

华南东部火成岩与钨锡铌钽锂等关键金属成矿耦合关系综述

王勃然, 于海晶, 蒙 权, 冯建燕

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月10日

摘 要

文章系统梳理了华南东部火成岩的时空分布特征、岩石类型及地球化学属性, 总结了钨锡铌钽锂矿床的成矿类型、分布规律及核心成矿要素, 重点聚焦“古特提斯-太平洋构造域转换对成矿元素差异富集的控制”与“东西部幔源物质贡献差异的深部动力学机制”两个核心争议点进行深入剖析。研究发现, 华南东部关键金属成矿与燕山期高分异花岗岩的岩浆演化密切相关, 壳幔混合作用为成矿提供物质基础, 构造活动控制成矿空间定位, 岩浆热液则推动金属元素富集沉淀, 形成“壳幔混合供源、岩浆分异富集、构造控制定位、流体驱动成矿”的协同耦合体系。本文研究成果可为华南东部关键金属矿产的深部找矿预测及成矿理论深化提供参考依据。

关键词

华南东部, 火成岩, 关键金属, 钨锡铌钽锂

A Review of the Coupling Relationship between Igneous Rocks in Eastern South China and the Mineralization of Key Metals Such as Tungsten, Tin, Niobium, Tantalum, and Lithium

Boran Wang, Haijing Yu, Quan Meng, Jianyan Feng

College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: March 18, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 10, 2026

文章引用: 王勃然, 于海晶, 蒙权, 冯建燕. 华南东部火成岩与钨锡铌钽锂等关键金属成矿耦合关系综述[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 995-1004. DOI: 10.12677/ag.2026.167089

Abstract

This paper systematically reviews the spatiotemporal distribution characteristics, rock types, and geochemical properties of igneous rocks in eastern South China, summarizes the metallogenic types, distribution patterns, The focus is on in-depth analysis of two core controversial points: “the control of the Gutteis-Pacific tectonic domain transition on the differential enrichment of ore-forming elements” and “the deep dynamic mechanism of the differences in mantle source material contributions between the east and west”. The study finds that key metal metallogenesis in eastern South China is closely related to magma evolution of the high-fractionation granites of the Yanshanian period. Crust-mantle mixing provides the material foundation for mineralization, tectonic activity controls the spatial positioning of mineralization, and magmatic hydrothermal processes drive the enrichment and deposition of metal elements, forming a synergistic coupling system of “crust-mantle mixed supply, magmatic differentiation enrichment, tectonic control for localization, and fluid-driven mineralization.” The results of this study can provide a reference for deep mineral prospecting and for the further development of metallogenic theory for key metal resources in eastern South China.

Keywords

Southeast China, Igneous Rocks, Key Metals, Tungsten, Tin, Niobium, Tantalum, Lithium

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

华南东部地处古特提斯与太平洋构造域的交汇地带，中生代以来经历了强烈的岩石圈伸展与岩浆活动，形成了规模宏大的火成岩带与丰富的关键金属矿产资源[1]。火成岩作为成矿母岩，其形成、演化过程与钨、锡、铌、钽、锂等关键金属的富集、沉淀密切相关，二者的耦合关系是揭示区域成矿规律、指导深部找矿的核心关键[2]。本文在统一构造背景下系统对比 W-Sn 与 Li-Nb-Ta 两大成矿体系的差异富集机制，并重点剖析古特提斯 - 太平洋构造域转换的精细控制过程，同时整合多维度关键数据进行可视化，为区域成矿理论提供更具针对性的新视角。长期以来，国内外学者围绕华南东部火成岩成因、关键金属矿床特征及二者耦合机制开展了大量研究，取得了丰硕成果[3]，但在成矿物质来源、岩浆 - 流体协同成矿等方面仍存在诸多争议[4]。本文基于已有研究成果，系统梳理火成岩与关键金属成矿的基础地质特征，深入剖析二者的耦合机制，明确研究现状与不足，展望未来研究方向，为区域成矿理论深化与找矿突破提供支撑[5]。

2. 华南东部火成岩与关键金属矿床的基础地质特征

2.1. 火成岩的时空分布与岩石学特征

华南东部火成岩活动主要集中于燕山期(侏罗纪 - 白垩纪)，印支期及加里东期岩浆岩仅少量发育，整体呈现“东西分带、由陆向海逐渐年轻化”的时空分布特点[6]。空间上，以政和 - 大埔断裂为界(图 1)，可划分为西部内陆花岗岩带与东部沿海火山 - 侵入岩带两大区域，其中西部内陆花岗岩带涵盖南岭东段、

武夷山脉等区域，东部沿海火山－侵入岩带则主要分布于浙闽沿海一带[7]；时间上，岩浆活动可分为燕山早期(180~145 Ma)与燕山晚期(145~65 Ma)两个阶段，燕山早期以花岗岩侵入活动为主，燕山晚期则呈现火山活动与花岗岩侵入并存的特征，且岩浆演化程度随时间推移逐步升高[8]。

区域内火成岩以花岗岩类为主，包含 I 型、S 型、A 型三大类型，其中高分异花岗岩是关键金属成矿的核心母岩[9]。这类花岗岩普遍具有高硅、高碱、低镁、低钙的地球化学特征，暗色矿物含量低于 5%，副矿物可见电气石、石榴石、绿柱石及铌钽铁矿等，微量元素方面表现为 Cr、Ni、Sr、Ba 等元素亏损，Li、Rb、Cs 等元素富集，稀土元素则呈现轻重稀土比值小、Eu 负异常显著的特点(见表 1) [10]。此外，浙闽沿海地区还发育少量基性－酸性火山岩(如流纹岩、玄武岩)，与酸性岩浆岩构成共生组合，清晰记录了岩石圈减薄过程中的壳幔相互作用过程[11]。

岩浆成因研究表明，华南东部花岗岩的物质来源具有明显的壳幔混合特征：燕山早期花岗岩以地壳物质重熔为主，部分岩体有幔源岩浆底侵作用参与[12]；燕山晚期花岗岩则表现出更强的幔源物质贡献，这一特征与岩石圈拆沉引发的地幔物质上涌过程密切相关(图 2) [13]。古太平洋板块俯冲角度的变化、俯冲后撤及洋脊俯冲等地质过程，共同控制了区域岩浆活动的时空迁移规律与成因演化特征[14]。

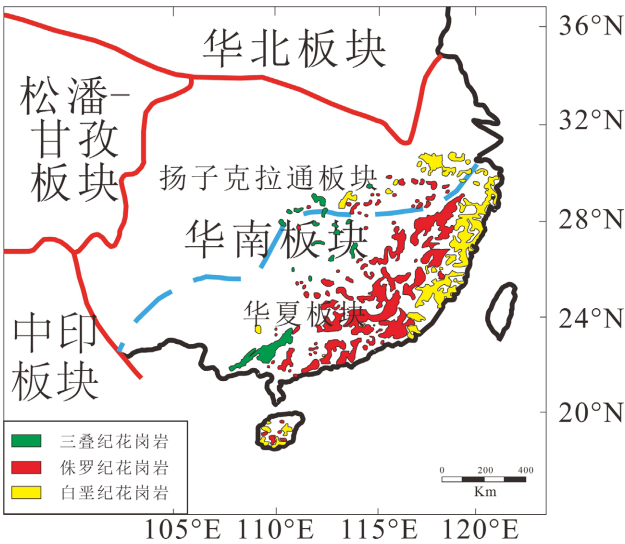


Figure 1. Simplified geological map of southeast (SE) China, showing major tectonic units and Phanerozoic intrusions.
图 1. 中国(东南部)简化地质图(显示主要构造单元和显生宙侵入体)

Table 1. Main and trace element characteristics of typical high-silica heterogeneous granites in eastern South China
表 1. 华南东部典型高分异花岗岩主微量元素特征

岩体名称	时代/Ma	SiO ₂ /%	Na ₂ O + K ₂ O/%	A/CNK	Sr/ppm	Eu/Eu*	岩石类型	资料来源
宜春雅山	135~125	73.2~76.5	7.8~8.9	1.12~1.21	10~30	0.01~0.05	白云母花岗岩	[15] [17]
赣南漂塘	158~150	74.1~75.8	7.6~8.5	1.08~1.18	20~45	0.04~0.10	二云母花岗岩	[19] [21]
武夷祁阳	140~132	72.8~75.3	7.5~8.6	1.10~1.20	15~40	0.03~0.08	钠长石化花岗岩	[16] [35]
粤东莲花山	115~98	73.5~76.2	8.0~9.1	1.05~1.13	25~50	0.05~0.12	A 型花岗岩	[26] [39]
赣南西华山	155~150	73.8~75.6	7.7~8.6	1.09~1.17	22~48	0.04~0.11	黑云母花岗岩	[5] [19]
闽东福安	130~122	72.9~75.1	7.6~8.5	1.11~1.19	18~42	0.03~0.09	白云母花岗岩	[16] [36]
粤东新丰	120~110	73.3~76.0	7.9~9.0	1.06~1.14	28~52	0.05~0.13	A 型花岗岩	[26] [40]

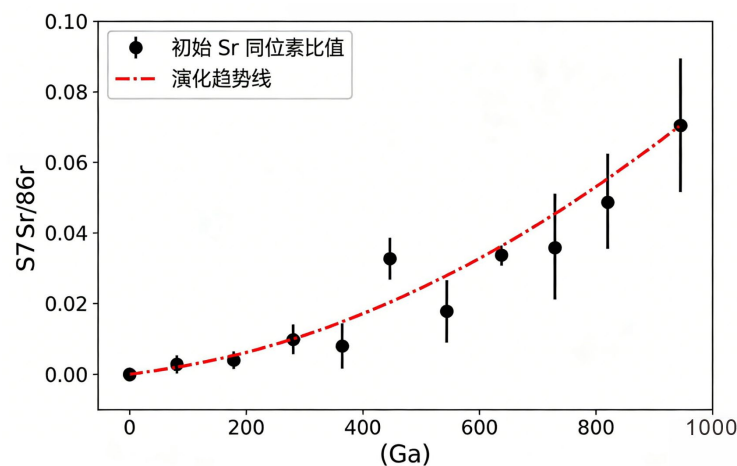


Figure 2. Granite isotope evolution diagram
图 2. 花岗岩同位素演化图

2.2. 钨锡铌钽锂关键金属矿床的分布与成矿类型

华南东部钨锡铌钽锂矿床的空间分布与火成岩带呈现高度吻合的特征，表现为“成群成带、与岩体伴生”的分布规律，主要集中于南岭东段、武夷山脉、浙闽沿海三大成矿带[15]。其中，南岭东段以钨、锡、锂矿为主，武夷山脉以铌钽、钨矿为主要特色，浙闽沿海则以锡、钨及稀有金属矿为主，形成了多个大型 - 超大型矿集区，是我国关键金属资源的重要富集区域[16]。

依据矿床成因与产出特征，可将区域内关键金属矿床划分为 4 种主要类型(见表 2)：I 花岗岩型，以宜春 414 式铌钽矿、赣南花岗岩型锂矿为典型代表，矿体直接赋存于高分异花岗岩体内，成矿过程与岩浆结晶分异作用密切相关[17]；II 花岗伟晶岩型，如闽西伟晶岩型铌钽锂矿，主要形成于岩浆演化晚期，是铌钽锂矿的重要产出类型，多分布于陆缘造山带区域[18]；III 岩浆热液型，赣南黑钨矿、粤东锡矿均属于此类，由岩浆期后热液携带金属元素，沿断裂、岩体接触带发生交代沉淀形成，常伴随云英岩化、矽卡岩化等蚀变现象[19]；IV 风化壳型，此类矿床以稀土矿为主，常与钨锡铌钽矿共生，形成于花岗岩风化过程中，其分布主要受地形、降雨量等表生条件控制[20]。

区域内关键金属矿床的成矿时代主要集中于燕山期，与火成岩活动时代高度一致，其中燕山早期以铌钽、锂矿成矿为主，燕山晚期则以钨、锡矿成矿为主，清晰体现了“岩浆活动时序与成矿时序”的协同性[21]。此外，部分区域还存在不同世代、不同类型矿床的叠加成矿现象，这种叠加作用显著提升了区域成矿强度[5]。

Table 2. Basic characteristics of typical W-Sn-Nb-Ta-Li deposits in Eastern South China
表 2. 华南东部典型钨锡铌钽锂矿床基本特征

矿床名称	主要矿种	成因类型	赋矿岩石	成矿时代/Ma	典型蚀变
宜春 414	Nb-Ta-Li	花岗岩型	高分异花岗岩	132~126	钠长石化、云英岩化
西华山	W-Sn	岩浆热液型	黑云母花岗岩	155~150	云英岩化、硅化
漂塘	W-Sn	岩浆热液型	二云母花岗岩	158~152	云英岩化、绿泥石化
香花岭	Sn-W-Li	矽卡岩 - 热液型	花岗岩接触带	140~135	矽卡岩化、绿帘石化
闽东某伟晶岩	Li-Be-Nb	花岗伟晶岩型	伟晶岩	138~130	白云母化、钠长石化
粤东厚婆坳	Sn-Zn	岩浆热液型	火山 - 侵入杂岩	110~95	硅化、绢云母化

续表

祁阳铌钽矿	Nb-Ta	花岗岩型	钠长石化花岗岩	140~132	钠长石化、云英岩化
福鼎锂矿	Li-Nb-Ta	花岗伟晶岩型	伟晶岩	125~118	白云母化、钠长石化
莲花山锡矿	Sn-W	岩浆热液型	A 型花岗岩	115~98	云英岩化、硅化

3. 华南东部火成岩与关键金属成矿的耦合机制

3.1. 物质来源耦合：壳幔混合与成矿物质供给

物质来源的一致性上火成岩与关键金属成矿实现耦合的基础条件[22]。华南东部关键金属的成矿物质主要来源于地壳物质重熔与地幔物质加入的混合作用，而火成岩则成为这种混合物质的载体与演化媒介[23]。

钨、锡元素的物质来源以地壳重熔为主，区域内元古代地壳岩石(如变质泥岩)的重熔的是钨锡元素的主要供给来源，部分矿床中也发现有少量幔源物质参与的痕迹[24]。成钨花岗岩多为 S 型花岗岩，成因上以地壳物质重熔为主，少量高分异 I 型花岗岩也具备形成钨矿的条件[25]；成锡花岗岩虽同样源于地壳物质，但多具有 A 型花岗岩的特征，与 S 型花岗岩在地球化学特征上存在明显差异[26]。铌、钽、锂元素的物质来源则兼具壳幔双重属性，其中锂、铍的成矿物质主要来源于富白云母源岩的熔融作用，或黑云母花岗质高温岩浆的分异演化过程[27]，铌、钽元素的富集则受源岩物质组成的制约更为明显，过铝性岩浆相关的铌钽矿床，其物质来源主要为板块边缘或板块之间的大洋沉积岩重熔[28]。

在火成岩形成过程中，幔源基性岩浆的底侵作用不仅为地壳物质重熔提供了充足能量，还带来了部分幔源成矿物质，有效促进了壳幔物质的混合与循环[29]。岩石圈拆沉引发的地幔物质上涌，进一步加剧了壳幔相互作用的强度，为关键金属元素的富集提供了充足的物质保障[30]。这种“壳幔混合”机制的差异，直接导致了不同类型火成岩对应不同的成矿专属性[31]。

3.2. 岩浆演化耦合：高分异作用与金属元素富集

岩浆演化过程是火成岩与关键金属成矿实现耦合的核心环节，其中高分异花岗岩的结晶分异作用，是关键金属元素从岩浆中活化、富集的主要机制[32]。华南东部各类关键金属矿床的形成，均与花岗岩的高度结晶分异作用密切相关，其中形成铌钽矿的花岗岩分异演化程度最高，形成钨、锡矿的花岗岩分异演化程度中等[33]。

在岩浆演化过程中，随着温度、压力的逐步降低，岩浆会发生阶段性结晶分异，早期结晶的斜长石、角闪石等矿物不断分离，使得剩余岩浆中硅、碱元素及钨、锡、铌、钽、锂等微量元素不断富集[34]。高分异花岗岩的形成过程中，岩浆会经历黑云母花岗岩 - 二云母花岗岩 - 白云母花岗岩 - 钠长石化花岗岩的分异演化阶段，叠加后期矿化蚀变作用，进一步推动关键金属元素的富集[35]。例如，锂元素主要在岩浆演化晚期实现富集，这一过程与白云母、锂云母等矿物的结晶过程密切相关[36]；铌、钽元素则在岩浆分异过程中，随着锆石、铌钽铁矿等副矿物的结晶而沉淀富集[37]；钨、锡元素则在岩浆分异后期，伴随流体出溶从岩浆中分离，进入热液体系[38]。

此外，岩浆混合作用也对金属元素的富集具有重要促进作用。区域内花岗岩体内部普遍存在岩浆混合现象，流纹岩与玄武岩形成的复合熔岩流，也进一步证实了玄武质岩浆广泛且强烈的底侵作用[39]。这种岩浆混合作用不仅改变了岩浆的化学成分，还加速了岩浆分异进程，为金属元素的活化与富集创造了有利条件[40]。

3.3. 构造控制耦合：构造活动与成矿空间定位

构造活动是火成岩与关键金属成矿耦合的重要纽带，其不仅控制着火成岩的侵位与分布格局，还决

定着成矿物质的运移通道与沉淀空间,最终形成“构造-岩浆-成矿”的协同控制体系[41]。

华南东部中生代处于印支期-燕山期动力体制转换阶段,古太平洋板块的幕式俯冲与岩石圈伸展拆沉作用,共同形成了一系列深大断裂与次级断裂[42]。这些断裂不仅是岩浆上升的主要通道,也是成矿物质运移与沉淀的有利空间[43]。其中,政和-大埔断裂等关键构造带,直接控制着火成岩的时空分带特征,火成岩“东西分带、由陆向海年轻化”的分布规律,与断裂的活动时序密切相关[44]。

不同类型关键金属矿床的空间定位,受构造类型的控制表现出明显差异:花岗岩型、花岗伟晶岩型矿床多赋存于深大断裂旁侧的次级断裂、背斜构造或岩体内部裂隙中,例如武夷山脉的铌钽矿就多产于背斜构造内部[45];岩浆热液型钨、锡矿则主要分布于花岗岩体与围岩的接触带、断裂交汇处,这些区域是热液流体聚集、发生交代作用的有利场所,常伴随云英岩化、矽卡岩化等蚀变作用[46];风化壳型矿床则主要分布于地形平坦的丘陵地带,且集中在受断裂控制的花岗岩风化区域[47]。此外,华南北东向与东西向构造的叠加区域,是关键金属矿床的有利成矿部位,控制着多个大型矿集区的分布[48]。

3.4. 流体作用耦合:岩浆热液与金属沉淀

岩浆热液是连接火成岩与关键金属成矿的重要媒介,火成岩演化过程中释放的岩浆热液,携带大量活化状态的关键金属元素,通过构造通道进行运移,最终在有利地质部位沉淀成矿,形成“岩浆分异-流体出溶-金属迁移-沉淀成矿”的完整耦合过程[49]。

华南东部关键金属成矿的流体主要来源于岩浆热液,部分矿床中也存在大气降水混合的现象(见图3)[50][51]。在岩浆演化晚期,随着岩浆的持续结晶分异,F、Cl、B等挥发分不断富集,最终形成富含关键金属元素的岩浆热液。这类热液具有高温、高盐度的特征,能够有效携带钨、锡、铌、钽、锂等金属元素,沿断裂、岩体接触带等通道进行运移。当热液体系遇到温度、压力降低,或与围岩发生交代作用时,其物理化学性质会发生显著改变,金属元素的溶解度随之降低,最终以氧化物、硫化物等形式沉淀,形成各类关键金属矿床。

不同类型关键金属矿床的流体作用过程存在明显差异:钨、锡矿的形成主要与高温热液作用相关,成矿流体以岩浆水为主,混合部分大气降水,且富含挥发分,这些特征为锡石、黑钨矿等矿物的沉淀提供了有利条件;铌、钽、锂矿的形成则与中低温热液交代作用密切相关,热液对花岗岩的蚀变作用(如钠长石化、云英岩化),进一步促进了金属元素的富集与沉淀。整体来看,流体的运移与沉淀过程,受构造活动与岩浆演化的共同控制,形成了“岩浆-流体-构造”的协同耦合效应。

4. 讨论

结合华南东部火成岩与钨锡铌钽锂关键金属成矿的基础地质特征及耦合机制,综合已有研究成果,围绕区域成矿核心科学问题、现存争议及后续研究重点,展开如下讨论,为区域成矿理论深化与找矿实践提供参考。

华南东部关键金属成矿与燕山期火成岩的耦合关系,核心是“壳幔混合供源-岩浆分异富集-构造控制定位-流体驱动成矿”的协同作用,其中高分异花岗岩的演化程度是决定金属元素富集效率的关键因素。前文研究表明,区域内形成铌钽矿的花岗岩分异演化程度最高,形成钨、锡矿的花岗岩分异演化程度中等,这一规律与华南其他成矿带(如南岭西段)具有一致性,但华南东部独特的构造背景(古特提斯与太平洋构造域交汇),使得其岩浆演化过程更具复杂性——古太平洋板块的幕式俯冲与岩石圈伸展拆沉的协同作用,不仅控制了岩浆活动的时空迁移,还影响了壳幔物质混合的比例,进而导致不同成矿带的金属富集特征存在差异。例如,西部内陆花岗岩带以地壳物质重熔为主,幔源物质贡献相对较弱,因此该区域以钨、锡矿为主;东部沿海火山-侵入岩带则受幔源岩浆底侵作用更显著,壳幔混合特征更

突出，因此稀有金属(铌钽锂)矿化更发育，这一差异可为区域找矿方向的精准定位提供依据。

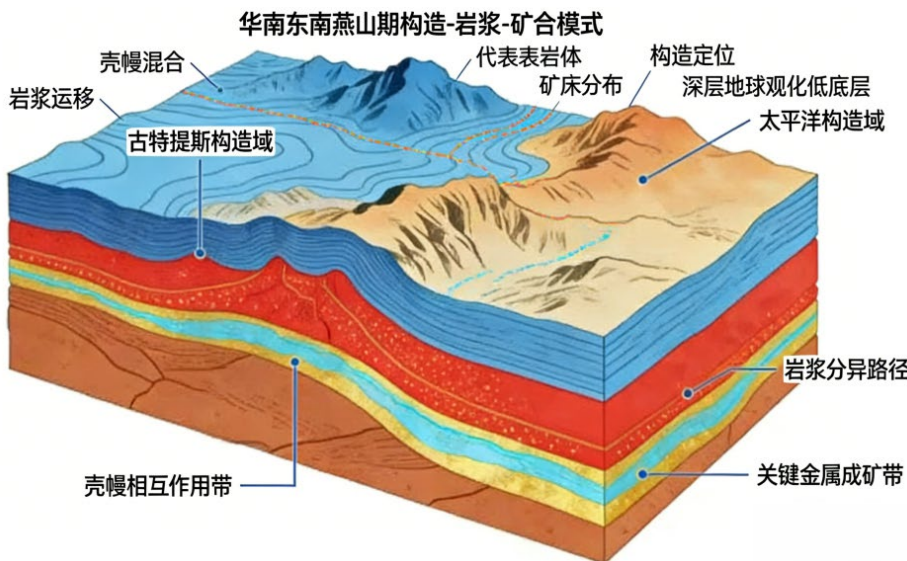


Figure 3. Schematic diagram of the coupling relationship between igneous rocks and key metal mineralization in eastern South China [51]
图 3. 华南东部火成岩与关键金属成矿耦合关系综合示意图[51]

关于成矿物质的壳幔贡献比例，目前学界仍存在争议，这也是制约区域成矿机制深化的核心瓶颈。部分学者认为，华南东部钨、锡元素主要来源于地壳物质重熔，幔源物质仅起到能量供给作用，未直接参与成矿物质供给[24] [32]；但也有研究通过高精度同位素分析发现，部分钨锡矿床中存在幔源同位素信号，表明幔源物质可能直接参与成矿物质的供给[41] [50]。结合本文梳理的岩浆演化特征，笔者认为，华南东部关键金属成矿物质的壳幔贡献具有明显的时空差异性：燕山早期岩浆活动以地壳物质重熔为主，成矿物质(尤其是钨、锡)主要来源于地壳；燕山晚期随着岩石圈拆沉加剧，幔源岩浆底侵作用增强，幔源物质对铌、钽、锂等稀有金属的贡献显著提升，形成“壳源主导、幔源叠加”的物质供给模式。这一观点可通过进一步开展高精度 Sr-Nd-Hf-O 同位素分析，精准量化不同时代、不同类型火成岩的壳幔贡献比例，为争议的解决提供数据支撑。

岩浆分异与流体作用的协同机制，是揭示金属元素从岩浆中活化、迁移至沉淀成矿的关键环节。现有研究已明确，岩浆演化晚期的流体出溶是金属元素分离的核心驱动力，但对于流体出溶的具体时序、流体成分的演化规律，以及流体与围岩交代作用对金属富集的影响，仍需进一步深入研究。结合区域流体包裹体数据[35] [47]，华南东部成矿流体以岩浆热液为主，部分矿床混合有大气降水，且不同类型矿床的流体参数存在显著差异：钨、锡矿成矿流体以高温、高盐度为特征，富含 F、Cl 等挥发分，为黑钨矿、锡石的沉淀提供了有利条件；铌、钽、锂矿成矿流体则以中低温、中低盐度为特征，流体对花岗岩的钠长石化、云英岩化蚀变，进一步促进了金属元素的富集。未来可通过高温高压实验与流体包裹体原位分析相结合的方式，模拟岩浆分异过程中流体出溶的物理化学条件，明确岩浆-流体-围岩的相互作用机制，完善区域成矿流体演化模型。

构造体制转换对成矿的控制作用，仍存在认知分歧，核心争议集中于古特提斯与太平洋构造域转换期的岩浆响应特征及成矿耦合关系。部分学者认为，区域岩浆活动与成矿作用主要受太平洋板块俯冲控制[14] [22]；也有研究提出，古特提斯构造域的残余活动对燕山早期岩浆活动仍有影响[4] [25]。结合区域构造演化历史，本文认为，华南东部中生代岩浆活动与成矿作用，是古特提斯构造域残余作用与太平洋

板块俯冲作用协同控制的结果：燕山早期(180~145 Ma)，古特提斯构造域残余伸展作用为地壳物质重熔提供了有利条件，形成了以钨、锡、铌钽矿为主的成矿阶段；燕山晚期(145~65 Ma)，太平洋板块俯冲后撤引发岩石圈伸展拆沉，幔源物质上涌加剧，推动了稀有金属(锂、铌、钽)的大规模富集，形成了第二期成矿高峰。这一构造-岩浆-成矿的协同演化模式，可为区域成矿时代与成矿规律的梳理提供新的视角。

深部成矿过程与找矿潜力，是当前研究的薄弱环节，也是未来区域找矿突破的核心方向。目前相关研究多集中于地表与浅部矿床，对深部岩浆活动与成矿的耦合关系认知有限。结合地球物理探测数据[33][36]，华南东部深部存在大规模的岩浆房，且深大断裂(如政和-大埔断裂)延伸至深部，为岩浆与流体的运移提供了通道，推测深部可能存在未被发现的大型-超大型关键金属矿床。未来应加强地震成像、大地电磁等深部探测技术的应用，结合数值模拟方法，揭示深部岩石圈拆沉、岩浆底侵的具体过程，建立深部成矿预测模型；同时，结合大数据与人工智能技术，整合区域地质、地球化学、地球物理等各类数据，精准圈定深部找矿靶区，提升区域关键金属资源的勘查效率。

此外，结合新能源产业发展需求，锂、铌、钽等关键金属的成矿规律研究应成为未来的重点方向。华南东部作为我国关键金属资源的重要富集区，加强其成矿机制与找矿潜力研究，不仅能够完善区域成矿理论，还能提升我国关键金属资源的自给能力，为国家资源安全保障提供支撑。未来可重点聚焦花岗岩伟晶岩型、花岗岩型锂铌钽矿床，深入剖析其成矿条件与富集规律，建立针对性的找矿标志，推动区域找矿工作取得新突破。

5. 结论

华南东部火成岩与钨锡铌钽锂等关键金属成矿之间存在紧密的耦合关系，研究表明，区域成矿核心是“壳幔混合供源-岩浆分异富集-构造控制定位-流体驱动成矿”的协同体系，其中构造域转换与幔源贡献差异是控制成矿元素分异的关键：燕山早期古特提斯构造域残余伸展作用主导西部壳源重熔，形成 W-Sn 成矿体系；燕山晚期太平洋板块俯冲后撤引发东部岩石圈拆沉，形成 Li-Nb-Ta 壳幔混合成矿体系。东西部幔源贡献差异源于岩石圈减薄程度不均，西部幔源物质仅提供能量，东部则直接参与成矿物质供给。

当前研究已明确了火成岩与关键金属成矿的基本耦合特征，但在成矿物质来源比例、岩浆-流体协同机制、深部成矿过程等方面仍存在争议。未来通过多学科交叉融合，加强高精度测试技术与深部探测技术的应用，深入剖析火成岩与关键金属成矿的耦合机制，不断完善区域成矿理论，可为华南东部关键金属矿产的深部找矿预测提供重要参考，助力我国关键金属资源安全保障。

参考文献

- [1] 陶继华, 李武显, 李献华, 等. 赣南龙源坝地区燕山期高分异花岗岩年代学, 地球化学及锆石 Hf-O 同位素研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(5): 760-778.
- [2] 王川, 彭建堂, 徐接标, 阳杰华, 胡阿香, 陈宪佳. 湘中白马山复式岩体成因及其成矿效应[J]. 岩石学报, 2021, 37(3): 805-829.
- [3] 赵正, 陈毓川, 王登红, 等. 华南中生代动力体制转换与钨锡铌钽铍钽稀土矿床成矿系列的叠加演化[J]. 岩石学报, 2022, 38(2): 301-322.
- [4] 王芋霖. 华南东部晚中生代岩石圈减薄机制的研究综述[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(6): 973-982.
- [5] 李晓峰, 韦星林, 朱艺婷, 李祖福, 邓宣驰. 华南稀有金属矿床: 类型、特点、时空分布与背景[J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3591-3614.
- [6] 李政, 楼法生, 熊燕云, 等. 华南地区锂矿主要类型、典型矿床地质特征及成矿规律[J]. 中国矿业, 2025, 34(10): 254-266.
- [7] 杨光树, 王凯, 燕永锋, 贾福聚, 李丕优, 毛致博, 周艳. 滇东南老君山锡-钨-铋-铟多金属矿集区含矿矽卡岩成

- 因研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(11): 3333-3354.
- [8] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中, 新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2003, 33(4): 335-343.
 - [9] 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义[J]. 矿床地质, 2017, 36(4): 1003-1008.
 - [10] 余勇, 李祖福, 白令安, 等. 滇西伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 岩石学报, 2022, 38(7): 2052-2066.
 - [11] 邓藤丽, 彭义伟, 程文斌, 等. 扬子西缘摩挲营新元古代高分异花岗岩年龄, 成因和锡钨成矿潜力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(3): 456-479.
 - [12] 周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 韩伟, 曹嘉麟, 李功宇. 东北中生代增生杂岩及对古太平洋向欧亚大陆俯冲历史的制约[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2845-2856.
 - [13] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379-388.
 - [14] 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 305-314.
 - [15] 白晓, 凌文黎, 段瑞春, 等. 扬子克拉通核部中元古代-古生代沉积地层 Nd 同位素演化特征及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(7): 972-983.
 - [16] 陈振宇, 李建康, 周振华, 高永宝, 李鹏. 硬岩型锂-铍-铌-钽资源工艺矿物学评价指标体系[J]. 岩石学报, 2023, 39(7): 1887-1907.
 - [17] 范洪海, 庞雅庆, 何德宝, 等. 华南花岗岩型铀矿成矿作用及成矿预测[J]. 地球学报, 2023, 44(5): 887-896.
 - [18] 沈晓明, 张海祥, 张伯友. 华南中生代变质核杂岩构造及其与岩石圈减薄机制的关系初探[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 11-19.
 - [19] 王靖华, 张复新, 于在平, 等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002(2): 192-196.
 - [20] 袁顺达, 赵盼盼, 刘敏. 与花岗岩有关锡矿成岩成矿作用研究若干问题讨论[J]. 矿床地质, 2020, 39(4): 607-618.
 - [21] 张敏, 牛向龙, 莫凌超, 牛斯达, 吴华英, 周起凤. 阿尔泰山缘托库孜巴依金矿床流体包裹体特征及成矿流体演化[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1171-1185.
 - [22] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
 - [23] 雒恺, 马金龙. 花岗岩风化过程中稀土元素迁移富集机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(7): 692-708.
 - [24] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 528-543.
 - [25] 孙颖超, 陈郑辉, 赵国春, 黄鸿新, 曾乐, 晏超, 伍式崇. 湖南邓阜仙钨铌钽矿花岗细晶岩接触带白云母 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(2): 466-476.
 - [26] 王汝成, 郭斌, 谢磊, 等. 稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化[J]. 地质学报, 2021, 95(1): 182-193.
 - [27] 刘善宝, 郭春丽, 李政. 华南锂矿的成矿类型与找矿潜力[J]. 中国矿业, 2023, 32(8): 45-56.
 - [28] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
 - [29] 郑建平. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程[J]. 科学通报, 2009, 54(14): 1990-2007.
 - [30] 徐晓春, 刘政, 傅仲阳, 许心悦, 谢巧勤. 安徽铜陵矿集区石英闪长岩—花岗闪长岩成因的 Sr-Nd-Hf-O 同位素制约[J]. 地质科学, 2019, 54(3): 711-735.
 - [31] 杨超群. 华南和三江—东南亚钨锡成矿带的区域地质背景和成矿作用特征对比[J]. 地质通报, 1988(1): 1-8.
 - [32] 毛景文, 刘敏, 姚佛军, 等. 当前中国找矿勘查值得关注的问题与发展方向[J]. 矿床地质, 2024, 43(6): 1211-1222.
 - [33] 何珍明, 江媛媛, 刘腾, 等. 华南燕山期花岗岩与钨多金属成矿关系初探[J]. 自然科学, 2015, 3(4): 178-184.
 - [34] 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 谢磊. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. 岩石学报, 2021, 37(11): 3261-3276.
 - [35] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291-304.
 - [36] 刘泽, 陈振宇, 王成辉. 赣西北狮子岭花岗岩型锂-钽矿床的矿物学特征及成矿机制[J]. 岩石学报, 2023, 39(7):

2045-2062.

- [37] 厉子龙, 周静, 毛建仁, 余明刚, 励音骐, 胡逸洲, 汪惠惠. 浙西北木瓜燕山期花岗斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3607-3622.
- [38] 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 935-969.
- [39] 邢光福, 洪文涛, 张雪辉, 赵希林, 班宜忠, 肖凡. 华东地区燕山期花岗质岩浆与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1571-1590.
- [40] 袁依婷, 王勃然, 钱飞. 粤东白垩纪中酸性侵入体成因: 锆石 Hf 同位素约束下的壳幔相互作用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(7): 1003-1015.
- [41] 张伟, 吴鸿翔, 朱孔阳, 张科峰, 邢新龙, 陈东旭, 陈汉林, 章凤奇. 华南东部陆缘侏罗纪岩浆作用特征及其构造背景——来自浙东南毛弄组火山岩的新证据[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3375-3398.
- [42] 赵俊兴, 秦克章, 何畅通, 等. 喜马拉雅琼嘉岗伟晶岩型锂矿成矿地质特征和形成机制[J]. 岩石学报, 2024, 40(9): 2664-2678. 1
- [43] 施睿哲, 赵俊兴, 何畅通, 等. 西藏琼嘉岗伟晶岩型锂矿矿物包裹体形成过程及其对熔-流体特征的指示[J]. 岩石学报, 2024, 40(2): 450-464.
- [44] 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 3029-3042.
- [45] 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 等. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 123-130.
- [46] 高利娥, 曾令森, 严立龙, 高家昊, 赵令浩. 喜马拉雅淡色花岗岩——关键金属 Sn-Cs-Tl 的富集机制[J]. 岩石学报, 2021, 37(10): 2923-2943.
- [47] 王大钊, 梁丰, 王艳军, 等. 斑岩系统中低熔点亲铜元素与稀贵金属赋存状态和富集机制研究: 以藏东南普朗超大型斑岩 Cu-Au 矿床为例[J]. 岩石学报, 2025, 41(2): 621-641.
- [48] 诸泽颖, 柯昌辉, 赵永岗, 等. 内蒙古白云鄂博矿床铌分布规律、赋存状态和富集机制[J]. 岩石学报, 2025, 41(4): 1170-1193.
- [49] 李晓峰, 华仁民, 马东升, 徐净, 张龙, 齐有强, 武丽艳, 朱艺婷. 大陆岩石圈伸展与斑岩铜矿成矿作用[J]. 岩石学报, 2019, 35(1): 76-88.
- [50] 侯泉林, 林伟, 许德如, 闫全人, 刘庆, 何苗, 王智琳, 卫巍, 郭谦谦. 中国东部中生代构造格局与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(6): 1063-1067.
- [51] 秦克章, 翟明国, 李光明, 等. 中国陆壳演化, 多块体拼合造山与特色成矿的关系[J]. 岩石学报, 2017, 33(2): 305-325.