队.
- 唐增才, 董学发, 孟祥随, 赵旭东, 余盛强, 吴小勇, 胡开明, 陈忠大. 2018. 浙江神仙居流纹质火山岩年代学, 地球化学及其地质意义[J]. 地层学杂志, 42(2): 167-178.

- 汪灵,柳东升. 1996. 中国东南沿海叶蜡石含矿火山岩建造及其成矿作用[J]. 建材地质, (4):14-18.
- 汪灵. 1997. 中国东南沿海叶蜡石矿床成因类型及其地质特征[J]. 建材地质, (5):9-12.
- 汪灵. 1994. 中国叶蜡石矿矿石类型研究[J]. 建材地质, (6):8-13.
- 王加恩,刘远栋,王振. 2015. 浙江省丽水地区白垩纪红层盆地火山岩年龄及其构造意义[J]. 现代地质, 29(4): 873-883.
- 王加恩,刘远栋,汪建国,王振,陶丽. 2016. 浙江省丽水地区磨石山群火山岩时代归属[J]. 华东地质, 37(3):157-165.
- 王飞飞,韩宗珠,林学辉,部雪娇,来志庆. 2020. 闽北大崙山岛火山岩岩石地球化学及成因研究[J]. 海洋地质前沿, 36(3):31-43.
- 王亮. 2018. 甘肃北山南金山叶蜡石矿特征与成因研究[J]. 科技风, (21):121.
- 王濮,潘兆檐,翁玲宝,等. 1982. 系统矿物学(上册)[M]. 北京:地质出版社. 1-666.
- 温积远. 2005. 浙江省瑞安市东源矿区叶蜡石矿普查地质报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 文旭东. 2019. 浅析新疆吉木萨尔县小三台一大三台沟一带叶蜡石矿成矿规律[J]. 新疆有色金属, 42(2):28-29+31.
- 吴亚平. 1994. 浙江省上虞市梁岙叶蜡石矿区南矿段中部详查地质报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 吴资龙. 2003. 寿宁-福州上侏罗统南源群叶蜡石矿地质特征. 福建地质, 24(3): 125-130
- 徐夕生,谢昕. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 11(3): 318-334.
- 徐艳晓,王朝文,刘明军,周武邦,陈涛,杨明星,洪汉烈. 2021. “泰顺石”的矿物学特征及其对成因的指示[J]. 矿物学报, 41(2):213-223.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,陈郑辉. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版社. 1-138.
- 徐志刚,朱明玉. 2015. 关于中国矿产种类划分方案的讨论[J]. 矿床地质, 34(6):25.
- 杨文宗,许畴. 1985. 东南沿海中生代火山岩区非金属成矿规律和找矿方向[J]. 浙江国土资源, (1):40-50.
- 杨晓燕. 2018. 浙江黄色系列青田石的矿物学研究[D]. 导师:白峰,刘琰. 北京:中国地质大学. 1-65.
- 姚文君,张培萍,李书法,马丽艳,苏克. 2007. 叶蜡石矿产资源及其应用开发研究现状[J]. 世界地质, (1):124-129.
- 叶孔凯. 2019. 福建省叶蜡石矿床分布及其类型[J]. 冶金与材料, 39(6):181+183.
- 叶孔凯. 2021. 福建省政和-建瓯叶蜡石成矿带内矿床岩石特征及找矿标志[J]. 冶金与材料, 41(3):77-79.
- 叶泽富. 2006. 浙江省青田县阜山镇周村矿区雕刻叶蜡石矿普查地质报告[R]. 浙江省第十一地质大队.
- 余泽新. 1991. 福建省寿宁县湖潭叶蜡石矿区详查地质报告[DS]. 全国地质资料馆.
- 乐振卿,王祝宜. 1990. 浙江宁海深圳叶蜡石矿区蚀变带地质特征及其成因初探[J]. 浙江国土资源, (1):44-51.
- 张少颖,张华锋. 2017. 叶蜡石化蚀变过程中的元素活动性与流体性质:以山西五台地区白云叶蜡石矿为例[J]. 岩石学报, 33(6): 1872-1892.
- 周建,徐善法,迟清华,陈恩科,张必敏,王玮. 2012. 东南沿海中生代火山岩带地球化学特征[J]. 地学前缘, 19(3):93-100.
- 自然资源部. 2021. 2020年全国矿产资源储量统计表[R]. 11.