



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：稀有金属成矿的矿物系统、演变规律与矿物空间找矿方法

作者：王汝成

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026133

投稿时间：2026-09-09

录用时间：2026-09-23

预出版时间：2026-09-29

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

稀有金属成矿的矿物系统、演变规律与矿物空间找矿方法

王汝成^{1,2}

WANG Rucheng^{1,2}

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京, 210023 ;

2. 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 江苏 南京, 210023

1. *School of Earth Science and Engineering, Nanjing 210023 , jiangsu , China ;*

2. *State Key Laboratory of Critical Earth Material cycling and mineral deposits, Nanjing*

University, Nanjing 210023 , Jiangsu , china

Mineral Systems, Evolutionary Patterns, and Spatial Mineral Prospecting

Methods for Rare Metal Mineralization

Abstract: [Objective] Rare metals are an important component of strategic critical metals, and their mineralization is closely related to the granite–pegmatite system. As the direct products of mineralization, the crystallization behaviors and evolutionary patterns of rare-metal minerals provide an essential basis for understanding metallogenic mechanisms, assessing resource potential, and predicting ore-forming districts. [Methods] A systematic analysis on rare-metal minerals in different geological and metallgenic settings has been carried out. [Results] This paper identifies (hydro)oxides, silicates, and phosphates as the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230809, 92462302)

This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 42230809, 92462302).

第一作者及通信作者: 王汝成 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事稀有金属矿物学和花岗岩成矿理论研究。Email:

rcwang@nju.edu.cn

main types of rare-metal ore minerals and systematically analyzes their mineralogical characteristics. On a global scale, it investigates the evolutionary features of these minerals during key geological periods, revealing the coupling relationship between rare-metal mineralization and supercontinent assembly–breakup cycles. Based on differences in elemental electronegativity, the relationship between the chemical behavior of rare elements and their mineralization capacity is established, elucidating the fundamental pathways of rare-metal enrichment and mineralization. At the scale of ore bodies, it systematically analyzes the crystallization sequence of lithium minerals and constructs a generalized evolutionary framework for lithium mineralization in rare-metal pegmatites. Furthermore, from the perspective of compositional evolution in Nb–Ta and Zr–Hf minerals, a multi-dimensional tracing system for rare-metal mineralization is developed. **[Conclusions]** This paper constructed a comprehensive mineral system for rare-metal mineralization, established a mineral-centered mineralization framework, and deepened the understanding of its evolutionary regularities. **[Significance]** This work will promote the establishment of a spatial prospecting methodology based on mineralogical responses, thereby providing theoretical support for rare-metal resource exploration.

Keywords: rare metals; rare-metal mineral paragenesis; mineral system; rare-metal mineral evolution; spatial mineral prospecting method

摘要：稀有金属是战略性关键金属的重要组成，其成矿作用主要与花岗岩、伟晶岩体系密切相关。作为成矿作用的直接产物，稀有金属矿物的结晶行为和演化规律，是理解成矿机制、资源潜力和预测成矿区域的重要依据。文章通过确定（氢）氧化物、硅酸盐和磷酸盐作为主要稀有金属成矿矿物类型，系统分析了稀有金属矿物特征；在全球尺度上，追溯重要地质时期稀有金属矿物的演化特征，探讨稀有金属成矿与超大陆聚合–裂解之间的耦合关系；基于元素电负性差异，建立稀有元素化学行为与稀有金属成矿能力之间的关系，阐明稀有金属富集和成矿路径的本质；在成矿体尺度上，系统分析锂矿物的结晶序列，构建稀有金属伟晶岩的普适性锂成矿演化规律；同时，利用铌–钽矿物、锆–铪矿物成分演变信息，构建多维度成矿示踪体系。文章构建了稀有金属成矿的矿物系统，形成了“以矿物为核心”的成矿系统，并深化了对稀有金属成

矿演化规律的认识。本文的认识将推动形成基于矿物学响应的空间找矿方法体系，为稀有金属资源勘查提供理论支撑。

关键词：稀有金属；稀有金属矿物序列；矿物系统；稀有金属矿演变；空间矿物找矿方法

中图分类号：P618 文献标识码：A

DOI: 10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2026133

0 引言

关键金属是国家社会经济发展不可或缺的战略性的矿产资源，但在供应安全方面面临较高风险，或具有一定的战略优势，其安全稳定供给直接关系到国家资源安全（侯增谦等，2020）。当前，中国高度重视关键金属资源的保障工作，已推动并实施了国家自然科学基金“战略性关键金属超常富集成矿动力学重大研究计划”等一系列重大研究项目和行动计划。稀有金属作为关键金属的重要组成部分，在新能源、新材料和先进技术等新兴领域具有重要的保障作用。

稀有金属矿物是稀有金属成矿的产物，它们广泛分布于高分异花岗岩岩体内部、以及花岗岩内或围岩中的石英脉、云英岩、矽卡岩等地质体中。从成因机制上看，稀有金属的富集、运移和沉积是岩浆作用与热液作用共同驱动的结果。因此，稀有金属矿物的结晶贯穿于花岗岩成矿系统的各个阶段，表现出显著的演化序列特征。文章在前期研究基础上，拟系统探讨稀有金属矿物的基本特征、大陆演化过程中的矿物演化规律、稀有金属的富集与成矿路径，以及花岗质岩浆分异过程中稀有金属矿物的演化趋势等。该文旨在强化以矿物为核心的稀有金属成矿系统研究，逐步建立稀有金属矿物系统框架，并提出稀有金属矿物空间找矿方法，为进一步完善稀有金属成矿规律和拓展高效找矿实践提供矿物学方案。

1 稀有金属元素的地球化学特征

稀有金属通常指自然界中地壳丰度低、储量有限、分布分散的一类金属，主要包括锂（Li）、铷（Rb）、铯（Cs）、铍（Be）、锆（Zr）、铪（Hf）、铌（Nb）、钽（Ta）、锡（Sn）和钨（W）等。在哥尔德斯密特的元素分类体系中，稀有金属均属于亲石元素（图1）。根据离子半径和电荷差异，可将其进一步划分为大离子亲岩元素（LILE）和高场强元素（HFSE）（Lee，2016），前者包括碱金属（Li、Rb 和 Cs）和碱土金属（Be），而后者则多为难熔金属，如 Zr、Hf、Nb、Ta 和 W。

铁，亲铁元素	硫化物，亲硫元素	硅酸盐，亲石元素	气体，亲气元素	有机质，亲生物元素
Fe, Ni, Co P, (As), C Ru, Rh, Pd Os, Ir, Pt, Au Ge, Sn Mo, (W) (Nb), Ta (Se), (Te)	(O), S, Se, Te Fe, Cr, (Ni), (Co) Cu, Zn, Cd, Pb Sn, Ge, Mo Ag, (Au), Hg Pd, Ru, (Pt) Ga, In, Tl (Cr)	O, (S), (P), (H) Si, Ti, Zr, Hf, Th Sn F, Cl, Br, I B, Al, (Ga), Sc, Y La, Ce, Pr, Nd, Sm Eu, Gd, Tb, Dy Ho, Er, Tu, Yb, Cp Li, Na, K, Rb, Cs Be, Mg, Ca, Sr, Ba (Fe), V, Cr, Mn (Ni), (Co), Nb, Ta W, U, (C)	H, N, C, (O) Cl, Br, I He, Ne, Ar Kr, X	C, H, O, N, P S, Cl, I, (B) (Ca, Mg, K, Na) (V, Mn, Fe, Cu)

图 1 哥尔德斯密特元素分类体系中的稀有金属（红色圈内金属，原图源自 Goldschmidt, 1937）

Fig. 1 Rare metals in the Goldschmidt classification system
(metals inside the red circle, original image from Goldschmidt, 1937)

稀有金属在自然界中极为稀少，主要受限于其在地壳中的丰度普遍较低（Rudnick and Gao, 2014），除锆（Zr）含量约为 132 $\mu\text{g/g}$ 外，多数稀有金属元素的地壳丰度低于 100 $\mu\text{g/g}$ ，其中钽（Ta）含量最低，仅为 0.7 $\mu\text{g/g}$ 。稀有金属的成矿作用主要与花岗岩、伟晶岩及碳酸岩等岩浆岩密切相关（表 1），尤其以花岗岩和伟晶岩的关联最为紧密（Linnen and Cuney, 2005）。从全球分布来看，稀有金属矿床多赋存于大型花岗岩区和成矿带中（Romer and Kroner, 2016）。例如，欧洲华力士造山带自伊比利亚半岛延伸至波希米亚地块，是著名的花岗岩型稀有金属成矿省（Marignac and Cuney, 1999）；华南多时代花岗岩省遍及湘、赣、浙、闽、粤、桂、苏、皖等八省（区），出露面积约 20 万 km^2 （王汝成等, 2026）；东南亚印支期花岗岩带是全球最重要的锡成矿带之一，自苏门答腊岛向北经马来半岛，直至西藏东部边缘（Schwartz et al., 1995）；喜马拉雅淡色花岗岩带传统上以碰撞型花岗岩著称，但最新研究表明，其同样是一条重要的稀有金属成矿带（王汝成等, 2017；Wuet al., 2024）。

表1 与稀有金属成矿有关的岩石类型

Table 1 Major types of rocks associated with rare-metal mineralization

稀有金属	碳酸岩型	碱性 - 过碱性 花岗岩和正长 岩型	高分异花岗岩 型	花岗伟晶岩型
Li			Li	Li
Rb-Cs			Cs	Rb, Cs
Be		Be	Be	Be
Zr-Hf	Zr	Zr	Zr (Hf)	Zr, Hf
Sn				
Nb-Ta	Nb	Nb (Ta)	Ta, Nb	Ta (Nb)
W				

2、从矿物分类揭示稀有金属矿物的基本特征

稀有金属元素大多发现于 19 世纪，其认识多始于矿石利用研究。1817 年，瑞典科学家阿尔夫维德森在分析一种白色矿石时，并推断出其中含有一种未知金属，并将其命名为“锂”；1798 年 2 月，法国化学家沃克林基于法国矿物学家阿羽对祖母绿宝石中可能存在新元素的推测，宣布发现金属铍。钪是稀有金属中发现最晚的一种，于 1923 年由乔治·查尔斯·德·赫维西和迪克·科斯特在产自挪威的锆石中识别确认。截止目前，根据国际矿物学协会（IMA）公布资料，自然界目前已发现的含有锂、铍等稀有金属元素的矿物共 833 个（表 2）。然而，受元素自身地壳丰度和晶体化学性质的影响，不同稀有金属的矿物种类数量差别较大。例如，铈矿物有 172 个，而钽矿物仅有 61 个；锆矿物有 148 个，但已知的独立钪矿物仅有一种（钪石）；铷矿物亦仅有 3 个；铯因原子半径最大，多数晶体结构难以容纳，因此铯矿物也仅发现 27 个。

表2 稀有金属发现史及矿物种数

Table 2 Discovery history and numbers of mineral species of rare metals

稀有金属	元素发现年（发现元素的矿物）	矿物种数
Li	1817 年（透锂长石）	123
Rb	1861 年（锂云母）	3
Cs	1860 年（铯沸石）	27

Be	1797 年（绿柱石）	134
Zr	1789 年（锆石）	148
Hf	1923 年（锆石）	1
Sn	不明	110
Nb	1801 年（铌铁矿）	172
Ta	1802 年（铌铁矿）	61
W	1779 年（黑钨矿）	55
合计		833

据英国皇家化学学会网站资料 (<https://www.rsc.org/>)

稀有金属基本上属于亲石元素范畴。对已发现矿物的成分统计分析表明，稀有金属矿物主要以（氢）氧化物、硅酸盐和磷酸盐为主（表 3）。根据国际矿物学协会（IMA）矿物列表数据，123 种锂矿物中，硅酸盐矿物占 90 种，磷酸盐矿物为 18 种；在 134 种铍矿物中，硅酸盐矿物 79 种，磷酸盐矿物 33 种，（氢）氧化物 14 种；铌、钽矿物中，这三类矿物的占比亦超过 90%。总体而言，目前已发现的 833 种稀有金属矿物中，约 84% 属于（氢）氧化物、硅酸盐或磷酸盐矿物。

表 3 稀有金属矿物分组信息

Table 3 Groups of rare metal minerals

稀有金属	矿物总数	分类矿物种数			分类矿物占比			
		（氢）氧化物	硅酸盐	磷（钨）酸盐	（氢）氧化物	硅酸盐	磷（钨）酸盐	总计
Li	123	9	90	18	7%	73%	15%	95%
Rb	3	1	2		33%	67%	0%	100%
Cs	27	4	17	1	15%	63%	4%	79%
Be	134	14	79	33	10%	59%	25%	94%
Zr	147	13	99	7	9%	67%	5%	81%
Hf	1		1		0%	100%	0%	100%
Sn	110	31	15	0	28%	14%	0%	42%
Nb	172	88	73		51%	42%	0%	93%
Ta	61	56	2		92%	3%	0%	95%
W	55	20	6	23	36%	11%	42%	89%

总计	833	236	384	82	28%	46%	10%	84%
----	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----

据国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会资料 ([https://cnmnc.units.it/files/editor/IMA_Master_List_\(2026-09\).pdf](https://cnmnc.units.it/files/editor/IMA_Master_List_(2026-09).pdf))

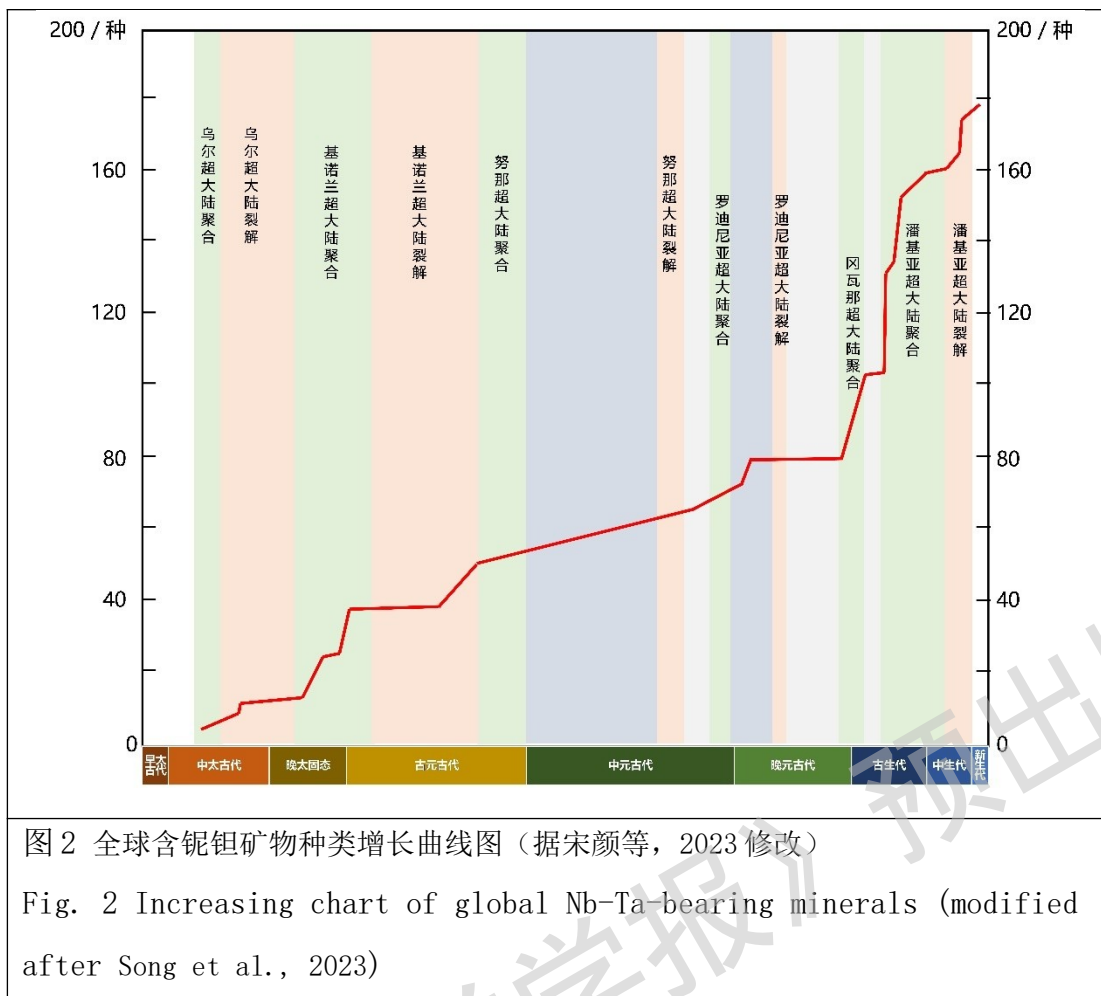
3、从矿物演化特征揭示稀有金属成矿与超大陆聚合-裂解之间的成因联系

作为亲石元素，稀有金属的富集和成矿与大陆演化之间具有显著的成因联系，因此，稀有金属矿物的结晶过程可以直接响应并记录大陆演化的关键阶段。

郭承基和王中刚（1981）最早提出了关于稀有金属矿物演化的重要认识。他们认为，花岗岩及花岗伟晶岩的演化是地壳演化的重要组成内容，在此过程中，矿物种类与矿物组合亦随之发生相应变化，并据此系统总结了我国稀有金属矿物种类由老至新的演化规律。

进入二十一世纪以来，国际学术界日益重视稀有金属成矿作用与早期大陆演化之间关系的研究。Tkachev（2011）、McCauley and Bradley（2014）指出，非洲南部巴伯顿绿岩带发育全球最古老的伟晶岩，其中赋存绿柱石以及锂、锡、钽等稀有金属矿物。Grew et al.（2018）对斯维斯拉 Sinceni 稀有金属花岗伟晶岩开展了研究，确认其形成年龄约为 30 亿年，并从中研究发现了锂云母、锂电气石、铌锰矿、细晶石、钨锰矿等稀有金属矿物，证实中、晚太古代已出现稀有金属矿物的结晶作用。这一全球性事件可能与乌尔-基诺兰超大陆的演化密切相关，并促使同时代西澳（如 Greenbush）、北美（如 Tanco）等太古代稀有金属伟晶岩的大规模发育，这些伟晶岩已成为当前最为重要的锂、钽成矿类型之一。此外，其他时期的稀有金属成矿作用则分别对应于哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆、冈瓦那超大陆和潘基亚超大陆的聚合与裂解事件，并终结于新生代印度板块与亚洲板块的碰撞作用。

基于开源的全球矿物综合数据库（RRUFF）中全球铌钽矿物数据，宋颜等（2023）系统统计分析了铌钽矿物的种类（179 种）、数量（1,488 个）及其在地质历史时期地理空间分布的变化特征与演变规律。结果表明，铌钽矿物的种类与数量在地球演化过程中呈累积增长趋势，且增长过程具有明显的阶段性特征。尤其在基诺兰超大陆聚合期、潘基亚超大陆聚合期及其裂解期，均出现了显著的增长高峰（图 2）。



4、从元素化学性质角度揭示稀有金属富集和成矿路径的本质

晶体在均一液相（溶液或熔体）中的结晶过程，通常包含过饱和介质的形成、成核作用的发生和晶体的生长三个阶段，因此，晶体形成的关键在于介质中溶质达到过饱和状态并引发成核作用。稀有金属成矿主要与花岗岩、伟晶岩有关，因而稀有金属矿物的结晶过程直接受控于其在熔体中的饱和溶解度。早期学者曾利用人造花岗岩材料开展稀有金属饱和溶解度的实验研究（Harrison and Watson, 1983; Linnen and Keppler, 1997; London et al., 1998），并获得了锂、铍、铯等元素在花岗质熔体中的溶解度数据。Evensen et al. (1999) 系统评估了绿柱石在花岗岩熔体中的溶解度随温度的变化关系，在 800° C 时过铝质熔体中的溶解度约为 267 $\mu\text{g/g}$ Be。针对伟晶岩熔体中锂的溶解度实验研究结果显示，在锂辉石等锂铝硅酸盐矿物结晶之前，伟晶岩熔体中锂的饱和溶解度至少需要达到约 6000 $\mu\text{g/g}$ ，甚至可能要高约 11000 $\mu\text{g/g}$ (Maneta et al., 2015)。London et al. (1998) 的实验研究表明，花岗质熔

体中铯的溶解度要高很多，在最低稳定熔化温度条件下（水压 200 MPa，温度 675° C），含水花岗岩熔体中饱和铯沸石时的 Cs₂O 含量可达 5.1 %，相当于熔体中 Cs 含量需超过 48000 μg/g，才能促使铯沸石结晶析出。显然，花岗质熔体中稀有金属的溶解度存在显著差异，其根本控制因素在于稀有金属在熔体中的扩散行为（Yang et al., 2016）。元素在介质中的迁移特性通常可以通过电负性加以表征。电负性反映了原子在化合物中吸引成键电子的能力，其值越大，元素的活性越强，反之则越弱。铯是金属元素中电负性最低的元素，仅为 0.79，因而其在熔体中的扩散能力最弱，难以达到铯沸石等矿物结晶所需的饱和浓度，这也解释了为何铯的溶解度可高达 5.1 % Cs₂O。通过对比稀有金属电负性与溶解度的关系，可以发现二者几乎可以呈负相关趋势（图 3），从而可以从元素化学性质的角度解释稀有金属溶解度的变化规律。

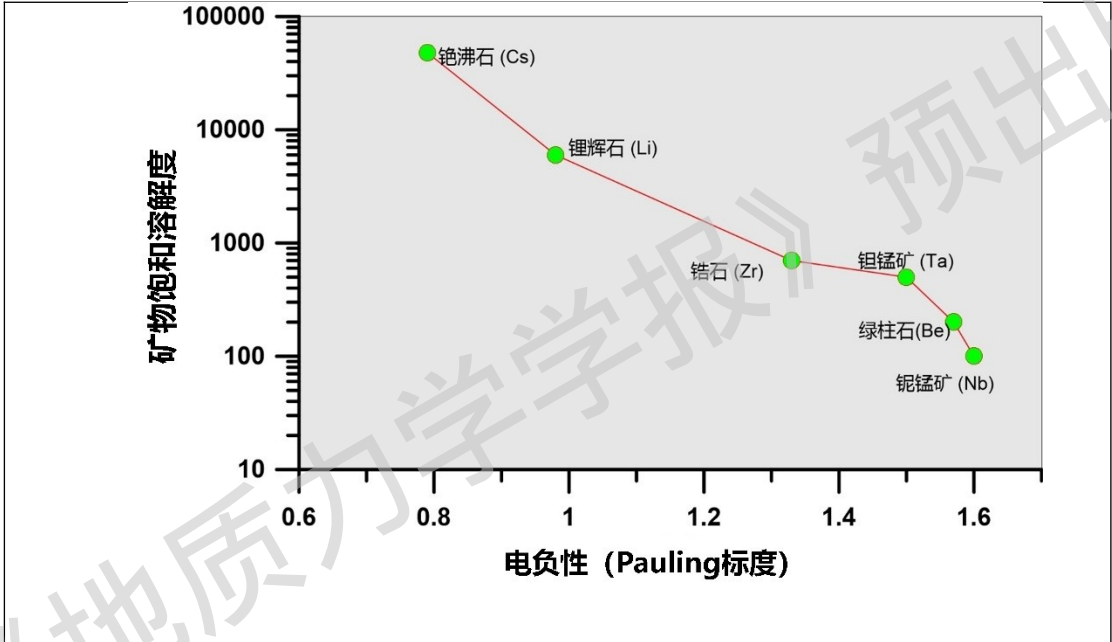


图 3 稀有金属元素电负性（相对 Pauling 标度值）与花岗质熔体饱和溶解度的关系（电负性数据英国皇家化学学会网站资料：<https://www.rsc.org/>）

Fig. 3 Relationship between electronegativity of rare elements (relative to Pauling scale) and saturated solubility in granite melt (data of electronegativity after UK Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/>)

稀有金属溶解度的差异在一定程度上制约了其在花岗岩演化过程中的成矿行为。当前广泛接受的稀有金属成矿模式认为，花岗岩的分异结晶可促使稀有金属在残余熔

体中逐步富集并最终成矿。显然，稀有金属的溶解度越大，其矿物结晶所需的残余熔体中金属浓度阈值就越高，因此，从分异结晶的角度来说，这类金属的成矿作用将发生的越晚。这种差异在时空上表现为稀有金属成矿的先后顺序，这一认识可进而用于解释稀有金属伟晶岩的区域分布特征，即：靠近花岗岩母体的伟晶岩以铍成矿为主，向外依次过渡为铌钽矿化伟晶岩，而最远端则为锂-铯-钽成矿伟晶岩（LCT 伟晶岩），这一空间分带模式与不同元素溶解度的差异及其在熔体演化中的行为密切相关。

部分稀有金属元素表现出流体亲和性，尤其钨是强烈亲流体金属，其成矿通常都是位于花岗岩体的外围，并受热液流体热力学和动力学形成我国学者提出的“五层楼”式石英脉型黑钨矿矿体空间分布特征。另一方面，成矿流体交代钙质围岩则导致以白钨矿为特色的成矿作用发生，这不仅在传统的块状矽卡岩型钨矿中极为常见，也在湘南地区的条带状矽卡岩中成为主要的钨矿物。

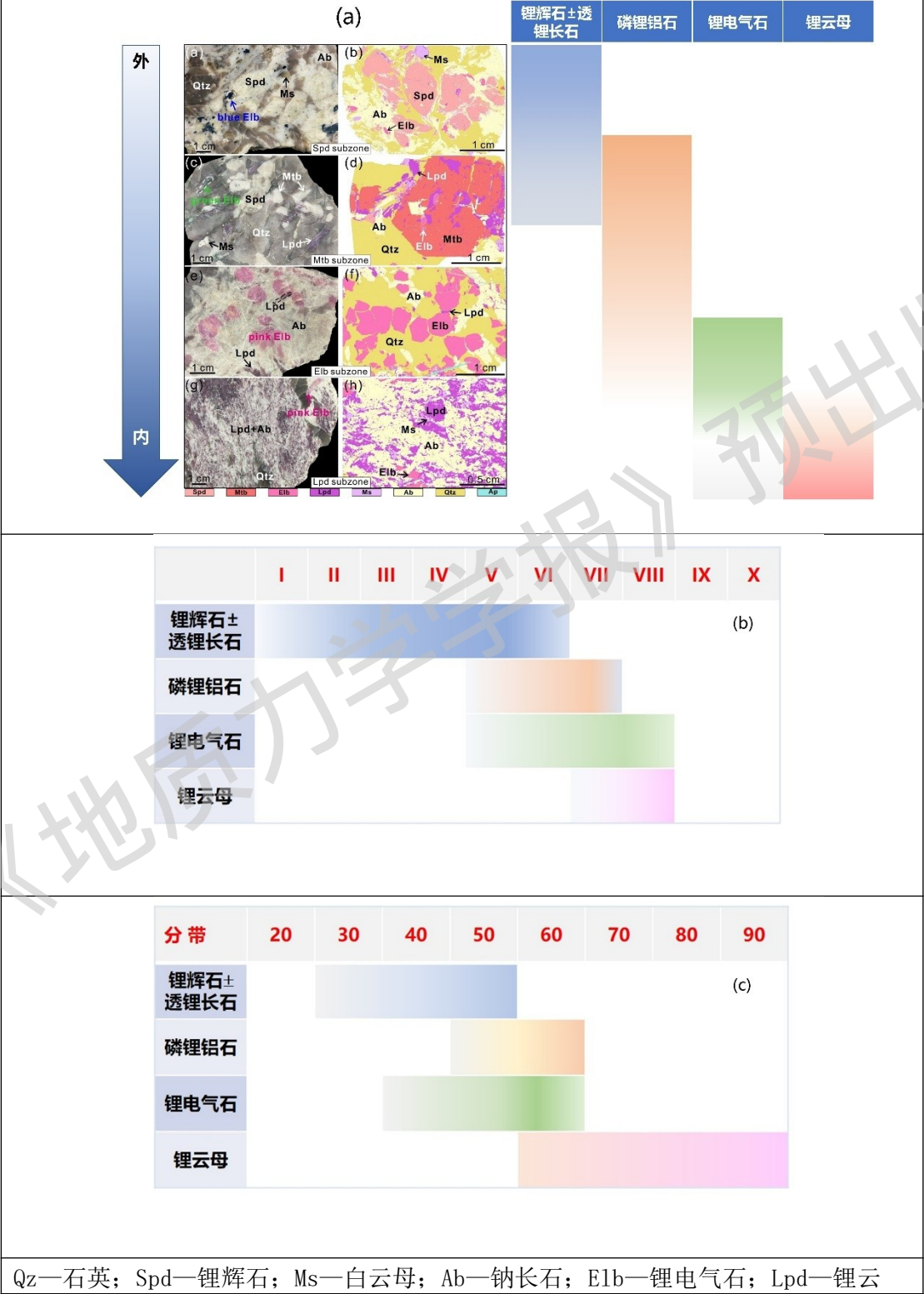
5、基于系统分析，构建花岗质岩浆分异过程中稀有金属矿物演化规律

大量实验研究表明，稀有金属在花岗质熔体中的行为存在显著差异，主要表现为：①稀有金属在残余熔体中不断富集；②含助熔剂的残余熔体可进一步析出流体，并逐步向岩浆-热液环境演变，最终进入热液系统；③稀有金属在岩浆阶段和热液阶段的行为不同，导致矿化组合呈现多样化。因此，一般认为从花岗质岩浆演化为矿化花岗岩、伟晶岩或热液脉体，涉及多个连续的地质过程。基于此，稀有金属成矿可以区分为3个主要阶段：岩浆阶段、岩浆-热液过渡阶段和热液阶段。

锂、铍等稀有金属的矿物种类均超过100种，但其中仅有少数几种具有工业利用价值，成为重要的矿石矿物，如锂云母、锂辉石，或绿柱石、（羟）硅铍石等。值得注意的是，即便在同一个成矿体内，这些矿石矿物也常表现出复杂的矿物共生关系。因此，特定稀有金属矿物是否存在有规律性的演化特征，是一个必须回答的重要科学问题。

许多稀有金属伟晶岩具有明显的内部分带结构，由外向内通常可划分为外部带、边部带、中间带和核部带。大量研究表明，不同结构带中稀有金属矿物的特征存在明显差异。因此，此次研究试图通过伟晶岩中矿物空间分布特征的系统解剖，构建稀有金属矿物在伟晶岩中的演化序列。秦岭南阳山是中国最早开展系统研究的稀有金属伟晶岩之一（张玉铭，1975），其内部带结构清晰，稀有金属矿物以铌、铍、钽（铌）、铯矿物为主，锂矿物尤为丰富，包括锂辉石、透锂长石、锂电气石、磷锂铝石和锂云

母等。系统分析显示（Yang et al., 2022），这些锂矿物的结晶呈现明显的时序性：锂辉石和透锂长石最早结晶；伴随着伟晶岩结晶演化，锂磷酸盐矿物（如磷锂铝石）开始结晶；当熔体中硼含量升高后，锂电气石得以形成；而至伟晶岩演化晚期，则以鳞片状锂云母的出现为特征，总体上表现出明显的交代成因特征（图 4a）。



母；Mbs—磷锂铝石

a—河南南阳山伟晶岩（据 Yang et al., 2022）；b—新疆可可托海三号伟晶岩（据王贤觉等, 1981）；c—加拿大Tanco 伟晶岩（据 Stilling et al., 2006）

图4 稀有金属伟晶岩中锂矿物演化序列

Fig. 4 Summarized evolution sequences of Li minerals in rare-metal pegmatites.

(a) Nanyangshan pegmatite, Henan (after Yang et al., 2022); (b) Koktokay No. 3 pegmatite, Xinjiang (after Wang et al., 1981); (c) Tanco pegmatite, Canada (after Stilling et al., 2006).

Qz—quartz; Spd—spodumene; Ms—muscovite; Ab—albite; Elb—elbaite; Lpd—lepidolite; Mbs—montebrasite

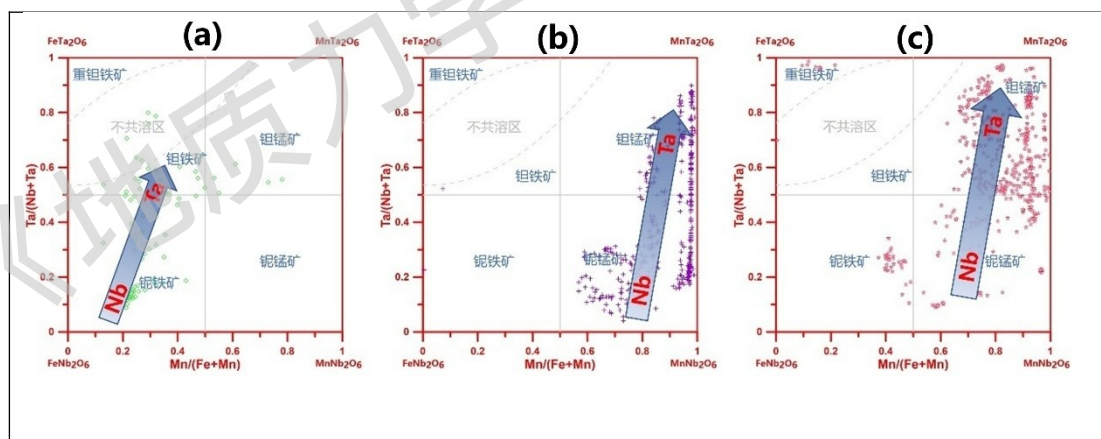
基于上述演化规律，Yang et al. (2022)进一步对全球 58 个锂成矿伟晶岩中的锂矿物开展系统分析，发现其均呈现类似的锂矿物演化趋势。以中国著名的新疆可可托海三号伟晶岩岩为例，其内部可划分成 10 个结构带，其中锂辉石和透锂长石主要产于 III 到 V 带，磷锂铝石和锂电气石则集中分布在 VI 和 VII 带，而锂云母在 VIII 带最为发育（图 4b），并包括强烈富铯的锂云母（Wanget al., 2007）。加拿大 Tanco 伟晶岩中锂矿物的演化特征亦与此基本一致（图 4c）。尽管部分伟晶岩中锂铝硅酸盐、磷酸盐和硼酸盐矿物不一定全部出现，但总体演化序列保持不变。这一发现突破了传统单一矿物标型研究的局限，将不同锂矿物的生成与转化过程纳入统一的演化框架。该理论成果不仅深化了对伟晶岩岩浆—热液演化全过程的认知，更重要的是，为野外快速识别高成矿潜力区段、精确定位锂矿化富集中心提供了切实可行的矿物学标型体系，有效缩短了从异常区发现到靶区验证的勘查周期。

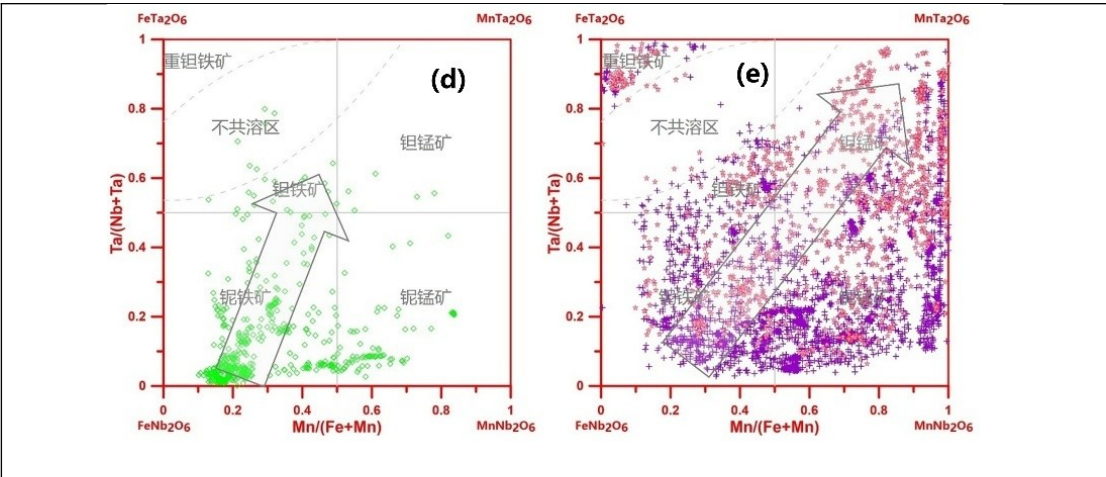
6、从成分演变角度构建多维度稀有金属成矿示踪体系

稀有金属中的 Zr 和 Hf、Nb 和 Ta 因地球化学性质高度相近，常被称为“地球化学孪生元素”（geochemical twins）。在自然界中，这两对元素总是共生存在，并且形成广泛的固溶体系列矿物，例如锆石—铪石系列、铌铁（锰）矿—钽铁（锰）矿系列，以及烧绿石—细晶石系列等。在花岗岩、伟晶岩的结晶演化过程中，这些矿物的化学成分亦会随岩浆分异程度的提高而发生系统性的变化。

铌铁（锰）矿 - 钽铁（锰）矿系列的矿物成分为 $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ ，其四个端元矿物分别为铌铁矿 FeNb_2O_6 、铌锰矿 MnNb_2O_6 、钽铁矿 FeTa_2O_6 和钽锰矿 MnTa_2O_6 ，均属于正交晶系。值得注意的是，成分为 FeTa_2O_6 的矿物还可以是四方晶系的重钽铁矿，并与正交晶系矿物之间存在不共溶区间。该系列的矿物的分类和演变趋势通常采用 $\text{Ta}/(\text{Nb}+\text{Ta})-\text{Mn}/(\text{Fe}+\text{Mn})$ 四方图解进行投图分析（图 5）。显然，该系列的成分变化主要体现在 2 个方向：①Nb—Ta 方向的替换；②Fe—Mn 方向的替换。

大量实验研究表明，花岗质熔体中铌铁矿系列矿物的溶解度存在系统性差异，总体表现为钽端元的溶解度大于铌端元（Linnen and Keppler, 1997; Van Lichtenvelde et al., 2011; Tang et al., 2016; McNeil et al., 2020），这是影响该系列矿物成分演变的主要因素。因此，随着花岗质熔体的持续结晶，晚阶段结晶的铌钽矿物将更富钽，同时 Mn 含量也呈增高趋势。基于此，通常可识别出 2 种铌钽矿物演变趋势：①铌铁矿→钽铁矿的演变路径（图 5b、5c）；②铌铁矿→铌锰矿→钽锰矿的演变序列（图 5b、5c）。这一趋势可以体现在复式岩体早期岗岩到晚期花岗岩中铌钽矿物的演化，也会可见于独立的稀有金属花岗岩中从早阶段岩相到晚阶段岩相中的矿物成分变化，如宜春黄玉-锂云母花岗岩中，早阶段底部岩相以铌锰矿为主，而上部岩相则以钽锰矿为主（Huang et al., 2002）。





a—江西松树岗花岗岩；b—江西宜春花岗岩；c—新疆可可托海三号伟晶岩；

d—准铝质 NYF 系列花岗岩-伟晶岩； e—过铝质 LCT 系列花岗岩-伟晶岩

图 5 钽铁（锰）矿—钽铁（锰）矿系列矿物成分的 $Ta/(Nb+Ta)-Mn/(Fe+Mn)$ 四方图解

Fig. 5 Plots in $Ta/(Nb+Ta)-Mn/(Fe+Mn)$ diagram for columbite-tantalite series minerals.

(a) Songshugang granite, Jiangxi; (b) Yichun granite, Jiangxi; (c) Kokokay No.3 pegmatite, Xinjiang; (d) Metaluminous NYF-family granite-pegmatites; (e) Peraluminous LCT-family granite-pegmatites.

Černý et al. (1991) 将花岗伟晶岩分类 LCT 和 NYF 2 个系列，王汝成等 (2026) 进一步提出，稀有金属花岗岩亦可类比划分为 LCT 和 NYF 2 个系列，其中 LCT 系列伟晶岩或花岗岩均以过铝质为关键地球化学判别标志，而 NYF 系列则为准铝质岩石。根据文献数据在 $Ta/(Nb+Ta) - Mn/(Fe+Mn)$ 图解中的投图结果可见，准铝质 NYF 系列花岗岩中的钽钽矿物以钽铁矿为主，并向钽铁矿演化（图 5d），而对于过铝质 LCT 系列花岗岩而言，钽钽矿物的成分则更为复杂，演化程度更高，表现为由钽铁矿向钽锰矿演化的趋势（图 5e）。

锆石作为常见的副矿物，其晶体结构中始终含有 Hf 元素，因此其晶体化学式通常表示为 $(Zr, Hf)SiO_4$ 。Von Knorring (1961) 首次报道了富 Hf 锆石，表明钬可在锆石晶格中显著富集。钬石作为锆石结构的端元矿物，最早由 Correia (1974) 在莫桑比克花岗伟晶岩中发现。然而，锆石与钬石之间的连续演变关系，直到 2013 年才

在可可托海一号伟晶岩中得到明确证实（Yin et al., 2013; 图6）。

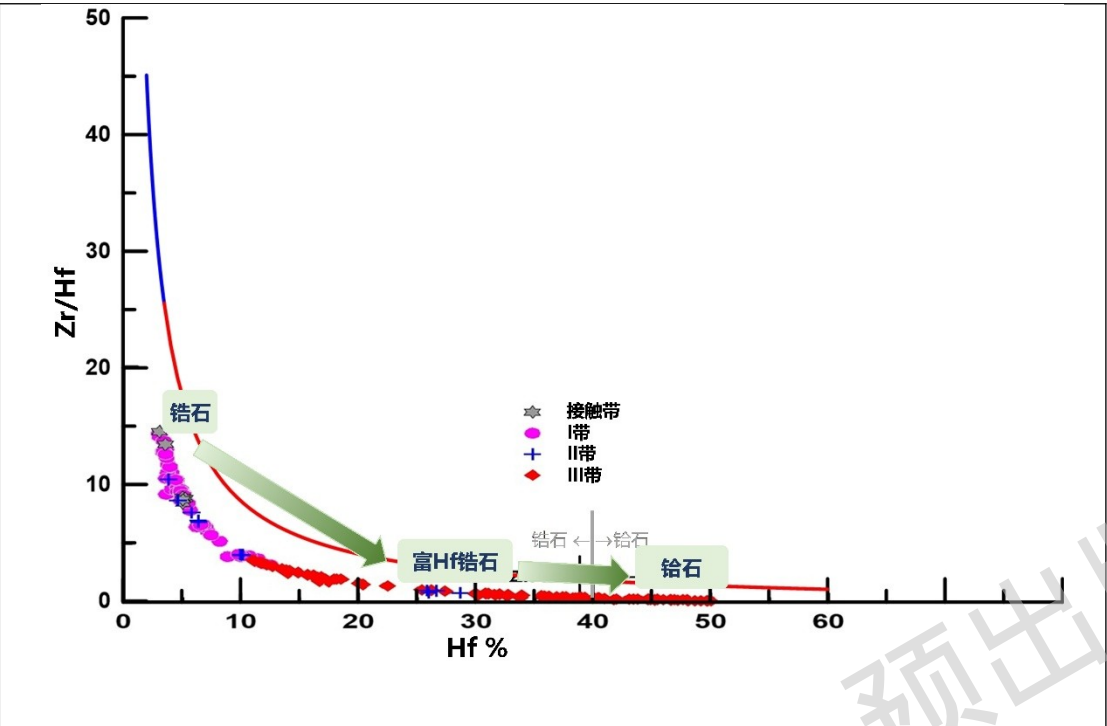


图6 新疆可可托海一号伟晶岩中锆石的Hf-Zr/Hf图解，显示随熔体演化锆含量逐渐升高（Yin et al., 2013）

Fig. 6 The Hf - Zr/Hf diagram of zircon for the Koktokai No.1 pegmatite in Xinjiang, showing gradually increasing hafnium content in zircon with melt evolution (Yin et al., 2013).

7、展望：矿物演化规律与矿物空间找矿方法

总体来说，稀有金属元素具有相似的显著亲石的地球化学性质，但是它们在花岗质岩浆演化过程中的行为其实并不完全相同，上述揭示的稀有金属矿物的结晶行为和演变特征都说明，稀有金属元素之间、或稀有金属之间存在时空演变关系。有意义的是，这一关系可以用于构建矿物空间找矿方法，为稀有金属资源勘查提供理论支撑。

（1）基于矿物标志判别矿床类型。稀有金属成矿通常经历岩浆、岩浆-热液和热液3个阶段，尤其锂、铍等金属的成矿可以跨越完整成矿周期，但是它们在不同阶段的稀有金属矿物具有鲜明的环境控制特征，如湘南地区柿竹园、香花岭等矿床铍成矿类型多样，但可以通过铍矿物种类确定成矿类型，（羟）硅铍石是云英岩中最常见的铍矿物，而在碳酸盐围岩中最为常见的是金绿宝石，可成为花岗岩地区寻找铍成矿信

息的有用矿物方法。

(2) 基于成矿类型演变追踪矿体分布。对于流体活动性稀有金属，如 Li、Rb、Cs、Be、Sn、W 等，热液流体扩散可以导致更广范围的成矿作用。考虑到热场和流体场的互馈效应，交代蚀变作用很可能展现成矿类型分带与成矿组合分带。香花岭地区的含矿条纹岩是一种特殊的条带状矽卡岩（赵一鸣等，2017），靠近花岗岩体的近端条纹岩以 Li-Sn-Rb 成矿组合为主（富 Rb 铁锂云母和锡石），而远离岩体的条纹岩中 Be-(Sn) 成矿更为重要（含 Be 珍珠云母、金绿宝石和含 Sn 尼日利亚石）。

(3) 基于矿物演变规律查找矿体。高分异伟晶岩是当前寻找锂矿的重要岩石，研究显示，伟晶岩内部演化形成的结构带也是锂矿物演变的空间分布带，这一规律可以用于快速确定野外锂成矿伟晶岩的空间关系，为构建伟晶岩锂矿的矿物空间找矿方法提供了重要的理论框架。喜马拉雅淡色花岗岩带中发现了多个以锂辉石和透锂长石为特征的稀有金属伟晶岩（Liu 等，2020），如琼嘉岗、洛扎等，很有意义的是，在这些锂成矿伟晶岩地区，陆续发现了演化程度更高的 Li-Cs 伟晶岩，其中锂电气石和锂云母也成为重要锂矿物，同时铯沸石和铯锂云母大量出现（胡方泱等，2023；徐渴鑫等，2025；徐志豪等，2026），证实伟晶岩不同演化阶段代表性稀有金属矿物不同，形成的稀有金属成矿作用也不同。

8、结论

文章在综述文献成果的基础上，从稀有金属矿物角度，聚焦稀有金属成矿规律，系统研究“以矿物为核心”的成矿系统，构建了稀有金属成矿的矿物系统。

(1) 从元素地球化学角度，系统分析稀有金属矿物特征，确定（氢）氧化物、硅酸盐和磷酸盐三类主要稀有金属成矿矿物类型；

(2) 从全球花岗岩、伟晶岩演化的角度，阐明不同时代稀有金属矿物分布特征，进一步揭示了稀有金属成矿与超大陆聚合-裂解之间的耦合关系；

(3) 基于元素电负性差异，建立稀有元素化学行为与稀有金属成矿能力之间的关系，阐明稀有金属富集和成矿路径的本质；

(4) 从成矿作用角度，系统分析花岗岩、伟晶岩从岩浆、岩浆-热液过渡到热液演化体系，锂等稀有金属矿物的结晶序列和标志矿物演变，构建基于稀有金属矿物特征的多维度成矿示踪体系。

(5) 矿物演变规律可以在找矿实践中发挥作用，针对判别矿床类型、追踪矿体分布和查找矿体中，构建矿物空间找矿方法，推动形成基于矿物学特征的空间找矿方法

体系，为稀有金属资源勘查提供矿物学方案。

致谢：衷心感谢编辑和两位专家专业和细致的评审，所提建议为进一步完善原稿提供了重要帮助。

作者贡献声明：本文为唯一作者，负责论文构思、文献调研与论文写作。

Author's Contributions: This is the sole author, who conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript.

利益冲突声明：本文作者声明本研究无任何利益冲突。

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。 Conflict of Interests : The author declares no conflict of interests.

References

- ČERNÝ P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatite deposits [J]. *Geoscience Canada*, 18(2): 49–67.
- CORREIA NEVES J M, LOPES NUNES J E, SAHAMA T G. 1974. High hafnium members of the zircon-hafnion series from the granite pegmatites of Zambézia, Mozambique [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 48: 73–80.
- EVENSEN J M, LONDON D. 1999. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (12): 2239–2265.
- GOLDSCHMIDT V M, 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks [J]. *Journal of the Chemical Society*, 655–673, <https://doi.org/10.1039/JR9370000655>.
- GREW E S, BOSI F, ROS L, KRISTIANSSON P, GUNTER M E, HÅLENIUS U, TRUMBULL R, YATES M G, 2018. Fluor-elbaite, lepidolite and Ta–Nb oxides from a pegmatite of the 3000 Ma Sinceni Pluton, Swaziland: evidence for lithium–cesium–tantalum (LCT) pegmatites in the Mesoarchean [J]. *European Journal of Mineralogy*, 30 (2): 205 - 218
- GUO C J, WANG Z G. 1981. The evolution of minerals. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- HARRISON T M, WATSON E B, 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295–304
- HOU Z Q, CHEN J, ZHAI M G, 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65 (33) : 3651-3652. (in Chinese)
- HU F Y, LIU X C, HE S X, WANG J M, WU F Y, 2023. Cesium-rubidium mineralization in Himalayan leucogranites [J]. *Science China Earth Sciences*, 66 (12) : 2827-2852
- Huang X L, WANG R C, CHEN X M, HU H , LIU C S. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China [J]. *Canadian Mineralogist*, 40: 1047-1068
- LEE C-T , 2016. Geochemical classification of elements [M]//WHITE W H, ed., *Encyclopedia of Geochemistry*, Springer International Publishing, Switzerland: 1–5. <https://doi.org/10.1007/978-3->

- LINNEN R L, CUNEY M, 2005. Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization [M]// LINNEN R L, SAMSON I M, eds., Rare-element geochemistry and mineral deposits, Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes: 1745–68.
- LINNEN RL, KEPPLER H, 1997. Columbite solubility in granitic melts: consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 213–227.
- LONDON D, MORGAN G B VI, ICENHOWER J, 1998. Stability and solubility of pollucite in granitic systems at 200 MPa H₂O [J]. *Canadian Mineralogist*, 36, 497–510
- MANETA V, BAKER D R, MINARIK W, 2015. Evidence for lithium-aluminosilicate supersaturation of pegmatite-forming melts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170 (1), DOI 10.1007/s00410-015-1158-z
- MARIGNAC C, CUNEY M, 1999. Ore deposits of the French Massif Central: insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt [J]. *Mineralium Deposita*, 34: 472–504.
- MCCAULEY A, BRADLEY D C, 2014. The global age distribution of granitic pegmatites [J]. *Canadian Mineralogist*, 54: 183-190
- MCNEIL A G, LINNEN R L, FLEMMING R, FAYEK M, 2020. An experimental approach to examine fluid-melt interaction and mineralization in rare-metal pegmatites [J]. *American Mineralogist*, 105: 1078-1087.
- ROMER R L, KRONER U, 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization—tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting [J]. *Gondwana Research*, 31:60–95.
- RUDNICK R L, GAO S, 2014. Composition of the continental crust [M]// HOLLAND H D, TUREKIAN K K, eds., *Treatise on Geochemistry*, Amsterdam: Elsevier, 1–51, 2nd ed.
- SCHWARTZ MO, RAJAH SS, ASKURY AK, PUTTHAPIBAN P, DJASWADI S. 1995. The Southeast Asian Tin Belt [J]. *Earth-Science Reviews*, 38: 95-293.
- SONG Y, DONG S C, HU H, WANG R C, 2023. Global temporospatial distribution patterns of Nb/Ta-bearing minerals based on big data analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 30 (5): 197-204. (in Chinese with English abstract)
- STILLING A, CERNY P, VANSTONE PJ, 2006. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XVI. Zonal and bulk compositions and their petrogenetic significance [J]. *Canadian Mineralogist*, 44: 599-623
- TANG Y, ZHANG H, RAO B, 2016. The effect of phosphorus on manganocolumbite and manganotantalite solubility in peralkaline to peraluminous granitic melts [J]. *AMERICAN MINERALOGIST*, 101: 415-422
- TKACHEV A V, 2011. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geologic time [J]. *Geological Society, London, Special Publication* 350, 7–23
- VAN LICHTERVELDE M, HOLTZ F, DZIONY W, LUDWIG T, MEYER, H-P, 2011. Incorporation mechanisms of Ta and Nb in zircon and implications for pegmatitic systems [J]. *American Mineralogist*, 96: 1079-1089
- VON KNORRING O, HORNUNG G, 1961. Hafnian zircons [J]. *Nature*, 190: 1098-1099
- WANG R, CHE X, XIE L, ZHU Z, XIANG L, TANG Z, DUAN X, LIN Y, HUANG S, YUAN J. 2026. Deciphering the regional distribution patterns, petrogenetic types, and metallogenic systems of rare-

- metal granites in South China [J]. *Science China Earth Sciences*, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1990-4>
- WANG R C, HU H, ZHANG A C, FONTAN F, DE PARSEVAL P, JIANG S Y, 2007. Cs-dominant polyolithionite in the Koktokay#3 pegmatite, Altai, NW China: in situ micro-characterization and implication for the storage of radioactive cesium [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 355-367.
- WANG R C, WU F Y, XIE L, LIU X C, WANG J M, YANG L, LAI W, LIU C. 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet [J]. *Science China Earth Sciences*, doi: 10.1007/s11430-017-9075-8
- WANG, X.J., ZOU, T.R., XU, J.Y., AND QIU, Y.Z., 1981, Study of pegmatite minerals from the Altai region [M]. Beijing, Scientific Publishing House, 140 P
- WU F Y, LIU X C, HU F Y, XIE L, WANG R C. 2024. Himalayan leucogranites: rare-metal resources [J]. *Elements*, 20: 401–408
- XU K X, XIE L, WANG R C, TIAN E L, 2025. Mineralogical characteristics of the Lhozhag pegmatites in the Himalaya orogen and the occurrence state and enrichment process of cesium within the pegmatites [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 44 (6): 1301-1318
- XU Z H, WANG R C, XIE L, LIU X C, HU H, XU K X, TANG Z M, 2026. Rb-Cs mineralization of Chaya in the Mount Qomolangma region, Himalaya [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 42(05): 1715-1734
- YANG Y P, ZAHNG Y X, SIMON A, NI P, 2016. Cassiterite dissolution and Sn diffusion in silicate melts of variable water content [J]. *Chemical Geology*, 441: 162-176
- YANG Z Y, WANG R C, CHE X D, XIE L, HU H. 2022. Paragenesis of Li minerals in the Nanyangshan rare-metal pegmatite, Northern China: Toward a generalized sequence of Li crystallization in Li-Cs-Ta-type granitic pegmatites [J]. *American Mineralogist*, 107: 2155-2166
- YIN R, WANG R C, ZHANG A C, HU H, ZHU J C, RAO C, ZHANG H, 2013. Extreme fractionation from zircon to hafnon in the Koktokay No. 1 granitic pegmatite, Altai, northwestern China [J]. *American Mineralogist*, 98: 1714-1724
- ZHANG Y M, 1975. Metasomatic processes and Ta-Nb mineralization characteristics in a granitic pegmatite in a mining area of Henan Province [M]// *Proceedings of National Rare-element Geology Conference*, Vol. 2 (internal report)
- ZHAO Y M, FENG C Y, LI D X, LIU J N, WANG H, ZHONG S H, 2017. Li, Be-bearing ribbon rocks and related metasomatites in Xianghualing tin-polymetallic deposit, Hunan Province [J]. *Mineral Deposits*, 36 (6): 1245-1262

附中文参考文献

- 郭承基, 王中刚, 1981. 矿物演化 [J]. *矿物学报*, (1): 1-9
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国, 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿 [J]. *科学通报*, 65 (33) : 3651-3652
- 胡方决, 刘小驰, 何少雄, 王佳敏, 吴福元, 2023. 喜马拉雅淡色花岗岩铷钽成矿作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 53 (12) : 2868-2895
- 宋颜, 董少春, 胡欢, 王汝成, 2023. 基于大数据的铌钽矿物全球时空分布特征分析 [J]. *地学前缘*, 30 (5): 197-204
- 王汝成, 车旭东, 谢磊, 诸泽颖, 向路, 汤志敏, 段昕昊, 林彧涛, 黄帅, 袁嘉婧, 2026. 华南稀有金属花岗岩的区域分带、类型划分和成矿系统 [J]. *中国科学: 地球科学*, DOI:

10.1360/SSTE-2025-0448

王汝成, 吴福元, 谢磊, 刘小驰, 王佳敏, 杨雷, 赖文, 刘晨, 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 47: 871-880, doi: 10.1360/N072017-00036

王贤觉, 邹天人, 徐建国, 于学元, 裘榆卓, 1981. 阿尔泰伟晶岩矿物研究 [M]. 北京: 科学出版社, 140 页

徐渴鑫, 谢磊, 王汝成, 田恩龙, 2025. 喜马拉雅洛扎伟晶岩矿物学特征及铯赋存状态与富集过程 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 44 (6): 1301-1318

徐志豪, 王汝成, 谢磊, 刘小驰, 胡欢, 徐渴鑫, 汤志敏, 2026. 喜马拉雅珠峰地区查雅山铷铯成矿作用 [J]. 岩石学报, 42(05): 1715-1734

张玉铭, 1975. 河南某矿区花岗伟晶岩的交代作用和钽铌矿化特征 [M]. 全国稀有元素地质会议论文集 (内部报告), 第二集, 218-228

赵一鸣, 丰成友, 李大新, 刘建楠, 王辉, 钟世华, 2017. 湖南香花岭锡铍多金属矿区的含 Li、Be 条纹岩和有关交代岩 [J]. 矿床地质, 36 (6): 1245-126

《地质力学学报》预出版