

锆石微量元素对成矿岩体的判别 ——来自大数据思维的应用

耿厅^{1,2,3}, 周永章^{1,2,3}, 李兴远^{4,5}, 王俊^{1,2,3}, 陈川^{2,3}, 王堃屹^{1,2,3}, 韩紫奇^{2,3,6}
GENG Ting^{1,2,3}, ZHOU Yongzhang^{1,2,3}, LI Xingyuan^{4,5}, WANG Jun^{1,2,3}, CHEN Chuan^{2,3},
WANG Kunyi^{1,2,3}, HAN Ziqi^{2,3,6}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;
 2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;
 3. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275;
 4. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
 5. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada;
 6. 广东高质资源环境研究院, 广东 广州 510275
1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
3. Center for Earth Environment & Resource, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
4. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
5. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada;
6. Guangdong Institute of Quality Resource and Environment, Guangzhou 510275, Guangdong, China

摘要:华南钦杭结合带燕山期岩浆活动异常活跃,且具有较明显的成矿专属性。近年来微区测试技术日益成熟,积累了大量锆石微量元素数据。通过全体数据挖掘的思维方法,对前人发表的数据进行了进一步数据挖掘,利用锆石稀土元素对岩体成矿潜力进行判别,探讨有效的找矿地球化学标志。利用Python语言编程,对采用的13种稀土元素及元素比值进行穷举式组合,获得了4095个二元图解及121485个三元图解,并设计筛选算法,自动筛选出能有效区分锆石母岩成矿类型的图解。结果表明,锆石稀土元素含量及比值图解对不同成矿类型岩体的区分程度各异:与Ce、Eu有关的地球化学指标可以较清晰地对斑岩铜矿和钨锡(钨)矿床进行判别,这可能与岩体的氧逸度和含水量有关。此外,还挖掘出一些新的元素组合图解,如Dy/Lu–Er/Lu、Gd/Dy–Er/Yb等,可以有效区分岩体成矿类型,其隐含的地球化学机制尚待进一步解释。地球化学数据挖掘结果可以作为找矿标志使用,为华南燕山期岩浆–热液矿床研究及找矿勘查提供了科学依据,也是大数据技术在矿床学方面应用研究的积极探索。

关键词: 锆石;微量元素;大数据分析;地球化学图解;钦杭结合带

中图分类号: P595;P628 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)12-1992-07

Geng T, Zhou Y Z, Li X Y, Wang J, Chen C, Wang K Y, Han Z Q. The discrimination between ore-forming and barren granites based on zircon REE compositions: Insights from big data mining. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(12):1992–1998

Abstract: Yanshanian magmatism is well developed and has obvious metallogenic specificity in Qinzhou–Hangzhou Bays of South

收稿日期:2019-04-23;修订日期:2019-07-25

资助项目:国家自然科学基金项目《基于地学大数据的城市土壤智能监测、模拟、管控》(批准号:U1911202)、《福建紫金山矿区燕山期复式岩体的氧逸度研究》(批准号:418030401)和国家重点研发计划项目《三维成矿地质–地球化学过程模拟与异常定量分析》(编号:2016YFC0600506)

作者简介:耿厅(1994–),女,在读硕士生,从事大数据与地球化学研究。E-mail: gengt3@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:李兴远(1988–),男,博士后,从事矿床地球化学与数学地质研究。E-mail: lydzhi@163.com

China. With the development of in-situ zircon analysis technology, a huge number of zircon composition data has been accumulated in recent years. On the basis of collecting data published by previous researchers, the authors determined the ore-forming potential of rock masses by using zircon REE compositions through big data thinking method, and explored effective geochemical indicators for ore prospecting. Python language was used to program arbitrary combination of elements. A total of 4095 binary diagrams and 121485 ternary diagrams were obtained, and diagrams that could effectively distinguish zircon parent rock metallogenic types were automatically screened out. The results show that different types of ore-forming rocks have different degrees of differentiation. Geochemical indices related to Ce and Eu can be well distinguished, which may result from the oxygen fugacity and water content of magma. Additionally, it is observed that some new element association diagrams (i.e., Dy/Lu-Er/Lu, Gd/Dy-Er/Yb) can distinguish ore-forming types of rock bodies effectively, but the underlying geochemical mechanism has not been fully understood. In brief, the results of geochemical data mining in this paper can be used as the prospecting indicators, which can provide scientific basis for the study and prospecting of Yanshanian hydrothermal deposits in South China, and can also be used to actively explore the application of big data technology in mineralogy.

Key words: zircon; trace elements; big data; mineralization property; geochemical diagram

自然界的成岩成矿作用最终都以矿物形式呈现,多种交换机制(如类质同象置换)并存,忠实地记录了岩石和矿床的形成过程,对反演成岩成矿地球化学特征及找矿勘查具有重要的意义^[1-2]。前人研究表明,全岩地球化学参数,如 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 Rb/Sr 均为重要的岩体成矿潜力评价指标^[3-5]。然而,岩石容易遭受蚀变,使结果缺乏信服力。锆石广泛存在于各类岩石中,抗蚀变能力强,能基本保存矿物-熔体平衡阶段岩浆的物化参数,如温度、氧逸度等^[5],是研究岩体物化参数的理想矿物。

在矿产勘查领域,矿物原位微量元素的应用始于对斑岩-浅成低温热液系统的研究。利用锆石微量元素组成来反演岩浆的氧化还原性质,以及进一步预测岩浆岩成矿潜力和判断矿化规模是近几年的研究热点^[6-7]。锆石微量组分中,正Ce异常和负Eu异常对判断岩浆氧化性非常有效^[6-7],近十年来,涌现出系列经典找矿案例,尤其是随着激光剥蚀电感耦合等离子质谱技术(LA-ICP-MS)的飞速发展,矿物原位微量元素的精确定量分析已非常成熟。在岩体锆石U-Pb测年的同时,积累了大量的锆石微量元素数据。

大数据研究已在许多领域取得积极的成果^[8-9]。例如大数据方法研究在玄武岩地球化学环境判别方面取得的新进展^[10-12]。需要注意的是,地质大数据的研究表明,“大数据”并非特指数据样本的庞大,在于思维的创新,显著特点之一是对全部数据进行分析,而不是随机抽样来挖掘数据的关联关系。换言之,在地球化学判别方面,并非首先基于地球化学的背景知识去有目的抽取“重要指标元素”,而是对全部数据一视同仁,从数据相关关系出

发找到地球化学判别标志,进而由得出的结果驱动,再以地球化学背景知识尽可能理解或解译这些判别标志。

前已述及,利用锆石微量元素组成来反演岩浆的氧化还原状态及预测岩浆岩成矿潜力是近几年的研究热点,如Lu^[13]等利用锆石微量元素评价了全球典型斑岩铜矿,提出了系列比值(Ce/Nd , Dy/Y 等)判断岩体的成矿潜力。然而上述标志是否具有普适性?似乎并不清楚。更重要的是,是否隐藏更多的地球化学指标指示岩体成矿潜力?也并不明晰。钦杭结合带燕山期岩浆活动异常活跃,且具有明显的成矿分带性,经过长期的地质勘查和科技攻关的实践和研究,积累了较多的锆石微量元素数据。本文在前人研究的基础上,通过大数据方法,研究锆石微量元素组合对岩体成矿特征的判别,探讨有效的地球化学指标,为钦杭结合带燕山期热液矿床研究及找矿勘查提供科学依据,也是大数据技术在地球化学找矿方面的积极尝试。

1 地质背景

钦杭结合带燕山期花岗岩显著发育,是多期多阶段地壳运动和板块构造活动的产物(图1)。燕山期岩浆岩出露地区包括:①侏罗纪内陆岩浆岩,总体呈NE向和EW向分布,时代集中于165~155Ma,由钙碱性S型、I型花岗岩、正长岩和部分A型花岗岩组成^[14-15]。其中,南岭花岗岩带是这一时期的典型代表;②白垩纪岩浆岩^[16],几乎不出露侏罗纪花岗岩,呈NE向分布,形成时代集中于130~120Ma和107~87Ma,由I型、S型和A型花岗岩及少量碱性花岗岩组成^[17]。

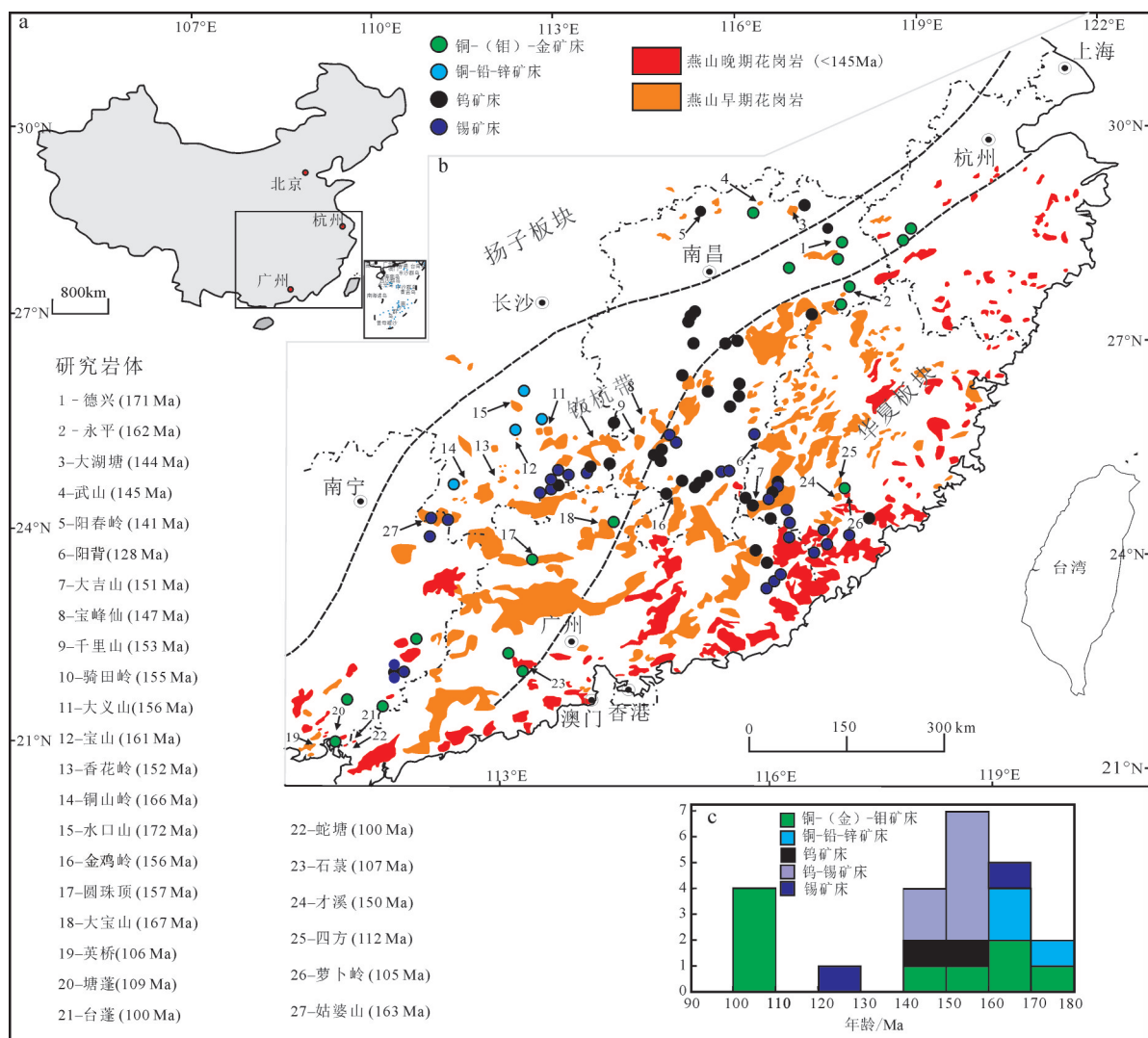


Fig. 1 Distribution of Yanshanian magmatic rocks and mineral deposits in Qinzhong - Hangzhou Bays

花岗岩同时伴随大量多金属矿床的形成。前人研究指出^[18-19],钦杭结合带燕山期存在3次大规模成矿作用,第一次发生在燕山早期180~160Ma,以赣东北和湘东南的铜、铅-锌、(金)矿化为代表,典型矿床有德兴斑岩铜矿、永平铜矿等。第二次发生在燕山中期160~139Ma,主要是南岭及相邻地区以钨、锡、铋-钼等有色稀有金属矿化为主的成矿作用^[18, 20-23],典型矿床有大湖塘、朱溪钨矿,柿竹园钨锡矿,芙蓉姑、婆山锡矿等。第三次发生在燕山晚期125~98Ma,以南岭地区锡、铀矿化和东南沿海地带的金、铜、铅、锌、银矿化为代表^[24-26],典型矿床如紫金山铜金矿等。

2 研究方法

2.1 数据来源与数据量

本次研究从已发表文献中收集来自钦杭带22个不同岩体的1273个锆石稀土元素数据,成矿类型包括铜-(金)-钼、铜-铅-锌、钨-锡等。具体选取了斑岩铜矿赋矿岩体10个,钨矿赋矿岩体3个,钨-锡矿赋矿岩体9个。值得注意的是,无论从晶体力学理论推导还是LA-ICP-MS实际测试结果,均证实La在锆石中的含量极低,几乎小于 0.1×10^{-6} ^[7, 13],且该元素极易受到锆石中富集轻稀土元素的包裹体(如磷灰石)干扰,因此本文采用除La外的Ce、Pr、

Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 13种稀土元素含量数据进行矿床类型的判别分析。

2.2 数据及处理方法

首先,利用Python语言编程实现对元素任意两两组合,得到Ce/Pr、Ce/Nd、Yb/Lu等共78种组合;之后再将13种单元元素含量值与78种元素含量比值联合,得到91个用以构建图解的端元。需要注意的是,在此步的数据处理过程中,由于各端元的数值范围差别巨大,需要先将各端元数值进行均一化处理,使每个端元数据均值在1~10之间,保证图解中的数据点分布范围相对均匀,易于判断区分效果。最后利用均一化处理后的数据,以穷举的方式生成二元图解和三角图解,共得到4095个二元图解和121485个三角图解。

为高效精准地筛选有效的地球化学图解,本研究引入Calinski-Harabasz (CH)指标,用以定量评价图解的判别效果。CH指标为聚类效果评价常用的一种指标,其详细表达如下(公式1):

$$CH = \frac{\text{tr}(B_k)m - k}{\text{tr}(W_k)k - 1} \quad (1)$$

其中, m 是样本数, k 为类别数, B_k 为类别之间的协方差矩阵, W_k 为类别内部数据的协方差矩阵,为矩阵的迹。

该指标通过衡量数据簇内部的协方差与数据簇之间的协方差,反映各类别数据簇之间的区分程度^[27]。CH值越大,表示各类矿床数据点簇内部数据之间联系越紧密,点簇彼此之间越分散,判别图解对3类不同矿床赋矿岩体中锆石的区分效果越好。通过对各图解中的CH值进行排序,初步筛选出CH

指数得分最高的前100个二元图解和前100个三角图解。

3 结果和讨论

筛选结果表明,以Eu、Ce元素含量及与其他元素含量比值作为端元的图解,能有效区分3种矿床类型,例如以Eu/Dy-Ce/Nd、Er/Lu-Ce/Sm为端元的二元图解(图2),含Eu/Gd、Eu/Dy端元的三元图解(图3)等。由图3可见,3种不同类型矿床赋矿岩体中的锆石稀土元素分布具有以下特征:①钨-锡(锡)矿床相关样品中,Eu、Ce与Nd、Sm、Dy等其他元素的比值分布范围相对集中,且比值较低;②斑岩铜矿样品中,Eu、Ce与其他元素的比值较高,分布范围也较广;③钨矿中样品的Eu、Ce元素相关比值分布与另外2种矿床类型重叠程度较高,难以有效区分。前2种特征反映出的信息,可理解为斑岩铜矿含矿岩体中Ce的正异常程度较高,Eu的负异常程度较低,意味着比钨-锡(锡)矿床岩体更高的氧逸度,这与斑岩铜矿含矿岩体氧逸度较高的认识吻合。

此外,本次挖掘发现,Dy/Yb-Er/Lu、Dy/Lu-Er/Lu、Gd/Dy-Er/Yb等元素含量比值对组成的二元图解,能对三类矿床赋矿岩体中的锆石进行有效区分(图4、图5-a),此类图解在前人研究中尚未见报道。本文从数据出发,挖掘数据之间可能存在的、隐含的相关关系,用数据驱动地球化学解译,与早先逻辑的、科学的研究方法不同。

氧逸度是重要的岩石学参数之一,能反映岩浆各阶段的氧化还原状态,对于地球早期环境演化及板块俯冲均有指示意义^[28]。氧逸度与斑岩铜矿的关

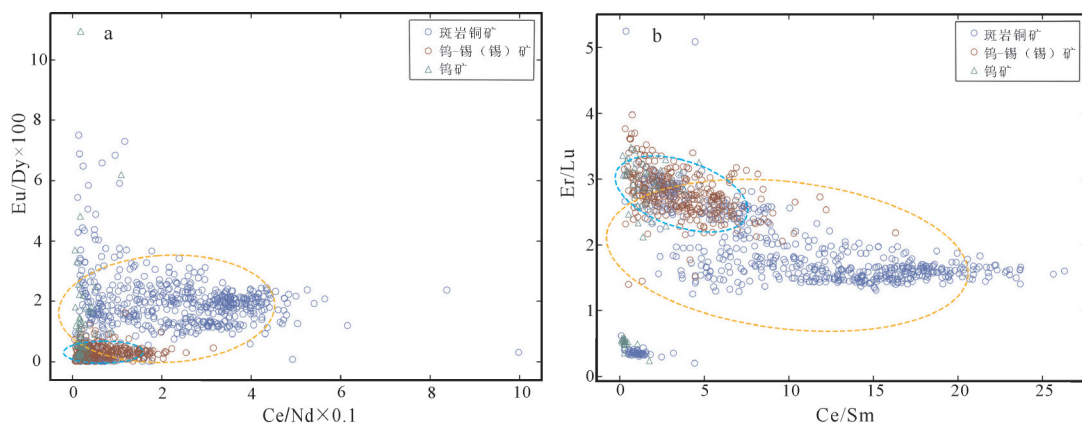


图2 Ce/Nd×0.1-Eu/Dy×100 (a)和Ce/Sm-Er/Lu (b)二元判别图解(坐标轴名称“×”号后面的数字表示缩放倍数)

Fig. 2 Ce/Nd×0.1-Eu/Dy×100 (a) and Ce/Sm-Er/Lu (b) binary discriminant diagrams

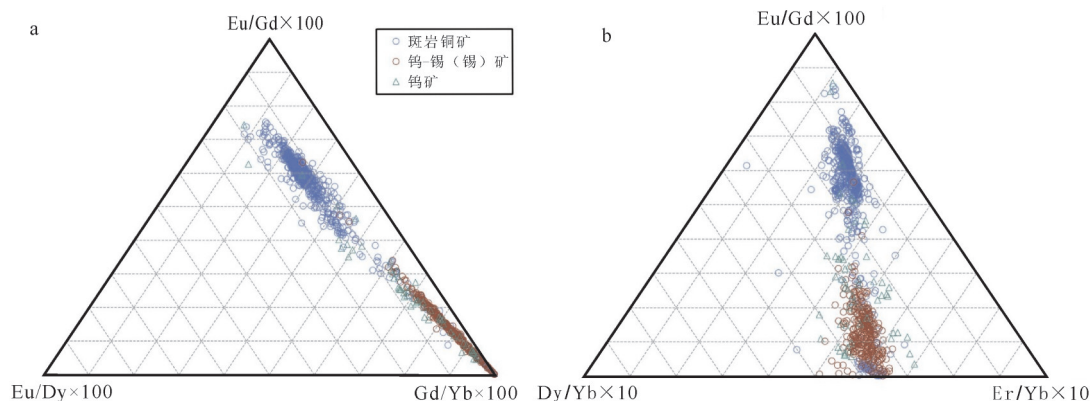


图3 Eu/Gd-Eu/Dy-Gd/Yb (a)和Eu/Gd-Dy/Yb-Er/Yb (b)三角判别图解(顶点名称“×”号后面的数字表示缩放倍数)

Fig. 3 Eu/Gd-Eu/Dy-Gd/Yb (a) and Eu/Gd-Dy/Yb-Er/Yb (b) triangular diagrams

系近年来为多数经济地质学家所关注,越来越多的证据表明,高氧逸度有利于斑岩铜矿矿化^[5-6, 29-31]。诸多的研究证实,高氧逸度是控制斑岩铜(金)矿床及浅成低温热液矿床形成的关键,甚至是决定性因素^[6, 31-33]。如Ballard^[6]等研究了智利超大型Chuquibambilla斑岩型铜矿带,发现含矿侵入岩的氧逸度高于不含矿岩石的氧逸度,而且认为高氧逸度是判别岩体成矿性的重要指标。Sun等^[34]深入讨论了铜、金矿床与汇聚板块边缘岩浆之间的联系,也得出相似的结论。氧逸度与铜金矿成矿关系的研究在国内也已广泛开展,如玉龙斑岩铜矿、冈底斯斑岩铜矿带、邦铺钼(铜)矿床、云南金平铜厂铜钼矿、紫金山铜金矿、大宝山铜矿、圆珠顶斑岩铜钼矿、桐村铜矿等^[17, 35-39]。高氧逸度是斑岩铜矿的普遍性特征之一,

逐渐成为共识。

本次研究指示,与Ce相关的元素组合可能反映了其氧逸度。此外,与Eu相关的判别图解同样能够对3种矿化类型岩体进行有效区分。Eu异常不仅与岩体形成的氧化还原环境有关,还与岩浆的富水性密切相关。岩体中的水在岩浆体系演化和成矿过程中均扮演极其重要的角色。有证据表明^[31, 40],形成于不同构造背景下的斑岩型矿床的成矿岩浆均具有富水的特征。以典型的俯冲带斑岩矿床为例,高含水量可以显著降低固相线温度,使洋壳易于部分熔融,有利于岩浆的形成。其次,高水含量可以改变岛弧岩浆的密度,提高弧岩浆的浮力,使其从地幔上涌到地壳,在此期间,两者进行了充分的壳幔混合作用,逐步形成富含挥发分(F、Cl等)和成矿

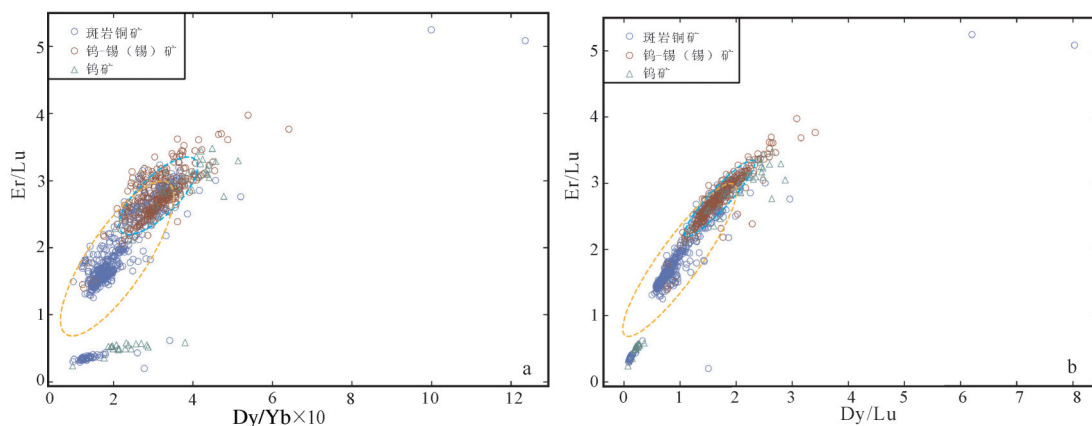


图4 Dy/Yb×10-Er/Lu(a)和Dy/Lu-Er/Lu(b)二元判别图解(坐标轴名称“×”号后面的数字表示缩放倍数)

Fig. 4 Dy/Yb×10-Er/Lu(a) and Dy/Lu-Er/Lu(b) binary discriminant diagrams

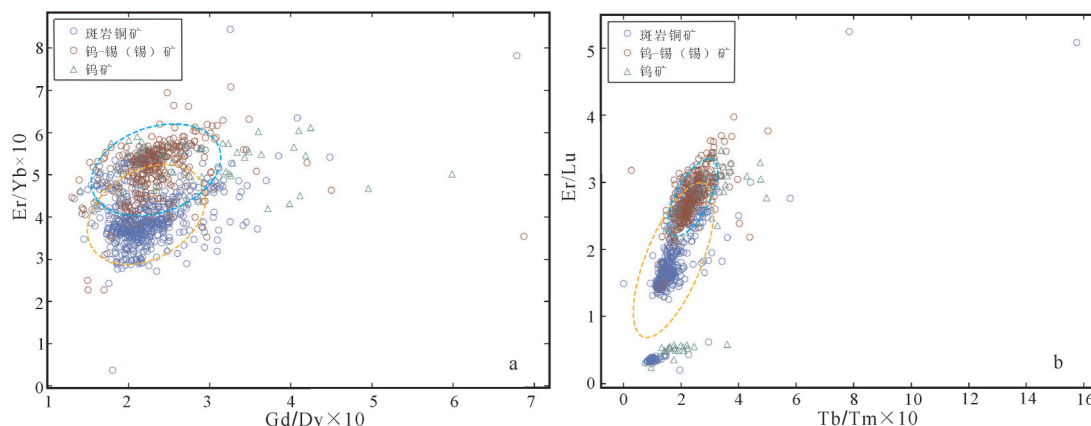


图5 Gd/Dy×10–Er/Yb×10(a)和 Tb/Tm×10– Er/Lu(b)二元判别图解(坐标轴名称“×”号后面的数字表示缩放倍数)

Fig. 5 Gd/Dy×10–Er/Yb×10(a) and Tb/Tm×10– Er/Lu (b) binary discriminant diagram

元素的岩浆^[32]。因而,与Eu相关的有效图解组合可能多于Ce相关的有效图解组合。值得注意的是,虽然Dy/Yb–Er/Lu、Dy/Lu–Er/Lu、Gd/Dy–Er/Yb等元素含量比值对组成的二元图解(图4、图5-a),能够对岩体赋矿类型进行有效区分。但这种现象未得到足够的理解,其背后隐含的地球化学意义尚待挖掘。

4 结 论

(1)岩体的成矿专属性是地质找矿中的实际问题,本次锆石微量的地球化学数据挖掘结果只是开启了岩体与成矿关系的冰山一角,还有诸多的未知亟待探索。

(2)本次研究结果表明,以Eu、Ce元素含量及与其他元素含量比值作为端元的图解,能有效区分岩体成矿类型。此外,还发现了一些新的元素组合图解(如Dy/Lu–Er/Lu、Gd/Dy–Er/Yb等),其背后隐含的地球化学机制尚未得到有效理解。

(3)本文的数据挖掘结果可以作为找矿标志使用,是大数据技术在地球化学找矿方面的积极探索。

致谢:本文在构思及写作过程中,先后得到中山大学沈文杰教授、成都理工大学宋昊教授的帮助,在论文评审过程中,审稿专家建设性的意见极大地提高升华了本文,在此一并深表感谢。

参考文献

[1]Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, et al. “Fingerprinting” tectono– magmatic provenance using trace elements in igneous

zircon[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2015, 170(46): 1–26.

[2]赵振华, 严爽. 矿物——找矿与成矿[J]. 岩石学报, 2019, 35(1): 31–68.

[3]Blevin P L. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia: implications for gold–rich ore systems[J]. Resource Geology, 2004, 54: 241–252.

[4]Li X, Chi G, Zhou Y, et al. Oxygen fugacity of Yanshanian granites in South China and implications for metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 88: 690–701.

[5]Shen P, Hattori K, Pan H, et al. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: zircon trace– element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt[J]. Economic Geology, 2015, 110: 1861–1878.

[6]Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2002, 144(3): 347–364.

[7]Dilles J H, Kent A J R, Wooden J L, et al. Zircon compositional evidence for sulfur– degassing from ore– forming arc magmas[J]. Economic Geology, 2015, 110: 241–251.

[8]周永章, 王俊, 左仁广, 等. 地质领域机器学习、深度学习及Python语言[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3173–3178.

[9]周永章, 陈烁, 张旗, 等. 大数据与数学地球科学研究进展——大数据与数学地球科学专题代序[J]. 岩石学报, 2018, 34(1): 256–263.

[10]王金荣, 潘振杰, 张旗, 等. 大陆板内玄武岩数据挖掘——成分多样性及在判别图中的表现[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 1919–1933.

[11]杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 全球岛弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图上的表现及初步解释[J]. 地质通报, 2016, 35(12): 1937–1949.

[12]Liu X L, Zhang Q, Li W C, et al. Applicability of large– ion lithophile and high field strength element basalt discrimination

- diagrams[J]. International Journal of Digital Earth, 2017, 11(7): 752–760.
- [13] Lu Y J, Loucks R R, Fiorentini M. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au Deposits[J]. Economic Geology, 2016, 19: 329–347.
- [14] 李晓峰, 易先奎, 朱和平. 德兴金山金矿床成矿流体来源: 小尺度构造和同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 2009, 28(1): 42–52.
- [15] Li Z. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4): 85–109.
- [16] Zhou X, Sun T, Shen W, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episode, 2006, 29: 26–33.
- [17] Qiu J T, Yu X Q, Santosh M, et al. The Late Mesozoic tectonic evolution and magmatic history of west Zhejiang, SE China: implications for regional metallogeny[J]. International Journal of Earth Sciences, 2014, 103(3): 713–735.
- [18] 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.
- [19] 毛景文, 张建东, 郭春丽. 斑岩铜矿—浅成低温热液银铅锌—远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 1–14.
- [20] 张文兰, 华仁民, 王汝成, 等. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究[J]. 地质学报, 2006, 80: 956–962.
- [21] Jie S X, Lei W X, Tao S, et al. Trace elements, U–Pb ages and Hf isotopes of zircons from Mesozoic granites in the western Nanling Range, South China: Implications for petrogenesis and W–Sn mineralization[J]. Lithos, 2011, 127: 468–482.
- [22] Feng Z H, Wang C Z, Zhang M H, et al. Unusually dumbbell-shaped Guposhan–Huashan twin granite plutons in Nanling Range of south China: Discussion on their incremental emplacement and growth mechanism[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 48: 9–23.
- [23] Huang L C, Jiang S Y. Highly fractionated S-type granites from the giant Dahutang tungsten deposit in Jiangnan Orogen, Southeast China: geochronology, petrogenesis and their relationship with W–mineralization[J]. Lithos, 2014, 202: 207–226.
- [24] Mao J, Zhang J, Pirajno F, et al. Porphyry Cu–Au–Mo–epithermal Ag–Pb–Zn–distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi province, East China—A linked ore system[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 203–216.
- [25] 梁锦, 周永章, 李红中, 等. 钦—杭结合带斑岩型铜矿的基本地质特征及成因分析[J]. 岩石学报, 2012, 28: 3361–3372.
- [26] Hong J S, Liang Q L, Leon B, et al. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry–epithermal Cu–Au–Mo–Ag ore system, SW Fujian Province, China: Constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 287–305.
- [27] Lukasiak S, Kowalski P A, Charytanowicz M, et al. Clustering using Flower Pollination Algorithm and Calinski–Harabasz Index [C]// Proceedings of the Evolutionary Computation, 2016.
- [28] Trail D, Waston E B, Tailby N D. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early earth’s atmosphere[J]. nature, 2011, 480: 79–82.
- [29] Liang H Y, Sun W, Su W, et al. Porphyry copper–gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration[J]. Economic Geology, 2009, 104: 587–596.
- [30] Qiu J T, Yu X Q, M S, et al. Geochronology and magmatic oxygen fugacity of the Tongcun molybdenum deposit, northwest Zhejiang, SE China[J]. Miner Deposita, 2013, 48: 545–556.
- [31] Richards J P. The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: implications for metallogeny[J]. Lithos, 2015, 233: 27–45.
- [32] Richards J P. Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction–modified lithosphere[J]. Geology, 2009, 37: 247–250.
- [33] Sun W, Huang R F, Li H, et al. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 97–131.
- [34] Sun W, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. nature, 2004, 431: 975–978.
- [35] Liang H Y, Campbell I H, Allen C. Zircon Ce⁴⁺/Ce³⁺ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet[J]. Miner Deposita, 2006, 41: 152–159.
- [36] 辛洪波, 曲晓明. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III)比值的约束[J]. 矿物学报, 2008, 28: 152–160.
- [37] Li C Y, Zhang H, Wang F Y, et al. The formation of the Dabaoshan porphyry molybdenum deposit induced by slab rollback[J]. Lithos, 2012, 150: 101–110.
- [38] 胥磊落, 毕献武, 陈佑伟, 等. 云南金平铜厂斑岩铜钼矿区岩体锆石 Ce⁴⁺/Ce³⁺比值及其对成矿的指示意义[J]. 矿物学报, 2012, 32: 74–82.
- [39] 黄文婷, 李晶, 梁华英, 等. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICPMS U–Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究[J]. 岩石学报, 2013, 29: 283–293.
- [40] Hou Z, Zhang H, Pan X, et al. Porphyry (Cu–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 39: 21–45.