

doi: 10.12029/gc20230309006

赵晨辉, 王登红, 王成辉, 刘善宝, 秦锦华, 诸泽颖, 赵云彪, 刘泽, 刘金字, 李阳, 刘新星. 2024. 全球淡色花岗岩的地球化学特征及其与稀有金属的成矿联系[J]. 中国地质, 51(5): 1601–1616.

Zhao Chenhui, Wang Denghong, Wang Chenghui, Liu Shanbao, Qin Jinhua, Zhu Zeying, Zhao Yunbiao, Liu Ze, Liu Jinyu, Li Yang, Liu Xinxing. 2024. Geochemical characteristics of global leucogranite and their mineralized relationship with rare metals[J]. Geology in China, 51(5): 1601–1616(in Chinese with English abstract).

全球淡色花岗岩的地球化学特征及其与稀有金属的成矿联系

赵晨辉¹, 王登红¹, 王成辉¹, 刘善宝¹, 秦锦华¹, 诸泽颖¹,
赵云彪¹, 刘泽¹, 刘金字¹, 李阳², 刘新星³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 成都理工大学, 四川成都 610059; 3. 河北地质大学, 河北石家庄 050031)

摘要:【研究目的】近年来, 淡色花岗岩成为岩石学和稀有金属成矿研究的热点, 但全球淡色花岗岩的时空分布特征尚不明确。本文旨在探讨全球淡色花岗岩的时空分布特征及其成矿专属性, 进而指导勘查实践。【研究方法】文章系统梳理了全球 115 个淡色花岗岩体 1155 组地球化学数据, 并结合项目组在南岭、川西、藏南、阿尔泰等地的工作, 对数据开展综合分析研究。【研究结果】在成分上, 淡色花岗岩的 SiO₂ 含量较全球花岗岩平均值高 1% 以上, 发生稀有金属矿化的岩体稀土含量极低。在空间上, 中西欧海西造山带淡色花岗岩的 SiO₂ 和 ALK(Na₂O+K₂O) 含量低于喜马拉雅淡色花岗岩, 也低于中国西部淡色花岗岩, 而中国西部淡色花岗岩的 SiO₂ 和 ALK 含量又低于中国东部的淡色花岗岩, 中西欧和北美地区的淡色花岗岩富集 P₂O₅; 样品中 Li、Be、Nb、Ta、Ga、Rb 和 Sn 含量的最高平均值均出现在中西欧地区, W 含量最高平均值出现在中国东部。在时间上, 新生代淡色花岗岩的 SiO₂ 和 ALK 含量高于古生代, 低于中生代; 古生代淡色花岗岩富集 P₂O₅; 电气石是新元古代淡色花岗岩的一个重要矿物特征。【结论】成矿的淡色花岗岩一般不含岩浆型石榴子石, A/CNK>1.2, 与 Sn–W–Nb–Ta 成矿有关的淡色花岗岩的 Rb/Sr>1, ΣREE>10×10⁻⁶, 与 Li–Sn–Nb–Ta–Be 成矿有关的淡色花岗岩的 Rb/Sr>1, ΣREE<10×10⁻⁶。相比之下, 中国东部中生代淡色花岗岩演化程度最高, 成矿潜力最好。

关键词: 淡色花岗岩; 地球化学; 稀有金属; 矿产勘查工程; 喜马拉雅; 海西造山带; 中国东部; 中国西部

创新点: 中国东部中生代淡色花岗岩与全球其他地区相比演化程度更高, 淡色花岗岩中石榴子石的含量、A/CNK 值、Rb/Sr 值及稀土元素含量可以作为成矿专属性的定量指标, 有助于评价岩体的潜力。

中图分类号: P618.6; P588.121; P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)05–1601–16

Geochemical characteristics of global leucogranite and their mineralized relationship with rare metals

收稿日期: 2023–03–09; 改回日期: 2023–05–17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2901900、2021YFC2901905)、中国地质调查项目(DD20221684、DD20190379、DD20221695)和国家自然科学基金青年基金项目(41902037)联合资助。

作者简介: 赵晨辉, 男, 1996 年生, 博士生, 矿产普查与勘探专业; E-mail: GEOChenhui@163.com。

通讯作者: 王登红, 男, 1967 年生, 研究员, 主要从事矿产资源研究; E-mail: wangdenghong@vip.sina.com。

ZHAO Chenhui¹, WANG Denghong¹, WANG Chenghui¹, LIU Shanbao¹, QIN Jinhua¹, ZHU Zeying¹,
ZHAO Yunbiao¹, LIU Ze¹, LIU Jinyu¹, LI Yang², LIU Xinxing³

(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of National Resources, Institute of Mineral Resource, CAGS, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

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

[Objective] Recently, leucogranites have become a hot spot in the study of petrogenesis and rare metal metallogeny. However, the spatiotemporal distribution characteristics of global leucogranite are still unclear. For further prospecting of rare metals in China, it is essentially to clarify the spatiotemporal distribution of leucogranite and the metallogenic specialization between leucogranite and rare metal deposits. **[Methods]** We collect 1155 geochemical data from 115 leucogranites worldwide, and combine with our recently achievements from the Nanling Region, Western Sichuan, Southern Tibet, and Altai. **[Results]** In reference to the composition, this study reveals that the content of SiO₂ in leucogranite is exceed 1% higher than the global average value of granite, while the REE content of the rocks with rare metal mineralization is extremely low. Spatially, the content of SiO₂ and ALK (Na₂O+K₂O) of leucogranites in the Hercynian orogenic belt in Central and Western Europe are lower than those of the Himalayan leucogranites, as well as those of Western China. Meanwhile, the SiO₂ and ALK content of leucogranite in Western China are lower than Eastern China. Both leucogranites in Central and Western Europe and North America are rich in P₂O₅. The highest values of Li, Be, Nb, Ta, Ga, Rb and Sn in the samples appear in Central and Western Europe, while the highest values of W present in eastern China. Cenozoic SiO₂ and ALK content of leucogranite were higher than Paleozoic but lower than Mesozoic. Notably, Paleozoic leucogranite are enriched in P₂O₅. Besides, tourmaline is a vital indicator of Neoproterozoic leucogranite. **[Conclusions]** The mineralized leucogranite are generally lack of magmatic garnet. Those leucogranite with feature of A/CNK>1.2, Rb/Sr>1, ΣREE>10×10⁻⁶ are mostly related to Sn–W–Nb–Ta mineralization, while Rb/Sr>1, ΣREE<10×10⁻⁶ of leucogranite more akin to Li–Sn–Nb–Ta–Be mineralization. All the data indicate that the Mesozoic leucogranites in Eastern China are the most evolved leucogranites worldwide and the best mineralization potential.

Key words: leucogranite; geochemistry; rare metals; mineral exploration engineering; Himalayas; Hercynian orogenic belt; Eastern China; Western China

Highlights: The Mesozoic leucogranites in Eastern China have the highest degree of evolution compared with other regions; The content of garnet, A/CNK, Rb/Sr, and ΣREE of leucogranite can be used as quantitative indicators of metallogenic specialization to evaluate the potential of the leucogranite.

About the first author: ZHAO Chenhui, male, born in 1996, doctoral candidate, majors in the mineral resources prospecting and exploration; E-mail: GEOChenhui@163.com.

About the corresponding author: WANG Denghong, male, born in 1967, researcher, mainly engaged in mineral resource; E-mail: wangdenghong@vip.sina.com.

Fund support: Supported by the projects of National Key Research and Development Program (No.2021YFC2901900, No.2021YFC2901905), China Geological Survey (No.DD20221684, No.DD20190379, No.DD20221695) and the National Natural Science Foundation of China (No.41902037).

1 引 言

淡色花岗岩,也称为浅色花岗岩或深熔花岗岩,是指暗色矿物含量<5%的过铝质酸性侵入岩类,主要形成于岩浆晚期阶段,且具有较高的演化程度(Le Maitre, 2002; 吴福元等, 2015; 曾令森和高

利娥, 2017),其概念由 Lameyre 在法国中央造山带提出(Le Maitre, 2002),后经 Le Fort 研究尼泊尔玛纳斯鲁(Manaslu)岩体引入喜马拉雅造山带(吴福元等, 2015)。这一概念在提出时具有构造意义,特别是淡色花岗岩在陆陆碰撞造山带中产出,如喜马拉雅造山带、海西造山带。但随着后期大量的研究,

其概念发生了扩展和变化, 现在普遍将淡色花岗岩与二云母花岗岩等同(Le Maitre, 2002)。实际上, 由于淡色花岗岩并不是按照矿物组成命名的岩石学名称, 主体是细粒等粒状白云母花岗岩, 但也可能包括了花岗伟晶岩, 以至于在实际使用过程中可能产生概念的泛化。

淡色花岗岩与稀有金属矿化关系密切(吴福元等, 2015, 2017; 曾令森和高利娥, 2017; Gao et al., 2021; 王登红等, 2022)。由于稀有金属元素(Li、Be、Nb、Ta、Zr、Hf、Rb、Sr、Cs)及 Ga、Th、U、W、Sn 具有强不相容性, 倾向于在岩浆演化晚期的熔体/流体中富集。因此, 在岩浆演化末期的淡色花岗岩中, 这类元素能有效聚集成矿(Linnen and Čuney, 2005)。

如何在广泛分布的淡色花岗岩中识别出含矿花岗岩是找矿勘查中普遍关注的问题。为此, 本文统计了全球 115 个淡色花岗岩岩体, 共 1155 个样品的地球化学资料, 从老到新, 不同的造山期均有发育。例如, 古元古代美国 Trans-Hudson 造山带的 Black Hills 岩体(Nabelek and Bartlett, 1998; Nabelek and Liu, 1999)、新元古代江南造山带的梵净山和元宝山岩体(Li et al., 2003; Xiang et al.,

2020)、东非造山带的 Sikait-Nugrus 岩体(Mohamed and Hassanen, 1997; Moghazi et al., 2004)、早古生代纳米比亚中北部 Damara 造山带的 Bandombaai 杂岩体(van de Fliert et al., 2003)、海西造山带的法国中央高原 Beauvoir 岩体(Čuney et al., 1992; Raimbault et al., 1995)和捷克 Cinovec 岩体(Rub et al., 1998; Breiter et al., 2017)、燕山期南岭东段宜春 414 岩体和西段的栗木岩体(陈骏等, 2008; 王成辉等, 2022)、新生代的喜马拉雅淡色花岗岩(吴福元等, 2015; 曾令森和高利娥, 2017; Gao et al., 2017)。一些大岩基周边会发育多个较年轻小的过铝质花岗岩岩体, 同时伴随稀有金属矿化, 如加拿大的南山岩基(South Mountain Batholith)、中欧的波西米亚岩基(Bohemian Batholith)和南岭西段的苗儿山—越城岭岩基(Clarke et al., 1993; Breiter et al., 2017; Romer et al., 2022; 王成辉等, 2022)。

2 样品数据有效性评价

空间上, 所统计的 1155 个样品包括中国西部(55%)、中国东部(24%)、中西欧地区(12%)、北美地区(8%)等地区(图 1, 表 1); 时间上, 显生宙样品占比约 93%, 新元古代样品占 7%, 古生代、中生代

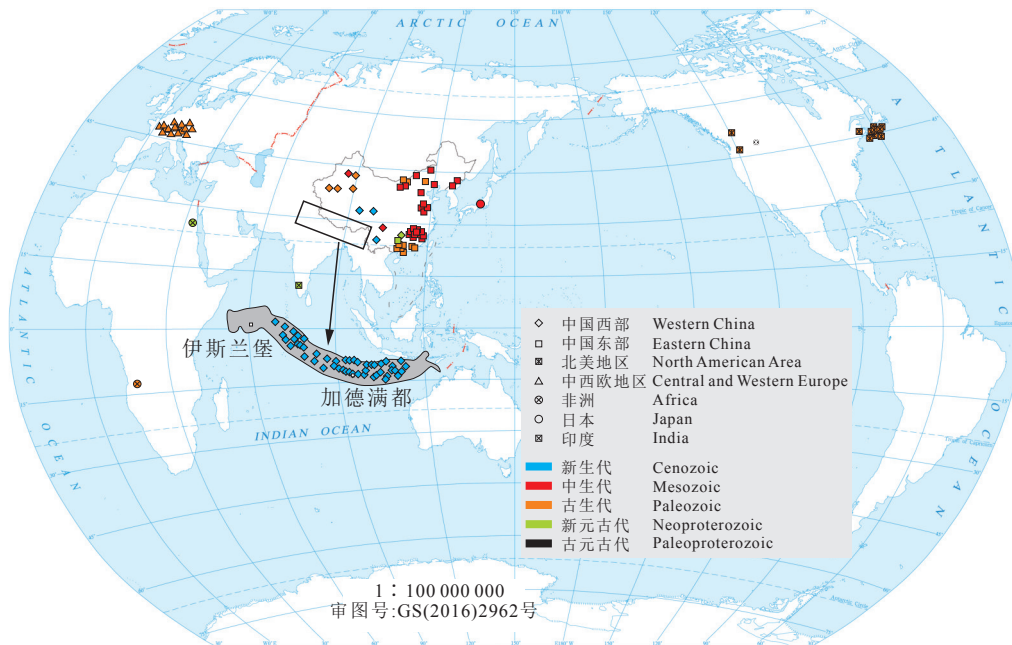


图 1 淡色花岗岩样品点空间分布图(全球地形图来源 www.ngdc.noaa.gov/mgg/global)

Fig.1 Spatial distribution of leucogranite samples (Global topographic map is from www.ngdc.noaa.gov/mgg/global)

表 1 淡色花岗岩分布及岩石化学成分

Table 1 Location and petrochemical composition of leucogranites

地理位置	岩石化学成分平均值					
	SiO ₂ /%	ALK/%	A/CNK	TiO ₂ /%	MgO/%	P ₂ O ₅ /%
全球花岗岩 (Le Maitre, 1976)	71.30	7.75	1.04	0.31	0.17	0.12
中国花岗岩 (黎彤和饶纪龙, 1963)	71.27	7.87	1.05	0.25	0.80	0.16
I-型花岗岩 (Chappell and White, 1992)	69.50	6.64	0.98	0.41	1.38	0.11
S-型花岗岩 (Chappell and White, 1992)	70.91	6.60	1.17	0.44	1.24	0.15
中国西部 (n=633)	73.17	8.17	1.16	0.11	0.25	0.12
西北 (n=34)	74.91	8.33	1.08	0.05	0.16	0.12
西南 (n=599)	73.20	8.16	1.17	0.11	0.28	0.12
中国东部 (n=277)	74.22	8.31	1.15	0.07	0.14	0.11
东北 (n=39)	75.10	8.20	1.12	0.07	0.16	0.05
华北 (n=27)	74.95	8.78	1.11	0.03	0.08	0.07
华东 (n=135)	73.83	8.30	1.19	0.05	0.11	0.15
中南 (n=76)	74.19	8.19	1.13	0.13	0.19	0.07
中西欧地区 (n=134)	72.11	8.06	1.29	0.12	0.19	0.55
北美地区 (n=91)	74.02	7.91	1.27	0.08	0.64	0.39
非洲 (n=14)	74.34	7.44	1.20	0.09	0.19	0.03
印度 (n=2)	73.17	8.76	1.11	0.04	0.23	0.14
日本 (n=4)	74.15	8.35	1.34	0.12	0.34	0.20

表 2 淡色花岗岩时代及岩石化学成分

Table 2 Age and petrochemical composition of leucogranites

时代	岩石化学成分平均值					
	SiO ₂ /%	ALK/%	A/CNK	TiO ₂ /%	MgO/%	P ₂ O ₅ /%
新生代 (n=518)	73.35	8.15	1.15	0.11	0.27	0.11
中生代 (n=311)	73.42	8.45	1.17	0.08	0.14	0.10
古生代 (n=243)	73.04	8.10	1.25	0.10	0.30	0.41
新元古代 (n=81)	75.36	7.58	1.25	0.06	0.19	0.19
古元古代 (n=2)	73.50	8.28	1.20	0.05	0.14	0.17

和新生代样品分别占 21%、27%、45%(表 2)。为减小热液蚀变对样品地球化学数据的影响,文中 99% 以上的样品烧失量 (LOI) 小于 3%。样品的 Na₂O、K₂O、CaO 和 Al₂O₃ 含量以及 Rb/Sr 比值与烧失量的增加没有明显的相关性,表明蚀变对这些元素的影响很小。样品的 SiO₂ 含量范围相对有限,在 60%~80%。

3 岩石化学特点

3.1 空间

全球不同淡色花岗岩岩体的 SiO₂ 平均值变化于 65.8%~76.7%, 极小值出现在雪宝顶矿区及周边岩体,其他岩体多大于 72.5%(表 1)。与全球花岗

岩 (SiO₂=71.3%; Le Maitre, 1976) 和中国花岗岩 (SiO₂=71.27%; 黎彤和饶纪龙, 1963) 相比, SiO₂ 高出 1% 以上。中国东部淡色花岗岩硅含量 (SiO₂=74.22%) 高于中国西部淡色花岗岩 (SiO₂=73.17%), 说明中国东部的淡色花岗岩总体上更富硅, 演化程度更高 (图 2a、b、c、d)。中国西南地区 (SiO₂=73.2%) 岩体硅含量普遍低于西北地区 (SiO₂=74.91%), 但江南造山带西段的梵净山岩体 (SiO₂=75.6%) 和元宝山岩体 (SiO₂=75.4%) 硅含量很高, 这两个岩体周围发育锡铌钽矿化 (Yao et al., 2014; Wei et al., 2018), 表明淡色花岗岩在硅含量增加的同时发生稀有金属矿化。东北和华北淡色花岗岩的 SiO₂ 含量接近 75%, 高于华东和中南的淡色花岗岩 SiO₂ 含量 (74%)。中南地区有锂矿化发育的广西栗木和紫花坪、有铌钽矿化发育的湖南上堡, 淡色花岗岩的 SiO₂ 平均含量均大于 75%, 与之相反的是, 矿化类似的江西狮子岭和雅山岩体的 SiO₂ 含量却在 72%~72.5%。北美地区淡色花岗岩的 SiO₂ 含量接近 74%, 欧洲海西期造山带淡色花岗岩的 SiO₂ 含量接近 72%(图 2a、b、c、d)。埃及东非造山带 (South Eastern Desert 地区) 的 Sikait-Nugrus 淡色花岗岩是一个值得被关注的岩体, SiO₂ 含量 74.34%, 岩体及周边伟晶岩沿逆冲推覆带出露, 形成于新元古代晚期 (594~620 Ma), 是铍、铌钽、锡等多种稀有金属矿化和铀矿化的成矿母岩, South Eastern Desert 地区是埃及最重要的稀有金属矿化带之一, 同时也是电气石矿床的重要产地 (Mohamed and Hassanen, 1997; Moghazi et al., 2004)。

全碱 (ALK=Na₂O+K₂O) 含量和铝指数 A/CNK (Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) 摩尔比) 是火成岩系列判别的重要参数。淡色花岗岩的 ALK 平均值变化于 6.89%~9.69% (表 1), 极小值出现在埃及 Sikait-Nugrus, 极大值出现在雪宝顶矿区及周边岩体, 说明了雪宝顶的特殊性。极值外的淡色花岗岩全碱含量范围变化于 7.76%~9.11%, 而 9.11% 是哀牢山—红河带淡色花岗岩的全碱平均值。综上, 云南和四川地区的淡色花岗岩的地球化学特征之一是 ALK 值 > 9%。中国西部淡色花岗岩的全碱含量 (ALK=8.17%) 稍低于中国东部 (ALK=8.31%), 高于中西欧地区 (ALK=8.06%) 和北美地区 (ALK=7.91%) (表 1, 图 2a、b、c、d)。著名的喜马拉雅南带 (SiO₂=

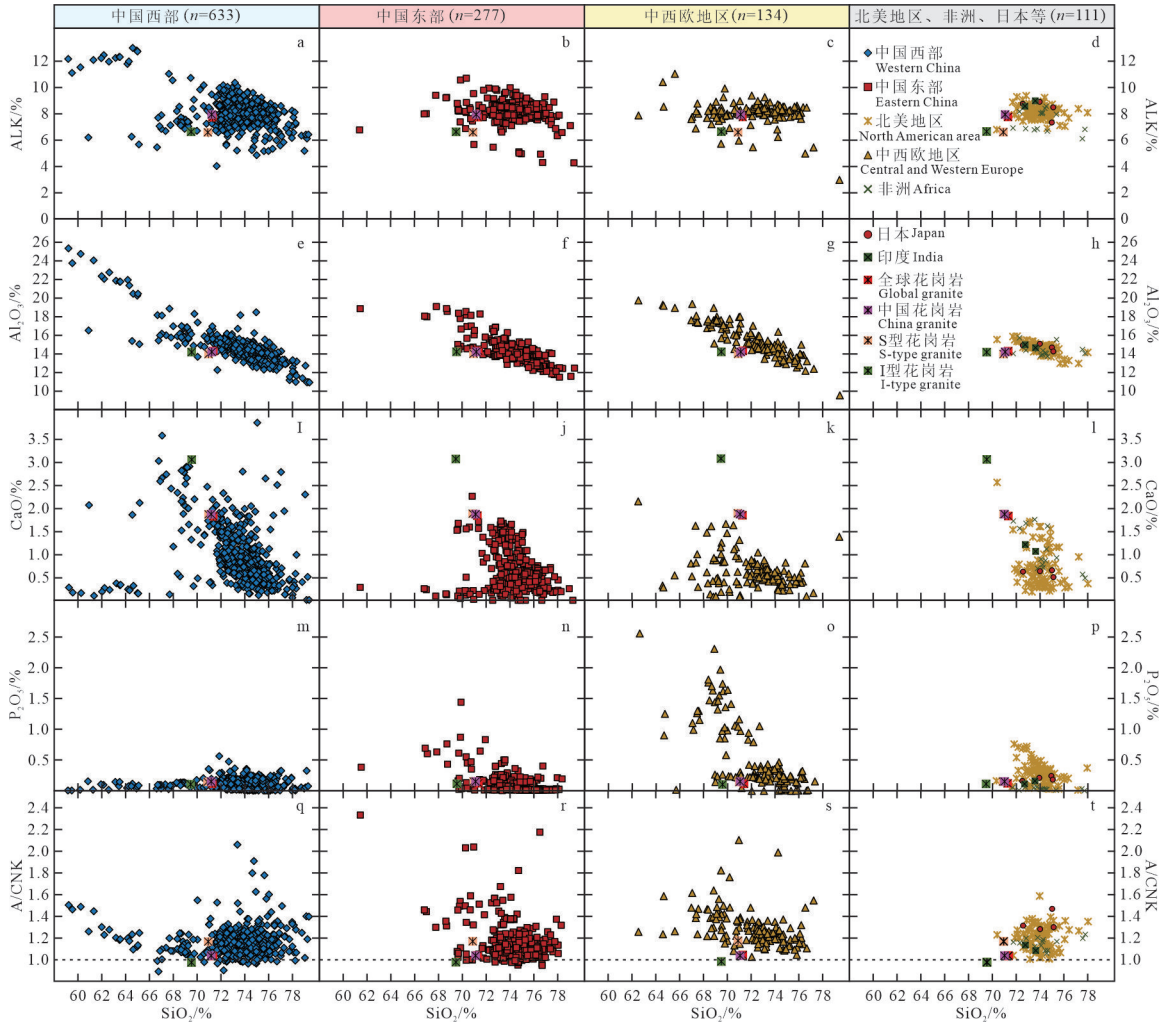


图 2 不同地区淡色花岗岩主量元素哈克图解 (数据来源同表 1)

Fig.2 Harker diagram of the main elements of leucogranites in the different regions (Data source is the same as Table 1)

73.6%, ALK=8.46%, A/CNK=1.16) 和北带 (SiO₂=73%, ALK=7.76%, A/CNK=1.14) 地球化学特征呈现出连续变化的趋势, 说明北带岩体演化程度低于南带, 岩浆运移距离较短, 侵位较深。这也可能代表了北带相当于南带在深部的延伸, 在形成时间的峰值上也能对应 (Harrison et al., 1997; 吴福元等, 2015)。

不同地区淡色花岗岩的 Al₂O₃ 和 CaO 变化趋势相似, 与 SiO₂ 呈负相关 (图 2e~l)。中国西部淡色花岗岩的 CaO 略高于其他地区, 表明源区中含有较多镁铁质矿物。中西欧地区淡色花岗岩的 P₂O₅=0.55%, 显著高于中国西部 (P₂O₅=0.12%) 和中国东部 (P₂O₅=0.11%) 淡色花岗岩中 P₂O₅ 含量, 略高于北美地区 (P₂O₅=0.39%) (表 1, 图 2m~p)。中西欧地区

和北美地区的淡色花岗岩主要在潘吉亚大陆汇聚过程中的陆陆碰撞造山阶段, 经过沉积岩的部分熔融作用形成, 这些沉积岩在新元古代—早古生代海相环境中形成, 含磷较高 (Bucholz, 2022), 所以中西欧和北美地区淡色花岗岩的 P₂O₅ 含量明显偏高。

从矿物组合上来看, 淡色花岗岩可划分为二云母/白云母/黑云母型、电气石型和石榴子石型 (郭素淑和李曙光, 2007)。钠长石花岗岩是一种特殊的淡色花岗岩, 在喜马拉雅和南岭往往伴生二云母花岗岩或石榴子石花岗岩产出, 如然巴岩体和雅山岩体 (刘志超, 2013; 李洁和黄小龙, 2013)。因含有富铝矿物, 淡色花岗岩常常是强过铝质的, A/CNK 通常大于 1.1, 与 S 型花岗岩接近, 这种强过铝的性质通常需要过铝质的源岩。中国东部 (A/CNK=

1.15)、中国西部(A/CNK=1.16)、北美地区(A/CNK=1.27)、中西欧地区(A/CNK=1.29)淡色花岗岩铝饱和度依次增加(表1,图2q~t),这表明中西欧地区淡色花岗岩的源区长石类矿物占比较高。中国西北地区淡色花岗岩的A/CNK普遍低于1.1,只有发生稀有金属矿化的新疆阿尔泰将军山岩体和发育电气石化的木孜塔格岩体(A/CNK=1.11,1.12)偏高。江西狮子岭(A/CNK=1.48)和雅山岩体(A/CNK=1.34)、西藏错那洞岩体(A/CNK=1.21)、法国 Beauvoir 岩体(A/CNK=1.42)和 Guéande 岩体(A/CNK=1.21)、加拿大南山岩基中的多个淡色花岗岩小岩体(A/CNK=1.27)、埃及 Sikait-Nugrus 岩体(A/CNK=1.27)和日本 Aoyama 地区 Ryoke 变质带中淡色花岗岩岩体(A/CNK=1.34)稀有金属矿化或铀矿化较好,这些岩体铝指数均>1.2。Beauvoir 岩体经常用来与雅山岩体对比,Beauvoir 岩体的岩石地球化学特征与狮子岭岩体更为接近,Beauvoir 岩体和狮子岭岩体均有磷铝锂石产出,雅山岩体却没有(Raimbault et al., 1995; 王成辉等, 2022)。

FeO、Fe₂O₃、MgO、TiO₂与SiO₂呈负相关关系已是共识,即淡色花岗岩中FeO、Fe₂O₃、MgO、TiO₂不同程度地低于正常花岗岩,本文不再赘述。

3.2 时间

本文整理的淡色花岗岩中,最老的岩石是美国南达科他州 Black Hills 岩体(~1715 Ma; Nabelek and Liu, 1999),最年轻的是喜马拉雅南带纳木纳尼(7~9 Ma; Murphy et al., 2002)和南迦巴瓦岩体(~8 Ma, 曾令森和高利娥, 2017)。淡色花岗岩作为地壳深熔作用的产物,往往与混合岩共生,组成“孪生姐妹花”,因此更老的淡色花岗岩也是存在的,应该比地壳最初形成的时间年轻一些。山东栖霞和泰山山顶混合岩年龄在古元古代,应该存在与同时代的较年轻淡色花岗岩或浅色体。

时间上来看,淡色花岗岩的岩石化学成分稳定,不同时代淡色花岗岩的SiO₂含量平均值变化于73.39%~75.36%(表2)。极大值出现在新元古代,这一时期的淡色花岗岩全碱含量最低(ALK=7.58%),铝饱和度最高(A/CNK=1.25)。本文收集的新元古代淡色花岗岩有4个岩体,贵州梵净山岩体(Xiang et al., 2020)、广西元宝山岩体(Xiang et al., 2020)、埃及 Sikait-Nugrus 岩体

(Moghazi et al., 2004)以及印度南部 Manali 岩体(Braun et al., 1996),只有 Manali 岩体不发育电气石化,其他岩体均有大量电气石产出或形成电气石矿床,所以电石气的出现是新元古代淡色花岗岩的一个重要矿物特征。此外,新元古代81个样品中只有10个二云母花岗岩,其他为电气石/石榴子石/白云母花岗岩,也是ALK低、A/CNK高的原因。

古生代到新生代淡色花岗岩的SiO₂含量先升高再降低(73.04%(古生代)→73.42%(中生代)→73.35%(新生代),表2,图3),A/CNK(1.25、1.17、1.15)(表2,图3q~t)与S型花岗岩接近,由此来看沉积岩的部分熔融仍然是淡色花岗岩形成的重要途径。中生代淡色花岗岩的全碱含量(ALK=8.45%)高于古生代(ALK=8.1%)和新生代(ALK=8.15%)(表1,图3a~d),暗示显生宙内中生代的淡色花岗岩演化程度偏高。本文中生代的淡色花岗岩样品主要来自中国东部,古生代的样品主要来自欧洲和北美海西造山带,新生代的样品主要来自中国西部的喜马拉雅带,这在一定程度上暗示中国东部的淡色花岗岩演化程度高于海西造山带和喜马拉雅带的淡色花岗岩。不同时代淡色花岗岩Al₂O₃和CaO与SiO₂呈负相关(图3e~i),与其他时期相比,古生代淡色花岗岩MgO(0.3%)和P₂O₅(0.41%)含量明显偏高。

综合空间和时间来看,淡色花岗岩的分布和演化具有一定规律。4个主要地区中,中国东部淡色花岗岩硅含量和全碱含量最高,中西欧地区最低,中国西部和北美地区居中,这说明中国东部淡色花岗岩的演化程度最高,中西欧地区最低。燕山期形成的岩体是中国东部淡色花岗岩的主体,海西期是中西欧和北美地区淡色花岗岩形成的主要时期,喜马拉雅期是中国西部岩体形成的主要时期,分析得出燕山期形成的岩体演化程度最高,海西期岩体演化程度最低,喜马拉雅期岩体演化程度居中的规律,这一点在华东和中南地区淡色花岗岩的硅含量和全碱含量高于西南地区也可得到验证(表1),同样,这一认识也获得实验岩石学的支持(Sylvester, 1998)。

中国东部燕山期淡色花岗岩的演化程度最高,与所对应的稀有金属成矿强度和规模是可以互相印证的。如果淡色花岗岩的演化程度可以当作是

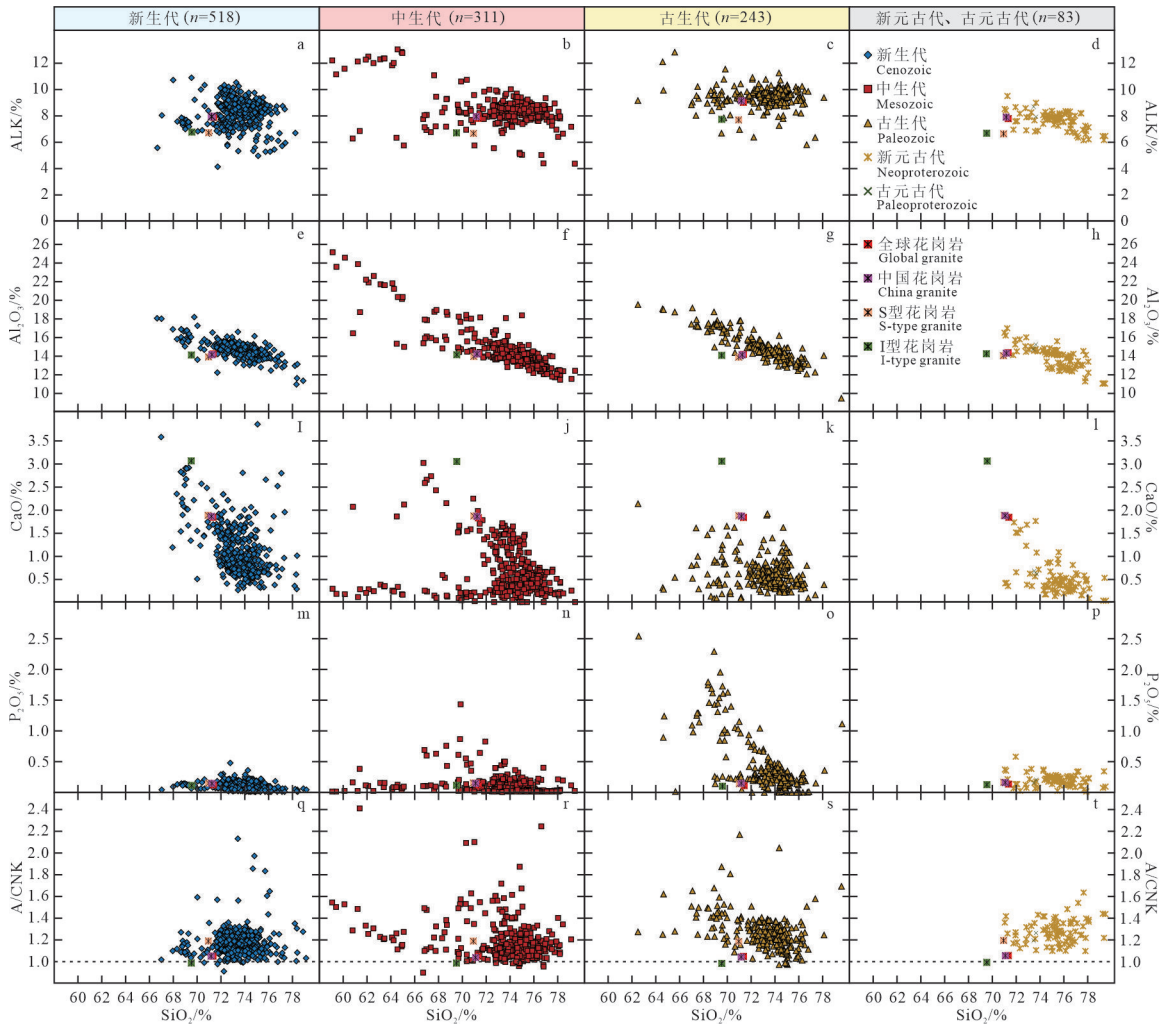


图 3 不同时代淡色花岗岩主量元素哈克图解(数据来源同表 1)

Fig.3 Harker diagram of the main elements of leucogranites in the different age (Data source same as Table 1)

陆壳成熟度的衡量指标,那么中国东部陆壳成熟度高于中国西部陆壳,中国西部陆壳成熟度高于中西欧地区的地壳。这种认识也得到了验证, Sun et al.(2022)通过结合地质资料、地球物理数据和地球化学数据建立区域三维地壳模型,对具有典型碰撞型造山带特征的大陆地壳成分进行了估计,认为中国东南地区具有演化程度最高的地壳成分之一。

4 稀有金属元素地球化学

稀有金属 Li、Be、Nb、Ta、Zr、Hf、Rb、Sr、Cs 及 U、W、Sn、Ga 和 Th 等与淡色花岗岩密切相关的元素,往往相伴产出。如南岭西段的锂矿化和铀矿化、加拿大 Nova Scotia 地区钨锡矿化和铀矿化(Clarke et al., 1993; 王成辉等, 2022; 秦锦华等,

2024), 所以一并分析总结。以往研究中与稀有金属矿化相关的花岗岩叫作稀有金属花岗岩(袁忠信等, 1987; 华仁民等, 2003), 现在也称高分异花岗岩(吴福元等, 2017)。淡色花岗岩、稀有金属花岗岩和高分异花岗岩所包含的范围是相交不相等的关系。

4.1 空间

从不同地区淡色花岗岩的稀有金属及相关元素含量平均值(图 4)可以看出, 不同地区淡色花岗岩中 Li、Be、Ta、Ga、Rb、Cs、U、W、Sn 是相对于地壳富集的, Sr、Zr 和 Hf 是亏损的, Nb 和 Th 变化不定, 富集和亏损情况依地区而异。

相比于地壳, 淡色花岗岩的 Zr、Hf 明显亏损, 这是新生锆石或钨石在淡色花岗岩中极为缺乏的最直接原因。如果追索其深部原因, 有可能是

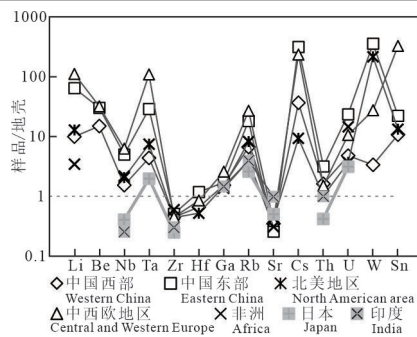


图4 不同地区淡色花岗岩中稀有金属元素含量平均值变化曲线图

地壳数据引自 Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表 1

Fig.4 Curve chart of average variation of rare metal elements in leucogranites of different regions

The crustal data is quoted from Rudnick and Gao (2014); Other data from Table 1

Zr 和 Hf 在岩浆分异过程中随着锆石的分离结晶更多地进入了残留体中(吴福元等, 2015, 2017)。还有一种可能是熔体快速从源区分离导致的不平衡部分熔融(Cao et al., 2022)。淡色花岗岩往往是周围伟晶岩的母岩, 如中国甲基卡和美国 Black Hills 的伟晶岩的母岩是二云母花岗岩, 所以 Zr、Hf 亏损情况在伟晶岩中同样存在(王登红等, 2021)。

淡色花岗岩中 Li(1848×10^{-6})、Be(59.5×10^{-6})、Nb(49.2×10^{-6})、Ta(74.7×10^{-6})、Ga(40.7×10^{-6})、Rb(1291×10^{-6})和 Sn(544.2×10^{-6})含量最高平均值出现中西欧地区, 中国东部淡色花岗岩在 Be(56.1×10^{-6})和 Nb(39.3×10^{-6})平均含量上与中西欧地区相差不多。淡色花岗岩中 Hf(4.3×10^{-6})、Cs(215.4×10^{-6})、Th(17.4×10^{-6})、U(29.9×10^{-6})和 W(347.9×10^{-6})含量平均值最高出现在中国东部(表 3)。中国东部淡色花岗岩的 Th 含量是地壳值

的 3 倍, 其他地区淡色花岗岩的 Th 含量接近地壳或低于地壳。Th 和稀土元素含量的变化主要受到岩浆中独居石(5.0%~8.2% ThO₂, 平均 6.5%)含量的制约, 独居石在淡色花岗质熔融体中溶解度偏低导致其在岩浆残留体中的分离及随后的分离结晶, 进而造成淡色花岗岩中 Th 和稀土元素含量低。中国东部和中西欧地区的淡色花岗岩在 Sn 以外的稀有元素上具有相同的变化趋势, 中国西部和北美地区的淡色花岗岩在 W 以外的稀有元素具有相近的平均值(图 4)。

淡色花岗岩是一个地区岩浆高度演化的结果, 稀有金属元素又总是富集在淡色花岗岩中, 所以淡色花岗岩的稀有金属元素平均值也许可以代表一个地区稀有金属元素的背景值。例如中西欧地区的高 Sn 平均值和中国东部的高 W 平均值分别代表了中西欧地区是一个高 Sn 背景值的地球化学地块, 中国东部是一个高 W 背景值的地球化学地块。高地球化学背景意味着更好的找矿潜力, 无论成矿物质的来源是岩浆还是地层。

中西欧地区淡色花岗岩 Sn 含量高于其他地区 15~33 倍, 与高含量对应的是锡矿(化)及其相关矿种/矿化产出。在法国中央造山带和波西米亚林山(德国、捷克、奥地利)分布着多个铋钼钨锡矿床, 如著名的 Beauvoir、Cínovec 矿床。Breiter et al.(2017)认为厄尔士山(Erzgebirge, 波西米亚林山北部)的 Cínovec Sn-W-Li 矿床的成矿物质来源是淡色花岗岩, 并指出厄尔士山是中欧地区锡矿找矿首要靶区。但是这些淡色花岗岩的源岩可能是强烈化学风化的埃迪卡拉纪—寒武纪海相碎屑岩(Romer et al., 2022)。此外, 厄尔士山还是中欧铋钼和铀等金

表 3 不同地区淡色花岗岩中稀有金属元素含量平均值

Table 3 Average content of rare metal elements in leucogranites in the different regions

地理位置	稀有金属含量/ 10^{-6}													
	Li	Be	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	Rb	Sr	Cs	Th	U	W	Sn
地壳	17.0	1.9	8.0	0.7	132	3.7	16	49	320	0.7	5.6	1.3	1.0	1.7
中国西部	166	27.8	12.1	3.0	58.5	2.4	24.1	321	109	25.2	8.9	6.1	3.3	17.9
中国东部	1074	56.1	39.3	19.8	66.0	4.3	26.8	872	80	215	17.4	29.9	347	37.1
北美地区	214		16.2	5.10	57.2	1.9	23.1	394	128	6.4	5.6	4.7	210	21.9
中西欧地区	1848	59.5	49.2	74.7	58.4	3.1	40.7	1291	121	160	8.3	13.5	27	544
非洲	57.5		17.1		77.8		21.5	189	97		18.5	4.0		
印度			2.0		39.0		23.0	190	310		5.5			
日本			3.2	1.35	32.2			124	157		2.3	4.0		

注: 地壳数据引自 Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表 1。

属矿产和高岭土的重要产地。

相比于中国东部和中西欧地区, 中国西部稀有金属背景值较低, 尤其是 W, 所以中国西部找钨矿的潜力偏低。中国东部淡色花岗岩更多地是经历了沉积岩的重熔作用, 尤其是中南和华东地区(王登红等, 2014), 中国西部淡色花岗岩尤其是喜马拉雅淡色花岗岩形成中分离结晶作用可能占了主导作用, 部分熔融较少(吴福元等, 2015, 2017)。

4.2 时间

通过对比不同空间(表 3, 图 4)和不同时间淡色花岗岩(表 4, 图 5)中稀有金属元素含量平均值, 发现中国西部与新生代、中国东部与中生代、中西欧地区与古生代的曲线相似。

新元古代淡色花岗岩中除了 Zr 和 Hf 以外还有 Be 低于地壳值, Nb、Ga 和 Th 接近地壳值, 其他元素相对地壳富集 10~50 倍, Cs 为最富集元素。古元古代淡色花岗岩 Zr 和 Hf 相对地壳亏损, Ta、Rb、Cs、Th 和 U 相对地壳富集 1~10 倍。说明老岩体发育 Be 矿化的潜力偏低, 发育 Cs 矿化的潜力相对偏高。

5 稀土元素地球化学

5.1 空间

不同地区淡色花岗岩的稀土元素地球化学特征如表 5 所示。中国东部淡色花岗岩 $\Sigma\text{REE}=147.2\times 10^{-6}$, 明显高于地壳中的稀土总量($\Sigma\text{REE}=125.15\times 10^{-6}$), 中国西部($\Sigma\text{REE}=82.8\times 10^{-6}$)、中西欧地区($\Sigma\text{REE}=64.2\times 10^{-6}$)、北美地区($\Sigma\text{REE}=53\times 10^{-6}$)的 ΣREE 值低于地壳值并依次降低。中国东部的 LREE 含量(90.2×10^{-6})低于地壳的 LREE 含量(92.9×10^{-6}), 中国东部的 HREE 含量(57.0×10^{-6})明显高于地壳的 HREE 含量(32.3×10^{-6}), 这与中国华

南地区发育的风化壳型重稀土矿(赵芝等, 2019)是相符的。中国西部、中西欧地区、北美地区淡色花岗岩的 LREE 和 HREE 含量都明显低于地壳值。由此可见, 岩浆演化过程中稀土元素与稀有元素具有不同的地球化学行为, 稀土元素与暗色组分(如黑云母、铁叶云母)密切相关, 常常聚合在一起, 在岩浆演化的早期阶段富集, 晚期相淡色花岗岩中稀有金属富集的同时也造成稀土元素相对地壳亏损。

LREE/HREE 和 La/Yb 是轻重稀土元素演化的重要参数。表 5 显示不同地区淡色花岗岩表现为不同程度的轻稀土富集, 中国东部淡色花岗岩 LREE/HREE 比值 2.05 低于地壳 LREE/HREE 比值 2.88, 但是仍高于正常花岗岩 LREE/HREE 比值 1.2~1.7(刘英俊等, 1984), 中西欧地区淡色花岗岩的 LREE/HREE=19.2, 表现明显的轻重稀土的分馏, 暗示在花岗岩的形成过程中有富含 HREE 的残留相, 中国西部和北美地区淡色花岗岩的 LREE/HREE 比值略高于地壳值。不同地区淡色花岗岩的 La/Yb 比值变化于 16.34~19.32, 也证明了轻稀土相对于重稀土在岩浆演化的晚期富集。

不同地区淡色花岗岩显示明显负 Eu 异常(表 5), 暗示在部分熔融或分离结晶过程中, 残余相中大量斜长石的存在, 中国东部淡色花岗岩负 Eu 异常最显著。中国西部和中国东部的淡色花岗岩无 Ce 异常, 接近地壳, 中西欧地区和北美地区淡色花岗岩具有正 Ce 异常, 后两个地区岩体多为晚古生代, 可能后期发生了蚀变和风化。

5.2 时间

不同时代淡色花岗岩的稀土元素地球化学特征如表 6 所示。中生代 $\Sigma\text{REE}=144.86\times 10^{-6}$, 明显高于地壳值, 新生代($\Sigma\text{REE}=86.89\times 10^{-6}$)、古生代($\Sigma\text{REE}=65.64\times 10^{-6}$)和新元古代($\Sigma\text{REE}=43.58\times 10^{-6}$)

表 4 不同时代淡色花岗岩中稀有金属元素含量平均值

Table 4 Average content of rare metal elements in leucogranites in the different ages

时代	稀有金属含量/ 10^{-6}													
	Li	Be	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	Rb	Sr	Cs	Th	U	W	Sn
新生代	140	12.1	10.2	2.22	62.2	2.27	24.2	289	133	21.4	9.10	5.77	1.53	11.1
中生代	924	81.5	36.0	18.1	63.9	4.11	27.8	803	85.3	194	15.7	26.1	271	41.5
古生代	1278	58.3	34.4	41.7	55.2	2.94	31.9	887	96.4	128	9.00	24.3	87.7	359
新元古代	198	1.45	20.7	7.63	52.2	2.59	20.9	458	31.0	35.9	8.76	31.4	10.6	42.1
古元古代				2.65	33.0	1.80		214	35.5	7.00	9.00	4.35		

注: 地壳数据引自Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表1。

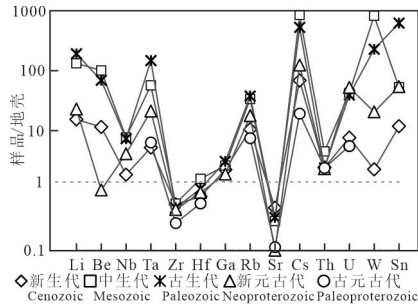


图5 不同时代淡色花岗岩中稀有金属元素含量平均值变化曲线图

地壳数据引自 Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表 1

Fig.5 Curve chart of average variation of rare metal elements in leucogranites from different ages

The crustal data is quoted from Rudnick and Gao (2014); Other data are from Table 1

表 5 不同地区淡色花岗岩稀土元素含量及相关比值

Table 5 Rare earth element content and related ratios of leucogranites in the different regions

地理位置	REE/ 10 ⁻⁶	LREE/ 10 ⁻⁶	HREE/ 10 ⁻⁶	LREE/ HREE	La/ Yb	δ Eu	δ Ce
地壳	125	92.9	32.3	2.88	10.50	0.87	1.03
中国西部	82.8	57.9	24.9	3.33	19.32	0.61	1.03
中国东部	147	90.2	57.0	2.05	16.80	0.34	1.01
中西欧地区	64.2	48.2	16.0	19.20	17.40	0.66	1.35
北美地区	53.0	32.0	21.0	3.52	16.34	0.38	1.61

注: 地壳数据引自 Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表 1。

表 6 不同时代淡色花岗岩稀土元素含量及相关比值

Table 6 Rare earth element content and related ratios of leucogranites in the different ages

时代	REE/ 10 ⁻⁶	LREE/ 10 ⁻⁶	HREE/ 10 ⁻⁶	LREE/ HREE	La/ Yb	δ Eu	δ Ce
新生代	86.89	64.97	21.92	3.96	22.16	0.59	1.01
中生代	144.86	87.57	57.29	2.17	12.09	0.36	0.98
古生代	65.64	40.14	25.50	12.04	13.93	0.47	1.38
新元古代	43.58	23.62	19.96	1.15	6.55	0.14	0.15

注: 地壳数据引自 Rudnick and Gao (2014), 其他数据来源同表 1。

淡色花岗岩的稀土总量低于地壳值, 并依次降低。中生代 Σ LREE=87.57 \times 10⁻⁶ 接近地壳值, Σ HREE = 57.29 \times 10⁻⁶ 是地壳值的 1.8 倍, 新生代、古生代和新元古代淡色花岗岩的 LREE 和 HREE 含量都显著低于地壳值。LREE/HREE 和 La/Yb 比值显示不同时代的淡色花岗岩表现为不同程度的轻稀土富集, 新元古代淡色花岗岩的 LREE/HREE=1.15、La/Yb=6.55, 表现出最小的稀土分馏程度。此外, 新元古代的淡色花岗岩 δ Eu=0.14、 δ Ce=0.15, 明显的负 Eu 异

常和负 Ce 异常。新生代(δ Eu=0.59)、中生代(δ Eu=0.36)和古生代(δ Eu=0.47)淡色花岗岩显示负 Eu 异常, 新生代和中生代的淡色花岗岩无 Ce 异常, 古生代的淡色花岗岩有弱的正 Ce 异常。

6 淡色花岗岩与稀有金属的成矿联系

6.1 Rb-Sr-Ba 图解

元素 Rb、Sr、Ba 在岩浆熔融体结晶时不形成独立矿物, 与 K 和 Ca 具有相似的地球化学性质, 呈类质同象进入铝硅酸盐。直到伟晶岩阶段, 才可能形成 Sr 的独立矿物(如菱锶矿和天青石)。在花岗岩体系中, 新鲜岩石的 Rb 和 Sr 含量主要受岩浆源区和分异过程控制。Rb-Sr-Ba 关系图中, Sr-Ba 演化趋势相当于幔源岩浆演化的产物, Rb-Ba 相当于壳源, 介于两者之间为壳幔混源。Rb-Sr-Ba 图解(图 6a-h)显示淡色花岗岩的 Rb-Ba 演化趋势, 说明淡色花岗岩是壳源岩浆演化的产物。

空间上, 中国西部淡色花岗岩从 Ba 端元到 Rb 端元具有连续演化的特征, 相较于其他地区富 Sr, 暗示该地区淡色花岗岩的源区中有较多的镁铁质物质。中国东部淡色花岗岩的 Rb-Ba 演化趋势最为显著, 靠近 Ba 端元的样品点来自中国东北(东清岩体)、华北(华北克拉通北缘)和华东地区(蚌埠隆起), 这些地区的花岗岩的源区含有基性—超基性岩(Chen et al., 2000; Jahn et al., 2001; 刘红涛等, 2002; Wu et al., 2004; 范文博等, 2019)。华南地区的淡色花岗岩样品点多靠近 Rb 端元, 源岩多为沉积岩, 中西欧地区淡色花岗岩的特征与之相似。北美地区的淡色花岗岩样品点在 Rb-Sr-Ba 图解的分布情况与中国东部相似, 靠近 Ba 端元的样品来自美国内华达州最南端的 Ireteba 岩体, 其他岩体多靠近 Rb 端元。非洲地区纳米比亚和埃及显示不同的 Rb-Sr-Ba 关系, 纳米比亚 Damara 造山带 Sikait-Nugrus 岩体靠近 Ba 端元, 埃及东非造山带的岩体靠近 Rb 端元。印度东南部 Kerala Khondalite Belt (KKB) 造山带与达马拉(Damara)、东非造山带在泛非期形成(Cawood et al., 2021), 发育在 KKB 造山带的淡色花岗岩是壳幔混源的产物。日本 Ryoke 双变质带中的淡色花岗岩非常富 Ba, 因为其源岩——泥质片岩非常富 Ba(Kawakami and Kobayashi, 2006)。

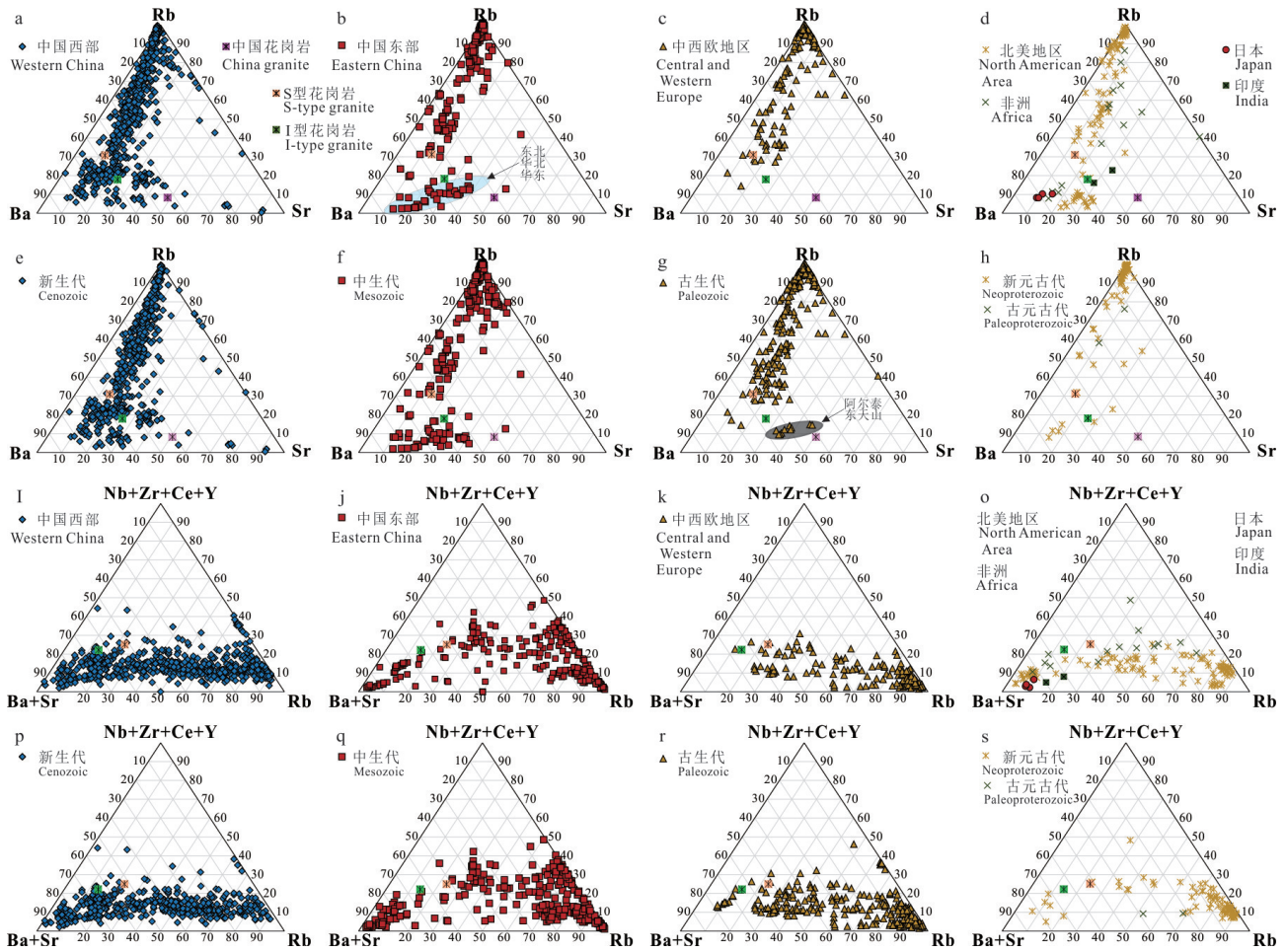


图 6 全球淡色花岗岩 Rb-Sr-Ba 图解和 (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb 图解

数据来源同表 1, S 型和 I 型花岗岩的数据来自 Chappell and White (1992)

Fig.6 Diagrams of Rb-Sr-Ba and (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb of global leucogranites

Data source same as Table 1; The data of S-type and I-type granite from Chappell and White (1992)

通过对比不同空间和不同时间淡色花岗岩的 Rb-Sr-Ba 关系图 (图 6a~h), 发现中国西部与新生代、中国东部与中生代、中西欧地区与古生代的情况相似。古生代淡色花岗岩中具有 Ba-Sr 趋势的样品来自阿尔泰山南缘和东天山北部, 是后碰撞阶段的产物 (沈晓明等, 2013; 朱小辉等, 2018)。新元古代和古元古代淡色花岗岩样品点靠近 Rb 端元。

6.2 (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb 图解

空间上, (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb 关系图 (图 6i-o) 显示中国东部淡色花岗岩较其他地区明显富集高场强元素 (Nb、Zr、Ce、Y) 和 Rb, 靠近 (Ba+Sr) 端元的样品来自于中国华东蚌埠隆起中的淡色花岗岩岩体和东北放牛沟岩体, 岩性多为含石榴子石花岗岩, 靠近 Rb 端元的样品主要来自华南

地区。中西欧地区淡色花岗岩较其他地区明显靠近 Rb 端元, Rb 在花岗质岩石中主要替换 K 和 Na 进入硅酸盐矿物。淡色花岗岩样品点越靠近 Rb 端元表明花岗岩的源区含有越多的长石类矿物或黏土矿物, 岩浆演化过程中挥发分越多, 所以中国华南地区和中西欧地区花岗岩的源岩是富黏土的泥页岩。中国西部和北美地区淡色花岗岩在 (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb 关系图上显示相似的演化趋势, 在 (Ba+Sr) 和 Rb 端元之间连续演化。

时间上, (Nb+Zr+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb 关系图 (图 6p~s) 显示高场强元素 Nb、Zr、Ce、Y 在新生代淡色花岗岩中相对偏低, 在中生代淡色花岗岩中相对富集。古生代和新元古代淡色花岗岩向 Rb 端元演化。

6.3 稀有元素与稀土元素相关性

研究表明 Rb/Sr 比值越大, 岩浆演化程度越高 (陈骏等, 2008; Cao et al., 2022)。Rb 和 Cs 是酸性岩中的特征元素, 花岗岩中 Rb 和 Cs 含量高于酸性岩的平均值, 经常随岩浆分异挥发分及钾含量的增加而富集。Cs 在花岗岩造岩矿物中, 主要呈分散状态存在, 主要富集在黑云母中。因为地球化学性质相似, Nb、Ta 和 Zr、Hf 常常被称做“双胞胎”元

素。岩浆中 Ti 含量对 Nb、Ta 的地球化学行为影响很大, Nb、Ta 会以类质同象的形式分散在含 Ti 矿物中。文中淡色花岗岩样品 TiO_2 含量很低, 因此淡色花岗岩中含 Ti 副矿物对 Nb/Ta 比值的影响可以忽略, 这一比值主要与岩浆分异演化过程有关。各类岩浆岩中 Nb 含量都高于 Ta 含量, 在岩浆结晶作用晚期, Nb 和 Ta 趋向富集, 尤其是在花岗岩中, 从早期相到晚期相, Ta 富集程度高于 Nb, Nb/Ta 比值

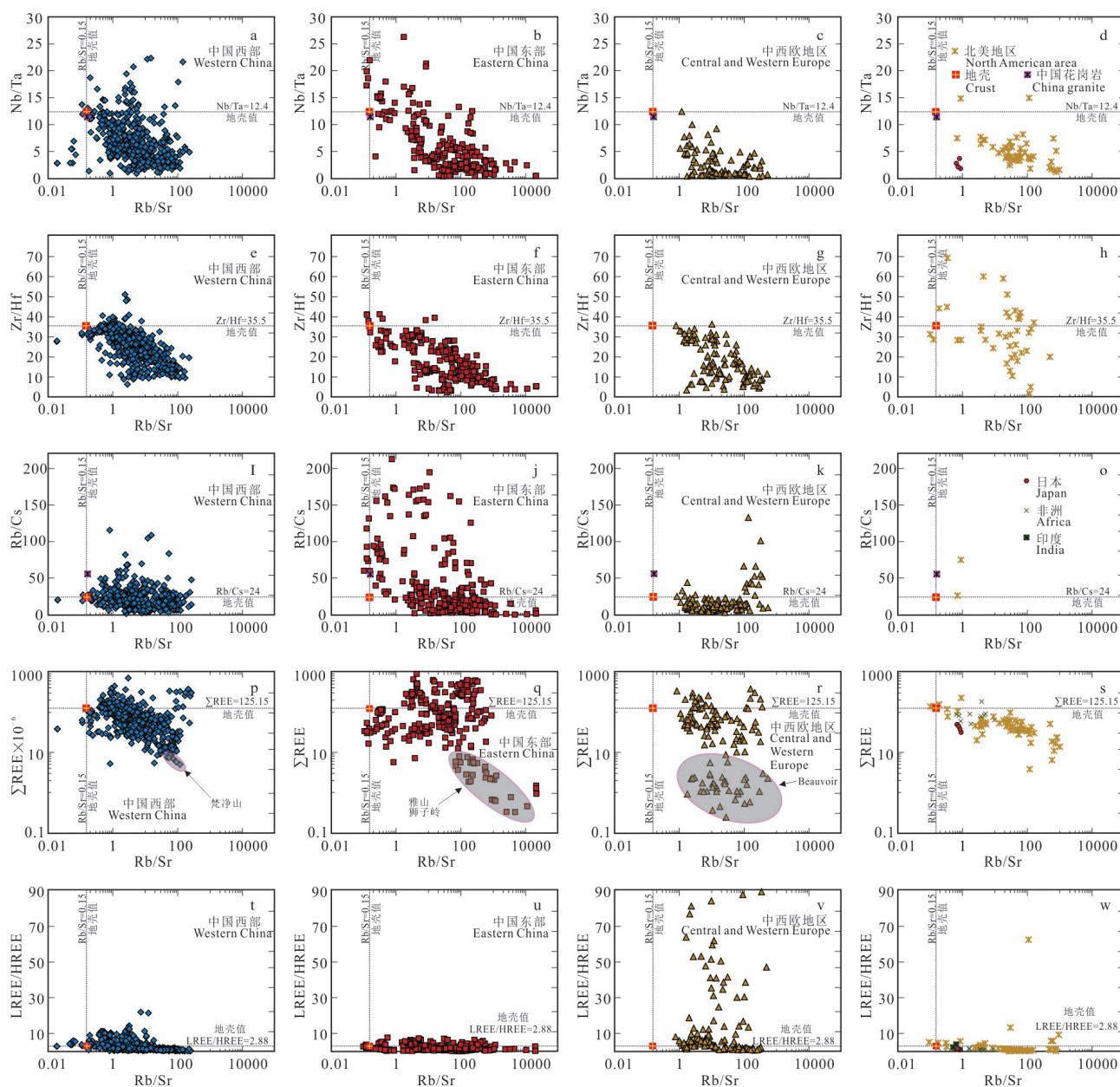


图 7 不同地区淡色花岗岩中 Rb/Sr 比值与稀有金属元素比值和稀土元素相关性图解(地壳数据引自 Rudnick and Gao, 2014)
Fig.7 Diagrams of Rb/Sr versus several rare metal element ratios and rare rare earth elements in leucogranites in the different regions (The crustal data from Rudnick and Gao, 2014)

逐渐减小(华仁民等, 2003)。随着 Rb/Sr 比值增大, Nb/Ta 比值、Zr/Hf 比值、Rb/Cs 比值、 Σ REE、LREE/HREE 比值表现为不同程度地下降(图 7)。

空间上, Rb/Sr-Nb/Ta 关系图显示中国西部淡色花岗岩和中国东部淡色花岗岩不同的特征(图 7), 中国东部淡色花岗岩的 Rb/Sr 比值增大、Nb/Ta 比值减小趋势较其他地区明显, 表明中国东部淡色花岗岩演化程度最高。中西欧地区与北美地区淡色花岗岩具有相似的演化趋势, Rb/Sr 比值和 Nb/Ta 比值低于地壳值, 特别是符合 Rb/Sr 比值 > 1, Nb/Ta 比值 < 10。Rb/Sr-Zr/Hf 关系图显示北美地区淡色花岗岩 Zr/Hf 比值较大, 来自加拿大南山岩基和美国 Ireteba 岩体的样品 Zr/Hf 比值高于地壳。中国东部淡色花岗岩和中西欧淡色花岗岩 Zr/Hf 比值低于地壳值, 但中国东部 Rb/Sr 比值较大。中国西部淡色花岗岩 Zr/Hf 比值变化于 2.96~51.12, Zr/Hf 比值分布在 10~40 的样品占比 90%, 表明该区淡色花岗岩演化程度低于中国东部和中西欧淡色花岗岩。

Rb/Sr-Rb/Cs 关系图(图 7)显示中国东部淡色花岗岩具有显著不同的分布特征, 中国东部淡色花岗岩 Rb/Cs 比值明显高于其他地区, Rb/Cs > 50 的样品来自东北地区卧都河、东清、香水园子、江家、放牛沟、十棚、后淖岩体、华东蚌埠隆起中的淡色花岗岩岩体和中南地区雅山、癞子岭岩体。Rb 和 Cs 在花岗质岩浆中, 主要以与挥发分组成的络合物形式迁移, 在含钾矿物中呈类质同象混合分散。与 Rb 相比, Cs⁺半径与 K⁺相差较大, 类质同象能力受到一定约束。长石中 Rb/Cs 比值变化于 24~300, 黑云母中 Rb/Cs 比值变化于 4~40(刘英俊等, 1984)。这说明与其他地区相比, 中国东部尤其是东北地区淡色花岗岩的源区长石类矿物的占比远高于其他地区。

Rb/Sr- Σ REE 关系图(图 7p~r)显示中国西部、中国东部和中西欧地区完全不同的样品群分布特征, 但是有一个共同点, 在样品点群的右下角为著名的稀有金属矿化的岩体。因此 Rb/Sr- Σ REE 关系图可以作为淡色花岗岩稀有金属矿化的判别性图解。Rb/Sr-LREE/HREE 关系图显示中西欧地区轻

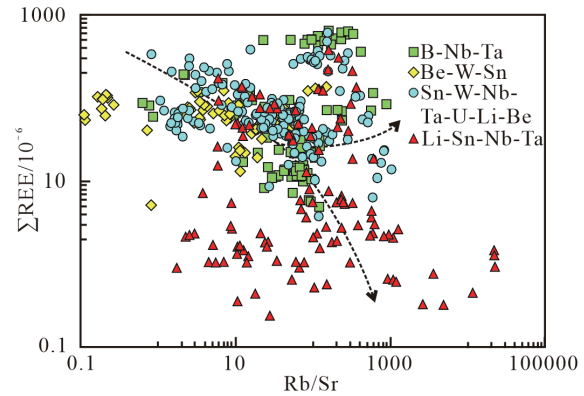


图 8 稀有金属元素的 Rb/Sr- Σ REE 判别图解
Fig.8 Discrimination diagram of Rb/Sr versus Σ REE in rare metal elements

重稀土分馏程度高, 显著高于其他地区。

对比发现中国西部与新生代、中国东部与中生代、中西欧地区与古生代的 Rb/Sr-Nb/Ta、Rb/Sr-Zr/Hf、Rb/Sr-Rb/Cs、Rb/Sr- Σ REE、Rb/Sr-LREE/HREE 关系图相似。新元古代淡色花岗岩岩体 $0.5 < \text{Rb/Sr} < 54$, 梵净山岩体和元宝山岩体 Nb/Ta < 10, $10 < \text{Zr/Hf} < 35$, Rb/Cs 比值接近地壳值, 梵净山淡色花岗岩岩体 Σ REE 变化于 5~30, 低于同时代的元宝山岩体和 Sikait-Nugrus 岩体。

6.4 Rb/Sr- Σ REE 矿种判别图解

通过对比不同地区和不同时代淡色花岗岩 Rb/Sr- Σ REE 关系特征, 发现稀有金属矿化发育的淡色花岗岩岩体具有 Rb/Sr > 1, Σ REE > 100 的特征。本文将这些岩体按矿化类型分为 4 类: B-Nb-Ta(元宝山、梵净山、上堡、Sikait-Nugrus)、Be-W-Sn(错那洞、雪宝顶)、Li-Sn-Nb-Ta(狮子岭、雅山、Beauvoir、Cinovec)、Sn-W-Nb-Ta-U-Li-Be(大吉山、西华山、紫花坪、越城岭、大岐岭、香花岭、南山岩基、波西米亚岩基)。Li-Sn-Nb-Ta 矿化的岩体和 Sn-W-Nb-Ta-U-Li-Be 矿化的岩体显示不同 Σ REE 演化特征(图 8), 以 Σ REE = 10×10^{-6} 为界, 前者 Σ REE 多小于后者。

7 结论

(1) 淡色花岗岩 SiO₂ 含量高于全球花岗岩平均值 1% 以上, 稀土含量低于正常花岗岩和地壳值, 富集 P₂O₅ 是中西欧和北美地区淡色花岗岩的重要岩

石化学特征, 中国东部中生代淡色花岗岩演化程度高于其他地区 and 时代的淡色花岗岩。

(2) 淡色花岗岩 Zr、Hf、Sr 相对于地壳亏损, 岩体中 Li、Be、Nb、Ta、Ga、Rb 和 Sn 平均含量最大值出现在中西欧地区, Cs、U 和 W 平均含量最大值出现在中国东部。

(3) 成矿的淡色花岗岩 A/CNK 大于 1.2, Rb/Sr > 1, 与 Sn–W–Nb–Ta 矿化相关的岩体 $\Sigma\text{REE} > 10 \times 10^{-6}$, 与 Li–Sn–Nb–Ta–Be 矿化相关的岩体 $\Sigma\text{REE} < 10 \times 10^{-6}$ 。这些量化指标有助于对淡色花岗岩进行潜力评价, 并指导找矿工作部署。

References

- Braun I, Raith M, Kumar G R, Ravindra. 1996. Dehydration–melting phenomena in Leptynitic gneisses and the generation of leucogranites: A case study from the Kerala Khondalite Belt, Southern India[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1285–1305.
- Breiter K, Ďurišová J, Hrstka T, Korbelová Z, Vaňková M, Galiová M V, Kanický V, Rambousek P, Kněsl I, Dobeš P, Dosbaba M. 2017. Assessment of magmatic vs. metasomatic processes in rare–metal granites: A case study of the Cínovec/Zinnwald Sn–W–Li deposit, Central Europe[J]. *Lithos*, 292–293: 198–217.
- Bucholz C E. 2022. Coevolution of sedimentary and strongly peraluminous granite phosphorus records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 596: 117795.
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, Li G M, Zhang L K, Zhang X F, Zhang Y H, Zou H, Dai Z W, Lin B, Tang L, Yu X. 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. *Earth–Science Reviews*, 234: 104229.
- Cawood P A, Martin E L, Murphy J B, Pisarevsky S A. 2021. Gondwana’s interlinked peripheral orogens[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117057.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I– and S–type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1–26.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328(1/2): 157–182.
- Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhu Jinchu, Zhang Wenlan, Ji Junfeng. 2008. W–Sn–Nb–Ta–bearing granites in the Nanling Range and their relationship to metallogenesis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 459–473 (in Chinese with English abstract).
- Clarke, D B, Macdonald, M A, Reynolds, P H, Longstaffe, F J. 1993. Leucogranites from the eastern part of the South Mountain Batholith, Nova Scotia[J]. *Journal of Petrology*, 34(4): 653–679.
- Čuney M, Marignac C, Weisbrod A. 1992. The Beauvoir topaz–lepidolite albite granite (Massif Central, France): The disseminated magmatic Sn–Li–Ta–Nb–Be mineralization[J]. *Economic Geology*, 87: 1766–1794.
- Fan Wenbo, Jiang Neng, Zhai Mingguo, Hu Jun. 2019. Phanerozoic garnet–bearing leucogranite in the northern margin of North China Craton: Characters, timing and preliminary petrogenesis study[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 2237–2258 (in Chinese with English abstract).
- Gao L E, Zeng L S, Asimow P D. 2017. Contrasting geochemical signatures of fluid–absent versus fluid–fluxed melting of muscovite in metasedimentary sources: The Himalayan leucogranites[J]. *Geology*, 45(1): 39–42.
- Gao L E, Zeng L S, Zhao L H, Gao J H, Shang Z. 2021. Behavior of apatite in granitic melts derived from partial melting of muscovite in metasedimentary sources[J]. *China Geology*, 4(1): 44–55.
- Guo Sushu, Li Shuguang. 2007. Petrology and geochemical constraints on the origin of leucogranites[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 290–298 (in Chinese with English abstract).
- Harrison T M, Oscar M L, Marty G. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. *Geology*, 25(10): 899–902.
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, Wang Rucheng. 2003. Comparison in the characteristics, origin, and relation metallogeny between granites in Dajishan and Piaotang, Southern Jiangxi, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 609–619 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H, Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing’an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 59(4): 171–198.
- Kawakami T, Kobayashi T. 2006. Trace element composition and degree of partial melting of pelitic migmatites from the Aoyama area, Ryoke metamorphic belt, SW Japan: Implications for the source region of tourmaline[J]. *Gondwana Research*, 9: 176–188.
- Le Maitre. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks[J]. *Journal of Petrology*, 17(4): 589–637.
- Le Maitre. 2002. *Igneous rocks: A Classification and Glossary of Terms*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1–104.
- Linnen R L, Čuney M. 2005. Granite–related rare–element deposits and experimental constraints on Ta–Nb–W–Sn–Zr–Hf mineralization. In: Linnen R L, Samson I M, eds. *Rare–Element Geochemistry and Mineral Deposits*[J]. *Geol Ass Can GAC Short Course Notes*, 17: 45–67.
- Li Jie, Huang Xiaolong. 2013. Mechanism of Ta–Nb enrichment and magmatic evolution in the Yashan granites, Jiangxi Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4311–4322 (in Chinese with English abstract).
- Li Tong, Yao Jilong. 1963. The average chemical composition of igneous rocks in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 43(3): 271–280

- (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma?[J]. *Precambrian Research*, 122(1/4): 45–83.
- Liu Hongtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, Sun Shihua. 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433–448 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1984. *Elemental Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1–204 (in Chinese).
- Liu Zhichao. 2013. Geochronology and Petrogenesis of the Ramba Leucogranite, Tethyan Himalaya, Tibet[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1–114 (in Chinese with English abstract).
- Moghazi A M, Hassanen M A, Mohamed F H, Ali S. 2004. Late Neoproterozoic strongly peraluminous leucogranites, South Eastern Desert, Egypt: Petrogenesis and geodynamic significance[J]. *Mineralogy and Petrology*, 81(1/2): 19–41.
- Mohamed F H, Hassanen M A. 1997. Geochemistry and petrogenesis of Sikait leucogranite, Egypt: An example of S-type granite in a metapelitic sequence[J]. *Geologische Rundschau*, 86(1): 81–92.
- Murphy M A, Yin A, Kapp P, Harrison T M, Manning C E, Ryerson F J, Ding L, Guo J H. 2002. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114: 428–447.
- Nabelek P I, Bartlett C D. 1998. Petrologic and geochemical links between the post-collisional Proterozoic Harney Peak leucogranite, South Dakota, USA, and its source rocks[J]. *Lithos*, 45(1/4): 71–85.
- Nabelek P I, Liu M. 1999. Leucogranites in the Black Hills of South Dakota: The consequence of shear heating during continental collision[J]. *Geology*, 27(6): 523–526.
- Qin Jinhua, Wang Denghong, Wang Yan, Guo Zhiqiang, Liu Shanbao, Huang Fan, Zhao Ruyi. 2024. Metallogenic law and exploration prospect of the middle part of Nanling metallogeny belt[J]. *Geology in China*, 51(4): 1095–1122 (in Chinese with English abstract).
- Raimbault L, Cuney M, Azencott C, Duthou J, Joron J L. 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta–Sn–Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. *Economic Geology*, 90(3): 548–576.
- Romer R L, Kroner U, Schmidt C, Legler C. 2022. Mobilization of tin during continental subduction-accretion processes[J]. *Geology*, 50: 1361–1365.
- Rub A K, Stemprok M, Rub M G. 1998. Tantalum mineralization in the apical part of the Cinovec (Zinnwald) granite stock[J]. *Mineral Petrology*, 63: 199–222.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the Continental Crust[M]. *Treatise on Geochemistry*, 43.
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang, Ma Lin. 2013. Discovery of the Late Carboniferous leucogranite in the Southern Altay Range and its tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 721–729 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Gao R H, Li Z W, Wang A D, Han R, Xi Y F, Liu J G. 2022. Composition and evolution of continental crust at orogenic belts: Constraints from a 3–D crustal model of Southeast China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127: e2022JB025057.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29–44.
- Wang Chenhui, Wang Denghong, Sun Yan, Zhao Zhi, Li Peng, Chen Lei, Li Jiankang, Zhou Fangchun, Yu Yang, Liu Shanbao, Lu Lei, Liu Xinxing, Zhao Ting, Yang Yueqing, Wang Gang, Chen Chen, Chen Zhenyu, Peng Linlin, Chen Binpeng, Wen Chunhua, Feng Wenjie, Huang xinpeng, Cao Shenghua, Leng Shuangliang, Fan Xiyin, Zhou Hui, Huang Huagu, Dang Xiaoliang, Huang Zhibiao, Huang Hongxin. 2022. Investigation and Research Progress of Rare and Rare Earth Minerals in Key Ore-concentrated Areas of South China[M]. Beijing: Science Press, 1–357 (in Chinese).
- Wang Denghong, Chen Zhenyu, Huang Fan, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Chen Zhenghui, Zhao Zheng, Liu Xinxing. 2014. Discussion on metallogenic specialization of the magmatic rocks and related issues in the Nanling Region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 230–238 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Yu Yang, Liu Lijun, Dai Jingjing, Liu Shanbao, Xiong Xin, Wang Yuxian, Fu Xiaofang, Hao Xuefeng, Yang Rong, Pan Meng, Qin Yan, Wang Chenghui, Hou Jianglong, Yuan Linping, Wang Wei, Tang Qi, Feng Yonglai, Rao Kuiyuan, Luo Guanghua, Tian Shihong, Zhao Yue. 2021. Theory, Method and Practice of Investigation and Evaluation of Large Lithium Resource Base: Example for Jiajika Large Lithium Mine in West Sichuan[M]. Beijing: Science Press, 1–458 (in Chinese).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743–764 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Jahn B M, Wilde S. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 731–744, 731–744.
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang. 2015. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1201–1219.
- van de Fliert T, Hoernes S, Jung S, Masberg P, Hoffer E, Schaltegger

- U, Friedrichsen H. 2003. Lower crustal melting and the role of open-system processes in the genesis of syn-orogenic quartz diorite-granite-leucogranite associations constraints from Sr-Nd-O isotopes from the Bandombaai Complex, Namibia[J]. *Lithos*, 67: 205-226.
- Wei S D, Liu H, Zhao J H. 2018. Tectonic evolution of the western Jiangnan Orogen Constraints from the Neoproterozoic igneous rocks in the Fanjingshan region, South China[J]. *Precambrian Research*, 318: 89-102.
- Xiang L, Wang R C, Romer R L, Che X D, Hu H, Xie L, Tian E N. 2020. Neoproterozoic Nb-Ta-W-Sn bearing tourmaline leucogranite in the western part of Jiangnan Orogen: Implications for episodic mineralization in South China[J]. *Lithos*, 360-361: 105450.
- Yao J L, Shu L S, Santosh M., Zhao G C. 2014. Neoproterozoic arc-related mafic-ultramafic rocks and syn-collision granite from the western segment of the Jiangnan Orogen, South China: Constraints on the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 243: 39-62.
- Yuan Zhongxin, Bai Ge, Yang Yueqing. 1987. A discussion on petrogenesis of rare metal granite[J]. *Mineral Deposit*, 6(1): 88-96 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Gao Li'e. 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420-1444 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Wang Chenghui, Wang Zhen, Zou Xinyong, Feng Wenjie, Zhou hui, Huang Xinpeng, Huang Huagu. 2019. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1454-1465 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Zhu Tao, Zhang Xin, Xi Rengang, Meng Yong, Wang Kai, 2018. Petrogenesis and geological implications of Late Carboniferous leucogranites in Harlik Area, Eastern Tianshan[J]. *Earth Science*, 43(12): 4443-4458 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰, 季峻峰. 2008. 南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用[J]. *高校地质学报*, 14(4): 459-473.
- 范文博, 姜能, 翟明国, 胡俊. 2019. 华北克拉通北缘显生宙含石榴石淡色花岗岩: 特征、时代及成因初探[J]. *岩石学报*, 35(7): 2237-2258.
- 郭素淑, 李曙光. 2007. 淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因[J]. *地学前缘*, 14(6): 290-298.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 王汝成. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比[J]. *高校地质学报*, 9(4): 609-619.
- 李洁, 黄小龙. 2013. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制[J]. *岩石学报*, 29(12): 4311-4322.
- 黎彤, 饶纪龙. 1963. 中国岩浆岩的平均化学成分[J]. *地质学报*, 43(3): 271-280.
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. *岩石学报*, 18(4): 433-448.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-517.
- 刘志超. 2013. 喜马拉雅然巴淡色花岗岩时代与成因[D]. 北京: 中国科学院大学, 1-114.
- 秦锦华, 王登红, 王岩, 郭志强, 刘善宝, 黄凡, 赵如意. 2024. 南岭成矿带中段成矿规律与找矿前景分析[J]. *中国地质*, 51(4): 1095-1122.
- 沈晓明, 张海祥, 马林. 2013. 阿尔泰南缘晚石炭世淡色花岗岩的发现及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 37(4): 721-729.
- 王成辉, 王登红, 孙艳, 赵芝, 李鹏, 陈雷, 李健康, 周芳春, 于扬, 刘善宝, 陆蕾, 刘新星, 赵汀, 杨岳清, 王刚, 陈晨, 陈振宇, 彭琳琳, 陈斌峰, 文春华, 冯文杰, 黄新鹏, 曹圣华, 冷双梁, 樊锡银, 周辉, 黄华谷, 党晓亮, 黄志彪, 黄鸿新. 2022. 华南重点矿集区稀有和稀土矿产调查研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1-357.
- 王登红, 陈振宇, 黄凡, 王成辉, 赵芝, 陈郑辉, 赵正, 刘新星. 2014. 南岭岩体成矿专属性及相关问题探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 230-238.
- 王登红, 代鸿章, 于扬, 刘丽君, 代晶晶, 刘善宝, 熊欣, 王裕先, 付小芳, 郝雪峰, 杨荣, 潘蒙, 秦燕, 王成辉, 侯江龙, 袁瀚平, 王伟, 唐屹, 冯永来, 饶魁元, 罗光华, 田世洪, 赵悦. 2021. 大型锂资源基地调查评价的理论方法与实践——以川西甲基卡超大型锂矿为例[M]. 北京: 科学出版社, 1-458.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 28(5): 743-764.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 31(1): 1-36.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745-765.
- 袁忠信, 白鹤, 杨岳清. 1987. 稀有金属花岗岩型矿床成因讨论[J]. *矿床地质*, 6(1): 88-96.
- 曾令森, 高利娥. 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 33(5): 1420-1444.
- 赵芝, 王登红, 王成辉, 王臻, 邹新勇, 冯文杰, 周辉, 黄新鹏, 黄华谷. 2019. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展[J]. *地质学报*, 93(6): 1454-1465.
- 朱小辉, 朱涛, 张欣, 奚任刚, 孟勇, 王凯. 2018. 东天山哈尔里克地区晚石炭世淡色花岗岩成因及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(12): 4443-4458.