

文章编号:1004-4116(2021)01-0001-15

Sr 和 Yb 两个元素对花岗岩理论的重要意义

——花岗岩研究的哲学思考

张旗^{1,2},焦守涛^{3,4},刘惠云^{1,2}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029;

3. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;4. 自然资源部地质信息工程技术创新中心,北京 100037)

摘要:花岗岩研究已有几百年的历史,可是花岗岩却没有形成自己独立的理论体系,也没有系统的花岗岩分类。花岗岩非常复杂,如何化繁为简,归纳出花岗岩最本质、最核心、最关键的标志,是一个非常棘手的任务。本文从哲学的角度出发,发现Sr和Yb可能是两个具有特殊含义的元素,特殊在于,它们不仅具有一般微量元素的特点,还具有特殊的功能,关键是它们的行为与花岗岩部分熔融后残留的变质矿物组成(如石榴石、斜长石等)有关。可能正是由于这个因素,才使Sr和Yb具有其他微量元素所不可匹敌的功能。本文按照Sr、Yb的排列组合提出了一个系统的花岗岩分类。对于花岗岩的地球动力学意义,学术界一直有争论,本文认为板块构造只能影响到大陆边缘,影响不到大陆内部。大陆演化研究最重要的任务是恢复大陆地质历史上的变化,如大陆地质演化不同时期曾经发生过的伸展和挤压(有的还有旋转,是挤压的副产品)、抬升和垮塌、造山与盆地、加厚与减薄等。如何识别上述变化及其过程,目前在方法学上还十分困难。依靠Sr、Yb及其与残留相平衡的理论则提出了一个方案,能够解决或大体解决上述问题。例如,埃达克岩(高Sr低Yb)代表加厚地壳,南岭型(非常低Sr高Yb)代表减薄地壳,浙闽型(低Sr高Yb)和广西型(高Sr高Yb)代表正常厚度的地壳,喜马拉雅型花岗岩(低Sr低Yb)代表中压与高压过渡的状况。因此,按照Sr和Yb的变化,即可大致恢复地质历史时期大陆地壳温压条件的变化,推测大陆地貌的变化(平原、丘陵、高原、山脉),探讨构造应力的变化(挤压导致加厚,伸展导致减薄)等。此外,不同类型花岗岩还与成矿有关,大体是:埃达克岩与金铜有关,南岭型与钨锡有关,喜马拉雅型与金有关,而浙闽型、广西型基本上是不利于成矿的。但是,实践中也有金铜钨锡在空间上共生的实例,则金铜与钨锡可能成因上或成矿时代上或控矿因素上有所不同。问题还很复杂,还有许多现象很难解释,笔者只是从宏观角度给出了一个思路,一个概念,很多细节并不清楚。研究表明,科学与哲学是密切相关的,哲学是科学的高度概括。本文尝试从哲学的角度对纷繁复杂的花岗岩进行归纳和简化,只是一个初步的尝试,还有更多问题需要认真研究。

关键词:Sr; Yb; 花岗岩; 理论; 哲学; 分类; 压力; 温度; 地球化学; 地球动力学意义

中图分类号:P588.12

文献标志码:A

花岗岩研究已有几百年的历史了,可是花岗岩却没有形成自己独立的理论体系,也没有一个系统的花岗岩分类。花岗岩目前的理论基本上是沿袭了玄武岩的理论^[1-2](张旗等,2008;张旗和李承东,2012)。花岗岩非常复杂,比玄武岩复杂不知多少倍。

如何提纲挈领地抓住花岗岩的核心问题和关键所在,是一个非常困难的问题。

什么是花岗岩?花岗岩属于火成岩,一般认为,凡是火成的、SiO₂ > 56%的侵入岩和喷出岩都属于花岗岩类。仔细区分,其中还包括一部分闪长岩(安

收稿日期:2020-07-29

基金项目:本文受国家重点研发计划项目《基于“地质云”平台的深部找矿知识挖掘》(2016YFC0600510)、《基于地质云的地质灾害基础信息提取与大数据分析挖掘》(2018YFC1505501)、中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室项目《镁铁—超镁铁岩大数据研究》(81300001)和中国地质调查局地调项目(DD20190318)联合资助

作者简介:张旗(1937~),男,研究员,岩石学和地球化学专业。E-mail:zq1937@126.com

山岩)。花岗岩类非常复杂,各种各样花岗岩的术语有近百种,如淡色花岗岩、奥长环斑花岗岩、文象花岗岩、晶洞花岗岩、钠闪花岗岩、花斑岩、白岗岩、玻苏英安岩、长英斑岩、电英岩、多霞钠长岩、方沸闪长岩、方钠闪长岩、霏细岩、副长石闪长岩、球状花岗岩、碎斑花岗岩、堆晶花岗岩、翁岗岩、紫苏花岗岩等等(以上大部分引自Le Maitre, 1989),还不包括喷出岩。目前可以用仪器检出的元素也有几十项,如果加上各种同位素就更多了。那么,如此纷繁复杂的花岗岩的核心是什么呢?能否用最简单的语言加以概括呢?这应当是一个哲学命题了。笔者10年前曾就花岗岩与哲学的关系作过一些思考(见岩石学报网站:<http://www.ysxb.ac.cn/ysxb/ch/index.aspx> 2010),思考的出发点是对花岗岩现有理论的质疑以及学术界对花岗岩理论的诸多争论,目的是尝试能否从哲学角度找到出路。

哲学与地质有点渊源可能很多人不知道,但是大家一定知道18世纪爆发的一场“水火之争”。水成论者认为地质变化的原因是水的作用,所有岩石都是水成岩;火成论派则认为地质的变化都是火山的作用,所有的岩石都是火成岩。讲水的排斥火,讲火的排斥水,水火之争愈演愈烈。据载有一次两派相约在英国爱丁堡附近的一个山丘下集会,因为对这里地层结构的成因各有不同的看法,遂展开了一场学术大辩论,从争论发展到相互指责、对骂,最后竟然发展到拳打脚踢,演出了近代科学史上别开生面的一场闹剧,可谓水火誓不两立了。

当时德国著名的哲学家黑格尔关注过这场争论,他在1817年出版的《自然哲学》中说:“这两种原理都必须承认为本质的,但它们各自都有片面性”。当时,在地质学界看来是水火不相容的事情,在哲学家看来则相反。随着地质研究的深入,进一步验证了黑格尔的观点是正确的,虽然黑格尔并没有进行过任何这方面的地质考察。他是以一个哲学家的眼光进行思考的结果(王恒富,2010)。

科学(Science)是什么?科学这个术语的最初的直观含义就是分门别类,于是,科学就越分越细,科学就越来越复杂。实际上,把简单变为复杂并不难,难的是从复杂到简单。不应当把哲学和科学割裂开来,科学只是认识真理的一种工具。科学需要哲学,虽然哲学不能对具体科学有所帮助,但是,它提供的思维方式可以使科学少走弯路。哲学是科学的高度概括,概括的越简单越精髓。无论从什么角度,哲学(包括逻辑学)对于科学是绝对有益的。可惜大多数

研究科学的人缺了这一课,包括笔者在内。

一个事物存在各种各样的矛盾关系,矛盾的种类很多,有大有小,有轻有重,其中的主要矛盾往往决定了事物的主要特征。一般来说,抓住了主要矛盾,就抓住了事物的牛鼻子,就可以比较清晰地了解事物的本来面目。那么,花岗岩中有哪些矛盾呢?应当很多,如幔源与壳源、富钾与贫钾、富硅与贫硅、富铝与贫铝、富铁与贫铁、富碱与贫碱、富水与贫水、拉斑与钙碱性、高温与低温、高压与低压、熔体与流体、高Sr与低Sr、高Yb与低Yb、I型与S型、富集与亏损、伸展与挤压、加厚与减薄、碰撞前与碰撞后、混合与混染、结晶与熔融,以及不同的REE分布、不同的微量元素分布、正锆异常与负锆异常、LILE与HFSE等等,可以罗列很多。但是,其中哪些是具有全局性意义的呢?经过10年的思考,笔者认为,从地球化学角度,花岗岩几十种微量元素中,大概以Sr和Yb两个元素最重要,抓住这两个元素,花岗岩的许多基本问题大概就可以得到或大部分得到解决了。例如,花岗岩分类的问题、花岗岩形成的压力问题、花岗岩与成矿的关系问题、花岗岩的地球动力学问题等等。

1 花岗岩研究的几个关键问题

在花岗岩研究中,人们最想知道的是:它来自哪里?在什么条件下形成?有什么用?前面已经罗列了花岗岩研究中存在的一系列问题,下面简要讨论其中的几个关键问题。

1.1 玄武岩的理论是什么

前面说花岗岩是套用了玄武岩的理论,那首先来了解一下玄武岩的理论是什么?

(1)玄武岩来自哪里?玄武岩来自地幔,是地幔部分熔融形成的。这是众所周知的,无需进一步说明。

(2)玄武岩的核心问题是什么?是岩浆分离结晶的理论^[5-9](Bowen, 1928; Carmichael et al., 1974; Wilson, 1989; Best and Christiansen, 2001; 都城秋穗和久城育夫,1984)。地幔部分熔融的玄武岩应当是具有原始岩浆特点的,可是,人们所见到的玄武岩几乎很少是原始岩浆成分的,暗示岩浆一定发生了变化或演化。例如MORB, MORB几乎很少是原始岩浆的,更有甚者, OIB几乎统统是经过演化的,世界上几乎见不到OIB的原始岩浆^[6-11](Carmichael et al., 1974; Wilson, 1989; Best and Christiansen, 2001;

Pearce et al., 1984; 张旗和周国庆, 2001)。因此, 岩浆演化即是玄武岩最重要、最核心理论, 包括岩浆分离结晶的理论、岩浆混合、岩浆混染、交代的理论等等^[6-8, 12-14](Wager and Brown, 1968; Carmichael et al., 1974; Cox et al., 1979; Wilson, 1989; Coffin and Eldholm, 1994; Best and Christiansen, 2001)。

(3) 玄武岩理论来自哪里? 主要来自对大火成岩省的研究, 例如, 上个世纪50~60年代对格陵兰Skaergaard和南非Bushveld等大型层状侵入体的组成、成分、层序及其变化的研究^[6-7, 12](Wager and Brown, 1968; Carmichael et al., 1974; Wilson, 1989)。玄武岩结晶分离的理论并非来自对玄武岩岩浆本身, 而是来自对堆晶岩层序变化规律的研究总结出来的^[1, 6](Wager and Brown, 1968; 张旗等, 2008)。

(4) 玄武岩的地球动力学意义是什么? 是构造环境。这是Pearce等学者在上个世纪70~80年代确立的^[10, 15-20](Pearce and Cann, 1973; Glassley, 1974; Pearce and Norry, 1979; Capedri et al., 1980; Wood, 1980; Mullen, 1983; Pearce et al., 1984)。因为, 全球玄武岩主要来自板块扩张脊、岛弧和板内这三个大的构造背景。玄武岩的研究很大一部分是围绕这个题目来进行的, 并且按照将今论古的原则将其推进到中生代、古生代、元古宙甚至太古宙^[1-2]。

如果我们承认上面的见解是合适的, 那么, 花岗岩套用玄武岩的理论有什么基础呢? 几乎没有。(1) 玄武岩来自地幔, 花岗岩来自地壳, 玄武岩与花岗岩从根本上就不同。(2) 玄武岩是岩浆, 玄武岩有岩浆房; 花岗岩是岩浆, 花岗岩也有岩浆房, 这没有问题。问题是二者的粘性不同, 玄武岩贫硅, 粘性低, 在岩浆房内可以发生分离结晶作用, 形成一系列的堆晶岩及残余岩浆(演化的岩浆)。花岗岩富硅, 粘性高, 在岩浆房内几乎不可能发生分离结晶作用。玄武岩有原始岩浆, 花岗岩有吗? 玄武岩有堆晶岩, 花岗岩有吗? 玄武岩有与堆晶岩匹配的残余岩浆, 花岗岩的残余岩浆是什么, 在哪里? (3) 玄武岩的地球动力学意义是构造环境; 花岗岩主要来自大陆, 大陆已经属于板内环境了, 那么, 大陆花岗岩的地球动力学意义又是什么呢?^[1-2]

1.2 花岗岩形成过程中“水”重要还是“热”重要

(1) 花岗岩形成过程中“水”的作用

水在花岗岩形成过程中起什么作用? 起多大作用? Arndt (2013)指出^[21], 水是形成大量花岗质熔体的必要条件。Campbell and Taylor (1983)^[22]则强调,

“No Water, No Granite(无水即无花岗岩)”, 把水对花岗岩的作用提高到无以复加的地步, 是合适还是不合适呢?

水存在于所有岩浆和地幔岩石中, 并且在大部分陆壳岩浆产生中扮演了重要角色^[23](续海金和马昌前, 2003)。邵同宾等(2011)指出^[24], 水的加入不仅可以有效地降低岩石的固相线(熔点)和熔体的粘度, 而且会减弱硅酸盐矿物的Si-O键, 引起水致弱化作用。研究表明, 在花岗岩实验中只要加进2%的水, 即可明显改变花岗岩的黏性, 使黏性降低一半。而根据Baker (1998)^[25]的研究, 在800℃条件下往铝质花岗岩熔体中加入2%的水即可使其黏性下降6个数量级。但是, 笔者认为, 许多实验设定的在饱和水或水含量>2%~5%的情况下得到的实验结果, 与真实的下地壳情况相去甚远, 是需要慎重对待的^[26-27](张旗, 2014 a, b)。

大陆下地壳总体上是贫水的, 主要以自由水和结构水两种状态存在^[28](张超等, 2012)。大陆下地壳的自由水在分布范围和数量上非常有限的^[29](Wannamaker, 2000)。对于下地壳部分熔融而言, 微量自由水的影响是可以忽略不计的^[30](Clemens and Vielzeuf, 1987)。角闪石是基性下地壳中最重要的含水矿物, 存在广泛的压力和温度区间($p < 2.6 \text{ GPa}$, $t < 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, Vielzeuf and Schmidt, 2001), 伴随角闪石脱水的变质基性岩在缺乏流体相条件下的熔融是下地壳最重要的熔融方式之一。被用来进行脱水熔融实验的角闪岩样品(或者蚀变玄武岩)无论其原岩是碱性玄武岩还是拉斑玄武岩, 实际矿物组合中角闪石的含量为45%~76%。假设角闪石含水为2%, 由角闪石实际含量计算得到的全岩水含量在0.9%~1.5%之间^[28](张超等, 2012)。杨晓松等(2001)^[31]指出, 在地壳深部存在大量自由水的可能性很小, 因此岩石脱水熔融(dehydration melting)或称为缺水熔融(vapor-absent melting)可能是地壳深熔的主要机制^[32](张旗, 2015)。

矿床学教科书估计的花岗岩(浆)平均含水量是3%, 岩石学教科书估计的是2%, 有人估计可能还要高(2%~6%, Holtz et al., 2001), 当压力达到500 MPa时, 水在岩浆中的溶解度就超过10%; 而当压力为1000 MPa时, 水在花岗质岩浆中的溶解度可以达到20%(华仁民和王登红^[33], 2012及其所附的参考文献)。而笔者估计一般不超过1%(张旗, 2015)。笔者认为, 花岗岩中的水是很少的, 这不足1%的还不是游离水(自由水), 而是以结构水的形式存在。水

一旦进入晶格,即不可能在降温过程中被“溶解”出来^[32](张旗,2015)。许多火山喷发物含有大量的水汽,在现代火山区或熄灭不久的火山区还有大规模的水热活动。这并不表明岩浆含水是丰富的,因为,上述火山喷发带来的水大部分是外生水,只有少量是来源于深部的^[34](沈照理和许绍悼,1985)。刘勇胜和高山^[35](1998)指出,地壳岩石深熔主要发生在缺流体相条件下^[36-38](Rutter and Wyllie,1988; Thompson et al.,1995; Harris et al.,1995),这可能是大多数花岗质岩浆产生的主要原因^[32](张旗,2015)。

(2) 花岗岩形成过程中热的作用

上述研究表明,花岗岩形成第一需要的不是水而是热。通常把一次花岗岩侵入过程说成是一次热事件,就是对这个作用的最好的表述。地壳随深度增加,按正常的地热增温率计算,地壳厚度即使达到50~60 km,也不足以达到使花岗岩达到部分熔融的温度(700℃~900℃)。因此,下地壳熔融需要有来自地幔的热供给才行^[1-2](张旗等,2008;张旗和李承东,2012)。地幔的热可能有两个来源:一个是板块俯冲使地幔楔发生部分熔融形成的玄武岩上升至岛弧或陆缘弧底部,加热下地壳使之达到可以部分熔融的程度。另一个是来自地幔深部的热以软流圈地幔上涌或底辟的形式加热下地壳底部导致部分熔融形成花岗岩。除此之外,没有其他热的来源。教科书有一种见解,认为玄武岩岩浆上升到地壳中部(或内部)也可使地壳发生部分熔融形成花岗岩,这是不可能的。因为玄武岩带来的热不可能保持很长的时间,野外天然实验室也没有这样的实例^[1-2,32](张旗等,2008;张旗和李承东,2012;张旗,2015)。花岗岩熔融的源区只可能在下地壳底部,不可能在地壳内部。这个结论也说明,所谓的碰撞花岗岩也是不可能的,碰撞是刚性地块相互之间的作用,主要发生在地壳浅部,而花岗岩的热来源于地幔深部。浅部地壳碰撞引发的作用不可能传递到地壳深部,更不可能波及到地幔深部。此外,碰撞导致的地壳摩擦产生的热非常局限,时间非常短暂,也不可能导致地壳熔融生成花岗岩。因此,碰撞产生花岗岩不过是一种臆想。有人还认为,地壳减薄导致地幔抬升可能导致下地壳底部被加热,这也是不可能的。因为下地壳底部是岩石圈地幔,相当于软流圈地幔来说是冷的、刚性的、轻的。只有软流圈地幔上涌,穿过岩石圈地幔,直接与地壳接触才能使下地壳发生部分熔融。因此,地壳表层或浅部或内部发生的任何构造、变动,均与花岗岩的形成无关。一切岩浆活动,包括基性的和酸性的岩

浆活动,完全是地幔内部事件的结果,与地壳的活动无关。

看来,Campbell的那句话应当修改一下,改成:No hot, No Granite^[22]。有没有花岗岩,取决于有没有足够的热,而且这个热只可能来自地幔,水是无要紧要的,花岗岩熔融基本上是在缺水的条件下实现的。实验室可以任意加水,野外有野外的规律,在天然实验室条件下任意加水是完全不可能的。

由于花岗岩形成需要足够的持续的热的供给,故花岗岩熔融最可能的部位在下地壳底部,这里最贴近地幔。地壳内部即使有幔源岩浆贯入,也不可能产生花岗岩^[32,39](张旗,2015;张旗和焦守涛,2020)。所以,教科书的这个说法是没有依据的。

地幔的热有两个来源:一个是板块俯冲导致地幔发生部分熔融带来的热,通常发生在板块的汇聚边缘;另一个则来自地幔深部,类似地幔热点模式,发生在大陆内部。在板块内部,软流圈地幔上涌是随机的,就像热点的分布是随机的一样,目前人们还无法了解下地幔的热是怎么产生和热从哪里上升的机制。

1.3 花岗岩形成的源区问题

花岗岩是下地壳部分熔融形成的,花岗岩基本上不可能是地幔部分熔融形成的。地幔部分熔融一般形成玄武岩类。最近的大数据研究表明,玄武岩与安山岩的分界线可能不是原先确定的 $\text{SiO}_2 = 52\%$,而应当是 $\text{SiO}_2 = 55\%$ ^[40](张旗等,2019)。地幔在什么情况下可以形成富硅的岩浆?大抵有两种:(1)地幔加水的情况下可以形成富硅的岩浆,如安山岩,高镁安山岩(包括赞岐岩、玻安岩)等;(2)玄武岩分离结晶形成安山玄武岩和安山岩。因此,不排除有部分基性岩的 SiO_2 含量可以超过56%。野外出露的这些岩石,大多与玄武岩类(辉长岩类)伴生,虽然其 SiO_2 含量超过了56%,依然属于幔源岩浆而非壳源岩浆,不是本文考虑的范围。本文只讨论壳源岩浆。

地壳非常复杂,地壳可以简单的区分为陆壳和洋壳。洋壳处于洋盆内,洋壳的组成主要是玄武质的,岛弧基底一般也是玄武岩成分的变质岩。因此,洋壳部分熔融形成的花岗岩显然具有明显的地幔同位素印记,而这并不表明花岗岩就是幔源的。陆壳处于大陆,成分五花八门,什么情况都可能出现。陆壳有多复杂,你拿一份地质图(1:20万或1:50万均可)看看就明白了,一份地质图,有同时代的地质

体,不同成分的岩石,不同的构造背景等。地质图有多复杂,下地壳底部就可能有多复杂,不同的只是统统是变质岩而已,各种岩石均相对缺水而已。在极端的情况下,陆壳下地壳的一端是典型的沉积岩如泥岩、砂岩、碳酸盐岩等,另一端是基性—超基性岩,有的实际上就是合并入陆壳的洋壳。因此,大陆下地壳部分熔融形成的花岗岩就可能具有各种各样的成分,从Nd、Hf同位素上看,既有典型陆源的,也有典型幔源的。一个有一定规模的花岗岩来源于一个单一源区的可能性几乎没有。其实,所谓的幔源,并非直接来自于地幔,而是地幔部分熔融形成的岩浆直接贴近到地壳底部,成为地壳组成的一员。由这样的地壳部分熔融形成的花岗岩当然具有幔源的特征。此外,岛弧环境下形成的杂砂岩,也是典型幔源的。

洋壳和陆壳是否可以作为花岗岩的两个最简单的组成呢?不可能。因为,洋壳虽然简单,但是,玄武岩成分也是变化的,此外,陆壳组成更加复杂,古老陆块基底与新生陆壳基底就明显不同(如华北地块与北方造山带)。以SiO₂含量为例,陆壳肯定是富硅的,洋壳贫硅,但是,无论富硅贫硅,SiO₂的变化都是很大的,是一个像光谱一样的既连续又有间断的排列。同样,幔源与壳源也没有一个截然的界线,许多研究提出的壳幔混合的来源,实际上可能就是地壳组成复杂变化的结果。

1.4 ISMA型花岗岩问题

ISMA是学术界最常使用的概念,其实是几个不同的花岗岩类型的组合。ISMA不是一个系统的概念,其中的I型和S型花岗岩是一组,反映的是花岗岩形成的源区组成的不同,I型的源岩是早先的火成岩(Igneous),S型的源岩是早先的沉积岩(Sedimentary rock)。M型花岗岩指的是与蛇绿岩相伴的规模很小的花岗岩,早先认为其是幔源的(Mantle),实际上是洋壳辉长岩部分熔融的产物,仍然是壳源的^[1](张旗和周国庆,2001)。许多所谓的M型花岗岩其实还处于花岗岩岩浆形成的雏形阶段,从本质上说还处于初始部分熔融形成的熔体阶段,还没有达到稳定的岩浆阶段,因而,M型花岗岩体积虽然很小(很少超过200 m³),变化却可以很大^[1](张旗和周国庆,2001)。而A型花岗岩则是与地壳伸展作用有关的产于板内构造环境的富碱性的花岗岩。所以,虽然上述4类涵盖了全球各种各样的花岗岩,但是,并不是一个统一的分类,只是拼凑的组合而已。

2 Sr和Yb是花岗岩两个最关键的要素

上一节介绍了花岗岩若干关键性问题,那么,什么是花岗岩最核心的要素呢?如何用最简单的思路来概括花岗岩呢?经过长期的考察,笔者认为,Sr和Yb两个元素可能是花岗岩最核心的要素。只要抓住这两个元素,花岗岩的地球动力学意义,其形成的温度压力条件大体即可知晓,包括花岗岩与成矿的关系大概也可以略知一二了。

Sr是第五周期IIA族元素,在自然界有4个同位素,Sr主要以类质同象的形式分布在造岩矿物中,很少形成自己的独立矿物。Sr的离子半径(0.113 nm)和Ca(0.099 nm)相似,在晶格中通常呈类质同象与Ca在一起且可以相互替代占位。Sr是大离子亲石元素,与K、Rb、Cs等元素关系密切,由于LILE地球化学性质活泼,在岩浆演化过程中容易发生变化,还明显受蚀变等作用的影响。制约Sr含量变化的因素很多,但是,有一点不同的是,在花岗岩中,Sr主要受花岗岩部分熔融时源区斜长石组分的控制。如果部分熔融后源区残留变质岩中有大量斜长石存在,Sr主要被束缚在斜长石中,熔出的花岗岩就是贫Sr的。尽管在随后岩浆演化(流动分异、混合、混染以及温度压力变化等)的过程中可以发生很多事情,包括K、Rb、Cs等LILE元素可以有很大的变化,但是,Sr不同,它只能在一定的范围内浮动,不可能大规模改变花岗岩贫Sr的特点。

Sr的这个特征与源区Sr含量也没有关系。众所周知,不同的玄武岩中,MORB的Sr含量是最低的,平均仅 $120 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ (Sun and McDonough, 1989; Pearce et al., 1984)^[10,41]。但是,这种MORB在高压下形成的埃达克岩,Sr含量可高达几百至上千 $\times 10^{-6}$,是全球所有埃达克岩Sr含量最高的(例如O型埃达克岩)。而在大陆内形成的埃达克岩,源区陆壳的Sr含量比MORB高2~3倍,而在地壳加厚的情况下形成的埃达克岩大多仅仅达到埃达克岩Sr含量的下限附近(例如C型埃达克岩)。而在地壳减薄时形成的南岭型花岗岩(A型花岗岩),源区Sr含量可能很高(至少大于MORB),但是,形成的南岭型花岗岩的Sr含量通常很难超过 100×10^{-6} 。上述情况说明,源区Sr含量可能对花岗岩的Sr含量有影响,但是,这个影响是可控,不足以改变花岗岩贫Sr和富Sr的基本事实。然而,蚀变作用对Sr的影响是比较大的,在某些强烈蚀变的情况下,花岗岩中的中—更长石统统

转变为钠长石, Ca流失了, 将导致Sr的流失。在矿区内这个现象值得注意, 有些矿区同时存在富Sr与贫Sr的花岗岩, 可能与这个因素有关^[42](张鲲鹏, 2012)。

Yb是HREE的代表, 具有HFSE的特征, 在岩浆演化过程中性质稳定, 不易变化。Yb也有一个不同于其他HFSE的特点, 即其主要与石榴石具有强烈的亲和性(其次为辉石和角闪石)。在花岗岩形成过程中, 源区如果有石榴石存在, Yb基本上都保存在石榴石中, 熔出的花岗岩就是贫Yb的。Y与Yb的性质类似, Y高, Yb也高, 具有明显的相关性。但是, Yb与Y也有一些不同, Yb是典型的重稀土元素的特征, 而Y的性质更接近中稀土元素。

Sr和Yb与残留相平衡这个性质, 通常并不为学术界所关注, 学术界通常将Sr看作为一般的LILE, 以为Sr的性质主要与岩浆演化有关, 而忽略了残留相斜长石的有无才是Sr含量多寡的第一要素。对Yb也如此, 学术界认为Yb是HREE和HFSE的特征元素, 与Nb、Ta、Zr等类似, 但是, 也忽略了控制Yb的最重要的石榴石的问题。由于存在这个认识, 遂导致学术界认为埃达克岩与压力无关, 埃达克岩没有什么意义。其实, 埃达克岩是否与压力有关, Defant and Drummond(1990)^[43]早已解决了, 笔者在这里没有标新立异, 而是坚持了Defant and Drummond(1990)^[43]的解释。按照Defant and Drummond(1990)的解释^[43], 高Sr低Yb说明是在高压背景下形成的, 低Sr高Yb说明是低压的产物。高Sr允许有一个变化范围, 在这个范围内, 岩浆结晶分离、混合、混染、交代、部分熔融程度不同、方式不同、源区性质等等, 均可以是变化的, 这种变化会导致Sr含量的某些变化, 但是, Sr含量无论如何变化, 高Sr很少可能变化成为低Sr(不包括强烈的蚀变作用)。几十年的实践证明, Defant and Drummond(1990)^[43]的思想是正确的, 是经得起实践检验的^[39](张旗和焦守涛, 2020), 这是Sr与Yb与众不同的特殊性质决定的。

Sr和Yb上述特殊的地球化学性质非常重要, 它能够解决花岗岩的哪些問題呢? 下面从4个方面作一简要的概述。

2.1 花岗岩形成压力的问题

(1) 花岗岩与残留相平衡的理论

花岗岩形成的压力一直是困扰学术界的难题。实验研究可以任意调节温度压力以及水含量开展对花岗岩熔融的实验, 花岗岩侵位时的温度也能够采

用各种不同的方法予以测定。然而对于花岗岩形成的压力却没有明确的标志来判断, 直到Kay(1978)和Defant and Drummond(1990)^[43-44]提出埃达克岩与残留相平衡的理论, 花岗岩形成的压力问题才有了可能解决的方案, 虽然这个压力还具有许多不确定性, 还比较粗糙。这个问题的解决, 不是依靠花岗岩自身的理论, 而是花岗岩与变质岩结合的产物, 是变质岩对花岗岩的贡献。

(2) 埃达克岩与高压背景有关

按照上述作者提出的花岗岩与残留相平衡的理论, 高Sr低Yb的埃达克岩与高压背景有关。因为, 当俯冲的玄武岩板片深入地幔变质达到榴辉岩相时, 玄武岩板片主要由绿辉石和石榴石组成。由于Yb主要赋存在石榴石中, 熔出的岩浆中Yb就减少了, 花岗岩即亏损Yb(由于Y的地球化学性质与Yb接近, 故相应的也亏损Y)。由于斜长石在榴辉岩中不稳定, 榴辉岩相中斜长石少至无, 故残留相中Sr明显亏损, 绝大部分Sr进入熔体, 使部分熔融的花岗岩富Sr。花岗岩富Sr贫Yb, 是在高压条件下形成的。

在大陆地区, 陆壳成分变化很大。当地壳加厚达到榴辉岩相时, 如果有来自地幔的热使下地壳底部发生部分熔融, 形成的岩浆也必然具有埃达克岩富Sr贫Yb的特征。洋壳的榴辉岩比较简单, 陆壳的榴辉岩可能就比较复杂了, 除了主要成员绿辉石和石榴石外, 还可以有少量的角闪石、金云母、绿帘石、斜长石、蓝晶石、夕线石、金红石等。这时, 无论下地壳的源岩是什么, 只要压力达到石榴石出现、斜长石消失的条件, 部分熔融出现的即是埃达克岩(图1a)。由于埃达克岩来自陆壳底部, 陆壳富钾, 埃达克岩继承了源区富钾的特征, 就不同于板片熔融的原始的埃达克岩了。前者我们称其为C型埃达克岩(陆壳作为源区^[45-46], 张旗等, 2001 a, b), 后者即为O型埃达克岩(洋壳作为源区)。

Defant and Drummond(1990)^[43]指出, 当俯冲的板片还不够深时, 花岗岩是在角闪岩相条件下发生部分熔融的, 这时的变质岩属于角闪岩相, 主要由斜长石、角闪石、辉石等组成, 不存在石榴石, 所以Yb大部进入岩浆, 使花岗岩富Yb。角闪岩相中有大量的斜长石, Sr被保存在下地壳斜长石中, 只有少量进入岩浆, 故花岗岩贫Sr。就是岛弧火山岩通常所具有的地球化学特征, 被称为安山岩—英安岩—流纹岩组合(Defant and Drummond, 1990)^[43]。如果下地壳底部也为角闪岩相, 这时, 无论下地壳是什么组成的, 是斜长角闪岩、角闪石岩、黑云母片麻岩、大理

岩、辉石角闪岩、斜长岩等。在这种情况下发生部分熔融,形成的花岗岩必定也是低Sr高Yb的。这类花岗岩没有正式的名称,有人称其为正常的花岗岩。该类花岗岩数量巨大,概念含糊,由于该类型花岗岩在浙闽两省分布较多,故将其称为浙闽型(张旗等,2008)。

(3) 低压背景:南岭型花岗岩的发现

我们在研究浙闽型时,发现当Sr含量很低时(例如低于 100×10^{-6}),花岗岩的REE分布会出现一个明显的负铕异常(通常的标志是 $Sm/Eu > 10$ 或 $Eu/Eu^* < 0.3$),就类似A型花岗岩的特征了,而学术界普遍认为A型花岗岩是地壳伸展减薄的产物^[47-50](Whalen, et al., 1987; Auwera et al., 2003; Bogaerts et al., 2003; Shellnutt et al., 2007; Jiang et al., 2018)。南岭地区A型花岗岩很多,我们对比了南岭地区的A型花岗岩,大多也具有非常低Sr高Yb特征的,于是我们从浙闽型中分出一类Sr含量非常低而Yb含量变化很大的一类,称其为南岭型(图1 b)^[1,39]。

南岭型相当于A型,为什么还要取一个新的术语?因为:(1)A型花岗岩有不同的指标,学术界比较青睐($K_2O + Na_2O$)和Zr对 $10\ 000\ Ga/Al$ 以及 FeO^*/MgO 和($K_2O + Na_2O$)/CaO对($Zr + Nb + Ce + Y$)的指标^[47](Whalen et al., 1987)。这两个图件基本上很好,但有时并不好用,会产生互相矛盾的结果。例如,一组样品在某些图上投在A型花岗岩,而在另外的图上却不是A型花岗岩(如^[49, 51-52]Li et al., 2017; Tian et al., 2018; Jiang et al., 2018),此外,有些并非A型花岗岩也可以投在A型花岗岩区^[53-54](如Cisse et al., 2017; 徐通等,2017)。(2)本文的南岭型不采用上述标准,而是按照Sr和Yb的含量以及负铕异常的指标: $Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Yb > 0.5 \times 10^{-6}$, $Eu/Eu^* < 0.3$ 。经过笔者多年的实践,南岭型大致即没有疑义的A型花岗岩,代表地壳减薄的产物^[39](张旗和焦守涛,2020)。

(4) 从哲学角度的解释

地壳厚度的变化是逐渐的、连续的,例如一个地区受到构造的推挤,地壳开始加厚,这是一个渐变的过程,一个量变积累的过程。量变通常不会导致事物性质根本的变化。这时,人们关注的应当是临界点,临界点即量变与质变之间的界线。一旦达到临界点即发生质变,质变即改变事物的属性。变质岩在不同温度压力条件下发生的变化主要体现在变质矿物的组成上,随着温度压力的升高,从绿片岩相—角闪岩

相—榴辉岩相,如图1 a所示。图中所有的界线都具有质变的特征,而空白区则是量变的范围。科学研究的焦点就聚焦于上述界线,事物的质变即发生在上述界线及其附近。这个从量变到质变的过程恰好有一个记录,即花岗岩中Yb和Sr的含量,它们记录了从角闪岩相到榴辉岩相的转变。由于地质过程非常复杂,Yb和Sr还记录了其他各种可能的地质作用的影响,因此,最终展现在我们面前的是一个综合了各种因素的函数。图1 b的界线则是根据大量数据的统计得出来的,从图1 b看,这些界线是互相交叉的,说明它们之间具有互相过渡的特征,属于近似的界线。

花岗岩部分熔融也是一个由量变到质变的过程,下地壳底部变质岩发生部分熔融的开始点温度即物质属性发生质变的临界点。在临界点之前,变质岩可以发生一些变化,但性质基本不变;在临界点之后,变质岩即分解为两部分:一是部分熔融形成的岩浆,二是部分熔融留下的残余物,如下式:

$$\text{变质岩1} = \text{岩浆} + \text{变质岩2}$$

上式中,等式前为部分熔融前的状况,等式后为部分熔融后的残留相,等式代表临界点或转变点或拐点即发生质变的关键点。

如果临界点之前的变质岩为榴辉岩1,部分熔融形成的岩浆是埃达克岩,留下的残余物仍然是榴辉岩相,但是,成分不同于部分熔融之前的榴辉岩1(可含少量斜长石),为榴辉岩2(可含极少量斜长石或无斜长石,榴辉岩基性程度更高),三者之间的关系可表述为:

$$\text{榴辉岩1} = \text{埃达克岩} + \text{榴辉岩2}$$

角闪岩相同样,如果部分熔融之前的变质岩为角闪岩1(含大量斜长石),部分熔融形成的岩浆是浙闽型花岗岩,残余物则是角闪岩2(斜长石含量不同程度降低,角闪岩基性程度升高),则可能存在下列等式:

$$\text{角闪岩1} = \text{浙闽型花岗岩} + \text{角闪岩2}$$

在上式中,浙闽型花岗岩大体代表了角闪岩相部分熔融的温度压力条件,等式代表质变。

科学研究的一个重要的任务就是抓住这个物质属性转变的临界点或关键点,即量变质变转换的条件。搞清楚这个临界点,查明影响临界点变化的诸要素,才能明白事物变化的规律,才能对其加以利用。而正是由于存在这个量变质变的转变点或临界点,花岗岩分类才有可能。

2.2 花岗岩分类问题

(1) 不同类型花岗岩发现过程

对于埃达克岩,国外主要专注于对岛弧背景的研究,学术界也只知道花岗岩可以有富Sr贫Yb和贫Sr富Yb的两种情况^[43,55-58](Defant and Drummond, 1990; Castillo, 2012; Toya et al., 2005; Martin et al., 2005; Martin, 1999),30年来进展不大。我们在研究中偶然发现还有一类低Sr低Yb的花岗岩^[59](李承东等,2004),按照Defant and Drummond^[43](1990)解释埃达克岩的思路,我们将其解释为残留相中既有石榴石还有斜长石,大体上相当于麻粒岩相,形成的压力应当小于埃达克岩(图1 a)。后来发现这种类型的花岗岩在喜马拉雅地区最多(如中新世的淡色花岗岩、白云母花岗岩、二云母花岗岩等),故称其为喜马拉雅型。随后我们发现还有一类花岗岩的Sr特别低,而Yb特别高且变化很大(可以从小于 0.5×10^{-6} 到大于 100×10^{-6}),且具有明显的负铕异常(Eu/Eu^* 一般小于0.3),于是我们把这类花岗岩从浙闽型中单独分出来,称其为南岭型。最后,经过很长一段时间,无意中发现在一类高Sr高Yb的花岗岩,这类花岗岩在全球分布较少,由于最早见于广西地区,故称其为广西型。于是,我们仅根据Sr和Yb两个元素,按照它们的含量高低不同(部分还需要考虑REE分布中铕异常的资料),就可以分出五类型的花岗岩(图1b):埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型和南岭型^[1-2,39,60](张旗等,2006,2008;张旗和李承东,2012;张旗和焦守涛,2020)。

(2) 花岗岩分类的简要说明

①花岗岩分类的标志: Sr和Yb含量(部分还需要辅以REE分布的铕异常情况)。各类花岗岩的指标大体是:埃达克型($Sr > 300 \times 10^{-6}$, $Yb < 2.5 \times 10^{-6}$),喜马拉雅型($Sr < 300 \times 10^{-6}$, $Yb < 2.0 \times 10^{-6}$),浙闽

型($Sr < 300 \times 10^{-6}$, $Yb > 1.5 \times 10^{-6}$),广西型($Sr > 300 \times 10^{-6}$, $Yb > 2.0 \times 10^{-6}$),南岭型($Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Yb > 1.0 \times 10^{-6}$, $Eu/Eu^* < 0.3$)。

②分类的理论基础: Kay (1978) 和 Defant and Drummond (1990)^[43-44] 提出的Sr和Yb与残留相斜长石、石榴石处于平衡的理论。

③适用范围: 元古宙至现代(不适合太古宙)。

④相图的含义:

(A)图1 a中的蓝色粗虚线代表地热增温率;不同颜色的水平矢量线代表加热部分熔融的路径,A、B、C分别代表埃达克型、喜马拉雅型和浙闽型花岗岩部分熔融的路径(压力不同);暗示加热是花岗岩形成的关键因素。

(B)图1 a不同颜色的区间代表不同的花岗岩类型:蓝色区间示埃达克岩的温度—压力范围,处于石榴石出现线之上和斜长石消失线之上;粉红色示喜马拉雅型花岗岩的温压范围,处于石榴石出现线之上和斜长石消失线之下;浅绿色的浙闽型处于石榴石出现线之下,南岭型是从浙闽型分出的,代表浙闽型中温度最高、压力最低的部分(以黄色表示),二者的界线是过渡的;灰色的广西型位于石榴石出现线之下和斜长石消失线之上,压力中等,温度最高;广西型贯穿了角闪石消失线,说明源区角闪石可有可无,残留的变质岩主要由辉石角闪岩组成,温度更高。

(C)图1 a中金红石出现线代表更高的压力,角闪石消失线也很有意义,可惜目前在花岗岩地球化学数据中还找不到相应的标志。

(3)花岗岩分类的含义

前面提到,目前全球还没有一个完善的花岗岩分类,目前采用的ISMA的分类,没有一个统一的标

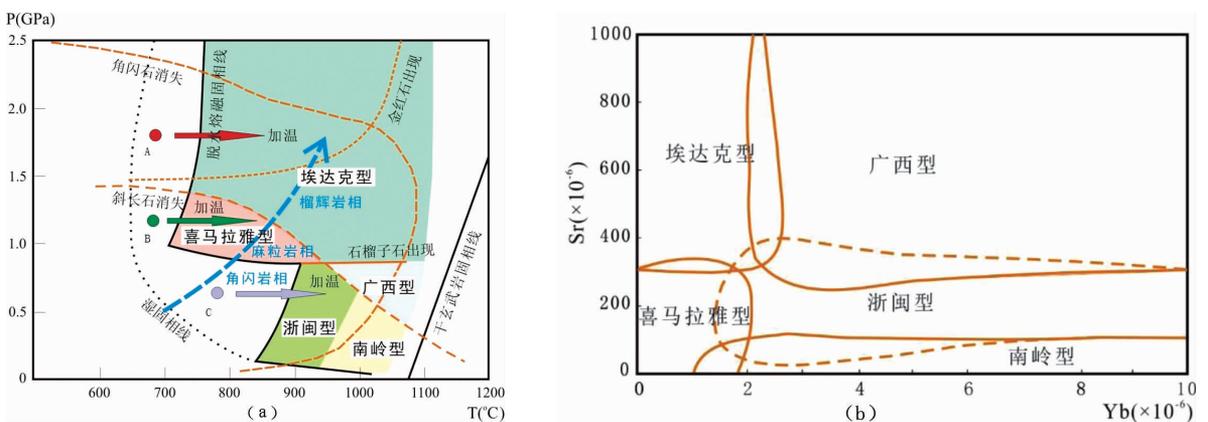


图1 花岗岩分类图 a:花岗岩相图;b:花岗岩分类图,据张旗和焦守涛[39](2020)

Fig. 1 Classification diagram of granite

志,算不上科学的合理的分类方案。之所以出现这样的状况,笔者认为,是花岗岩没有独立的理论所导致的(张旗等,2008)。花岗岩没有自己的理论,所以,花岗岩也没有一个统一的能够概括全球各种各样情况的分类系统。而采用Sr和Yb,只需要两个元素(有时需要辅以负锫异常的变化),即可构建一个新的花岗岩分类,其分类的实质是与花岗岩形成时的压力有关,其次,在某些情况下也可以反映花岗岩形成的温度状况。

从理论上,Sr和Yb两个元素的排列组合,可以形成4种组合:高Sr低Yb,高Sr高Yb,低Sr低Yb,低Sr高Yb。地球上是否存在上述四种组合的花岗岩,我们在研究之初是不知道的。随着研究的进展,资料的积累,发现地球上果然存在上述四种组合的花岗岩类(除此之外,还从低Sr高Yb类中分出非常低Sr高Yb的一类)。这样,依靠Sr和Yb两个元素即可分出5类花岗岩。

按压力的划分:南岭型是低压的,浙闽型和广西型是中压的,埃达克岩是高压的,喜马拉雅型为中压—高压过渡的。

按温度的划分:喜马拉雅型是低温的,浙闽型是中温的,广西型和南岭型是高温的,埃达克岩则没有指示温度的功能。

(4)广西型的特殊性

广西型花岗岩是很特殊的一类,花岗岩既富Sr还富Yb,令人很难理解,最早发现于广西,总体上是所有花岗岩类中分布最少的。国内除了广西外,还分布在广东、浙江、福建、河北、辽宁、四川、内蒙古、陕西、新疆和西藏等地^[50,61-73](李献华等,1999;林景仟等,1992;姜耀辉等,1999;段志明等,2005;高山林等,2006;耿全如等,2005;黄俊平等,2006;杨永胜等,2011;李永飞等,2012;焦守涛等,2013a;Wang et al., 2004; Wang et al., 2005; Shellnutt and Zhou, 2007; Yang and Li, 2008; Fu et al., 2010),国外在美国、挪威、波兰、日本、墨西哥、土耳其等也有出露^[48-49,74-80](Askren et al., 1997; Verplanck et al., 1999; Bogaerts et al., 2003; Auwera et al., 2003; Ilbeyli et al., 2004; Calzia and Ramo, 2005; Brueseke and Hart, 2009; Mora et al., 2007; Yamamoto, 2007),其中以出露在挪威南部晚元古代的灵达尔(Lyngdal)花岗岩闪长岩最典型^[48-49,79](Bogaerts et al., 2003; Auwera et al., 2003; Mora et al., 2007)。国内外学术界通常将其与A型花岗岩对比^[48-49,79](Bogaerts et al., 2003; Auwera et al., 2003; Mora et al., 2007),认

为是伸展背景下形成的。广西型与A型花岗岩对比显然不合适。因为A型花岗岩大多具有明显的负锫异常,而广西型没有。为什么会出现广西型花岗岩?我们的理解是:花岗岩富Yb,表明源区属于角闪岩相,花岗岩富Sr,表明源区残留相缺少斜长石。既是角闪岩相,又缺少斜长石,那剩下的残留相矿物就主要是角闪石和辉石了,在图1 a中位于石榴石消失线之下和斜长石消失线之上,说明这是一种高温花岗岩(张旗,2014)。广西型位于中压高温区,南岭型位于低压高温区;南岭型可能与地壳的伸展减薄有关,广西型可能没有这个含义,二者是有区别的(图1 a)。广西型的源区十分罕见,形成条件十分苛刻,故广西型花岗岩在全球花岗岩中数量是最少的。

2.3 花岗岩与金铜钨锡成矿的关系问题

Sr、Yb两个元素的排列组合不仅解决了花岗岩的分类问题,还解决了与花岗岩有关的成矿作用的一些问题。与花岗岩有关的成矿作用主要有金铜钨锡钼铋铅锌银汞锑砷等,矿床类型有矽卡岩型、斑岩型、细脉浸染型、石英脉型、蚀变岩型等。据目前的了解,金铜主要与埃达克岩有关,钨锡主要与南岭型花岗岩有关^[1,81-82](张旗等,2008,2010;焦守涛等,2013 b)。Mo的情况不是非常清楚,可能有三种情况:(1)如果Mo为主,可能与南岭型有关;(2)如果Mo与金铜伴生,则与埃达克岩有关;(3)如果Mo与钨锡伴生,则与南岭型有关。喜马拉雅型花岗岩主要与金有关(如美国内华达的卡林型金矿,川陕甘金三角的卡林型或细脉浸染型金矿等)。与浙闽型和广西型花岗岩有关的矿产很少,规模很小,矿产类型主要是钨锡铅锌银等,不大可能有金铜,原因不详。浙闽两省也有金铜成矿,如福建的紫金山斑岩铜矿,规模还很大,那是与埃达克岩有关的^[1,82-83](张旗等,2008,2010;李斌等,2016)。

埃达克岩与金铜成矿有关,国外很早就知道(如Thiéblemont et al., 1997; Sajona and Maury, 1998; Defant et al., 2002; Oyarzun et al., 2001)^[84-87]。国内也有不少学者有此共识^[88-97](王强等,2007;冷成彪等,2007;俞永飞,2019;叶洪华和文明,2013;李印等,2009;詹发余等,2007;武占祖等,2005;廖宗廷,2004;邵积东,2005;张亚峰等,2018)。埃达克岩与金铜有关的原因不是很清楚,学术界有各种说法。从许多实例可见,埃达克岩与金铜成矿作用可能具有相关性,但是,不一定是因果关系。因此,这种关系不具

有排他性,也就是说,埃达克岩与金铜有关,但是,不排斥在埃达克岩附近可以有钨锡矿产出。因为,埃达克岩除了作为来自高压背景外,它还具有一个热源的功能,热与流体有关,而成矿离不开流体。如果一个埃达克岩体在空间上与钨锡在一起,并不表明钨锡与埃达克岩具有相关性,即金铜与钨锡可能是不同成因的或不同来源或不同时代的^[1,82](张旗等,2008,2010)。同样,与南岭型花岗岩有关的是钨锡成矿作用,这个规律也不具备排他性,南岭型花岗岩周边在某些情况下也会有金铜矿产,这时,钨锡成矿可以与南岭型有关,而金铜虽然空间上与钨锡在一起,但是,可能成因、时间、来源以及成矿控制因素上存在某些差别^[82,98](张旗等,2010;张旗,2011)。

流行的岩浆热液成矿理论认为,热液流体和成矿金属源于岩浆,岩浆能够分异和演化,在岩浆分异的晚期,热液达到过饱和而出溶,热液成矿在岩浆后期或期后,岩浆与热液矿床在空间上、时间上和成因上密切相关^[82,99](张旗等,2010;张旗,2012)。而笔者认为,花岗岩与成矿有关,不是埃达克岩与金铜在成因上有关,而是二者具相关关系。这是因为熔体与流体是不同的概念,花岗岩与成矿的关系,实质上是理解熔体与流体的关系,这个问题学术界争论很大^[1,33,82,98,100-101](张旗等,2008,2010;张旗,2011;华仁民,2011;华仁民和王登红,2012;王登红,2011)。笔者提出的岩浆热场理论探讨了这个问题^[102-105](张旗等,2014 a,b;张旗等,2015,2017),当然,问题很复杂,还有许多问题需要思考。

花岗岩与成矿的问题很多,某些规律是有用的,虽然原因并不清楚;有些违反大概率规律的情况出现,也是可能的,仔细查找其中的原因,也许会有新的认识发现,对进一步找矿、开阔思路也是有益的。

2.4 花岗岩的地球动力学问题

花岗岩的地球动力学意义是什么?是构造环境问题吗?按照板块构造理论,是。包括洋中脊花岗岩、洋岛花岗岩、岛弧花岗岩和板内花岗岩。全球花岗岩绝大部分在大陆,大陆花岗岩属于板内环境,还如何进一步研究?

大陆花岗岩的地球动力学意义是什么?基本上不清楚。对于中国华北、华南中生代花岗岩,学术界最青睐的是与太平洋板块俯冲的关系,仍然是构造环境问题。笔者认为,大陆花岗岩的地球动力学意义主要是恢复花岗岩形成时的温压条件。大陆是随时间而变化的,有的时候是伸展,有的时候是挤压。伸

展导致地壳减薄,挤压导致地壳加厚(还可导致块体旋转和走滑)。加厚和减薄的事件由于很少有记录被保存下来,所以,人们对地质演化时期地壳厚度是怎么变化的基本上是茫然无知的。埃达克岩的发现,埃达克岩与残留相处于平衡理论的提出,使人们终于找到了一个恢复古代地壳变化的方法。当然,如果没有花岗岩侵入(或中酸性火山岩喷出),这个方法也就没有用了。例如,现今的中国地势是西高东低,西面是青藏高原,东部是平原。但是,种种迹象表明,中生代时期中国是东高西低的^[106-109](任纪舜等,1990;任纪舜,1999;邓晋福等,1996,2000),至于中国东部有多高,范围多大,持续多长时间,却并不清楚。埃达克岩的发现,对埃达克岩分布的研究,发现在中国东部侏罗纪晚期至早白垩世存在一个中国东部高原,此外,根据埃达克岩的分布还能够大体了解高原的范围,形成和垮塌的时间等^[45-46](张旗等,2001 a, b)。按照这个思路,我们即可考察不同时期花岗岩的分类及其变化的情况,以此来恢复各地不同时期地壳变化的情况^[39](张旗和焦守涛,2020)。

3 存在的问题

(1)Sr和Yb的地球化学性质及其与其他微量元素(如LILE、HFSE)的关系,是一个没有解决的问题。Sr、Yb与残留相平衡理论的提出,展示了Sr和Yb与其他诸多微量元素之间的差异,强调了Sr和Yb这两个元素特殊的功能。但是,Sr和Yb仍然保留了微量元素所具有的许多特征,Sr和Yb是各种地质因素的函数这个事实也是毫无疑问的。因此,如何恰当评估Sr和Yb的作用,仍然是一个需要研究的问题。

(2)Sr和Yb的变化与地壳温度、压力的关系,与地壳厚度变化的关系,不可能是一个简单的函数关系。相图的石榴石和斜长石消失线也不是固定不变的,是随花岗岩岩浆外部环境和内部成分的变化而变化的,不同类型花岗岩之间也是互相重叠的,这些都需要进一步研究。此外,压力多大是高压?高压的地壳厚度是多少?早先提出的地壳厚度大于40 km或50 km,是大体估计的,均无确切的依据。由于地质情况的千变万化,实际上不同压力之间的界线也应当是因时因地而不同的。

(3)花岗岩与成矿是什么关系,是学术界激烈争论的一个问题。笔者认为,熔体与流体是两个完全不同的概念,二者不可能共存于一个体系,花岗岩也不可能深部包容大量的流体并在浅部低温低压条件

下释放出来的机制。但是,成矿与花岗岩又密切相关,于是,花岗岩(熔体)与成矿(流体)的关系即不可能是因果关系,而只能是相关关系。既然是相关关系,就存在一些不确定性,这一点,在找矿中是应当特别引起重视的。

(4)花岗岩非常复杂,受影响的因素非常多,花岗岩的矿物学、岩石学与地球化学如何联系和衔接起来,仍然是一个棘手的问题。地球化学未必能够解决花岗岩的岩石学、矿物学的许多问题,更何况花岗岩的地球动力学问题。花岗岩的争论很多,本文只是从宏观角度给出了一个思路,一个概念,很多细节并不清楚。例如角闪岩相的某些变质岩也可以含石榴石,虽然并非高压环境,对Yb含量的影响有多大?此外,文中对低Sr低Yb(喜马拉雅型)和高Sr高Yb(广西型)花岗岩的解释是否合理?仍然需要实践的大量的检验以及理论上的深入思考。

4 结论

(1)花岗岩非常复杂,如何化繁为简,归纳出花岗岩最本质、最核心、最关键的标志?非常棘手,国内外也无先例可循。本文从哲学的角度,认为Sr和Yb是两个具有特殊含义的元素,它们不仅具有一般微量元素性质,关键是它们的行为与花岗岩部分熔融后残留的变质岩的压力有关。可能正是由于这个因素,才使Sr和Yb具有其他微量元素不可替代的强大功能。

(2)花岗岩研究已有几百年的历史,可是花岗岩却没有形成自己独立的理论体系,也没有系统的花岗岩分类。花岗岩沿袭了玄武岩的理论,而玄武岩的理论是不适合花岗岩的,遂导致花岗岩在实际应用与解释中的支离破碎,漏洞百出。本文按照Sr-Yb的排列组合,对花岗岩进行了分类,这个分类是系统的、有坚实理论基础的。分类大体解决了花岗岩形成的温度压力问题。

(3)大陆花岗岩的动力学意义是什么,学术界一直不清楚,目前似乎仍然是以板块构造的理论为依据,探讨与板块俯冲的关系为重点。板块构造只能影响大陆边缘,影响不到大陆内部。大陆的演化过程中最需要了解的是什么?是大陆在地质历史上的变化,如大陆地质演化不同时期的伸展和挤压、抬升和垮塌、造山与盆地、加厚与减薄,走滑与旋转。如何识别地质历史上曾经发生过的上述变化,由于地质记录没有保存或很少保存,目前在方法和思路上是非常

有限的。而花岗岩的分类,Sr、Yb与残留相平衡的理论提出了一个可行的方案,能够解决或大体解决上述问题。例如,埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩代表地壳加厚,南岭型代表地壳减薄,浙闽型和广西型代表正常厚度的地壳。此外,喜马拉雅型代表低温,广西型和南岭型代表高温。因此,按照Sr和Yb的变化,即可大致恢复地质历史时期大陆地壳温压条件的变化,推测大陆地貌的变化(平原、丘陵、高原、山脉),探讨构造应力的变化(挤压导致加厚,伸展导致减薄)等。

(4)花岗岩与成矿有关,是相关关系而非因果关系。因此,花岗岩与成矿就存在某种不确定性。不同类型的花岗岩与成矿的关系不同,大体是:埃达克岩与金铜有关,南岭型与钨锡有关,喜马拉雅型与金有关,而浙闽型、广西型基本上是不利于成矿的。但是,实践中也有金铜钨锡在空间上共生的实例,则金铜与钨锡可能成因上不同或成矿时代不同或控矿因素不同。当然,问题还很复杂,本文只是从宏观角度给出了一个思路,一个概念,很多细节需要认真研究。

(5)科学与哲学是密切相关的,哲学是科学的高度概括。本文尝试从哲学的角度对纷繁复杂的花岗岩进行归纳和简化,理出花岗岩最核心、最关键的要素,只是一个初步的尝试。哲学与花岗岩的关系是需要认真研究的,相信这样的研究对推进地质的发展,对花岗岩理论的创立是有益的。

后记:在对花岗岩哲学问题的思考中,笔者非常赞赏印度哲学家克里希那穆提(1895—1986)提出的“让思想自由流淌”的哲学思想。科学研究是有其自身规律的,有一个由浅入深、由此及彼的过程。“让思想自由流淌”是做学问的基石,它可能把你带到一个你不曾想过的、新的、更高的境界。例如笔者开始也只是停留在Defant and Drummond (1990)提出的埃达克岩限于板块俯冲带的思想,笔者没有先见之明,能够对Sr和Yb两个元素产生排列组合的想法、重新厘定花岗岩分类的想法。笔者只是随着许多现象的揭露,不回避自己不认识的东西,不拒绝思想的自由流淌,才有了一个又一个令人称奇的发现。如C型埃达克岩问题、赞岐岩问题、喜马拉雅型、浙闽型、南岭型和广西型问题、岩浆热场问题以及大数据问题等等。看来,“让思想自由流淌”是科学研究的自然的规律,不需要你刻意的去追求它,但是,你也不能有畏惧心理而无视和回避它。“让思想自由流淌”也不是一件容易的事情,它不仅需要遵循科学的规律和创新的思维,还需要有一点无私无畏的精神。试想,如

果你“让思想自由流淌”到一个新的领域,得到一个认识,这个认识可能具有突破性的意义,而这个认识恰恰与学术界的主流认识相悖,与导师和权威们的意见相左,你还敢坚持吗?看来,在中国做学问是要一点勇气的。

本文对花岗岩的思考也受到李小龙哲学思想的启发。大家知道李小龙(1940—1973)是一位著名的武术家,但很少有人知道他还是一位有创见的哲学家。可惜他英年早逝,只活了33岁。他吸收了老子、周易、禅宗、尼采、克里希那穆提等的哲学思想,创立了他自己独特的哲学体系。更难能可贵的是,李小龙将他的哲学思想融入他的武术实践,突破了中国武术界传统的束缚,创立了融各派武术精华于一身的“截拳道”,将中华武术提升到一个新的境界。武术流派多如牛毛,套路五花八门,李小龙将纷繁复杂的武术套路归纳为“攻”和“防”两种,既是高度的概括,也直击武术的核心。笔者因此而联想:武术既然可以如此高度的概括为攻防两个字,那花岗岩如何概括呢?有没有最简单的能够概括全部花岗岩的标志呢?本文虽然提出了一点认识,但是是否恰当并不清楚。花岗岩研究的“点睛之笔”何在?还需要学术界更多的努力。

致谢:感谢罗照华教授在相图研究中给予的指导,感谢张成立和王孝磊教授的评论与建议。

参 考 文 献

- [1] 张旗,王焰,熊小林,等. 埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇. 北京:中国大地出版社,2008:1-344
- [2] 张旗,李承东. 花岗岩:地球动力学意义. 北京:海洋出版社,2012:1-278
- [3] Le Martre R W, Bateman P and Dudek A. 1989. A Classification of Igneous Rocka and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell.
- [4] 王恒富. 生活中的哲学. 北京:海潮出版社,2010
- [5] Bowen N J. 1928. The Evolution of the Igueous Rocks [M]. Princeton N J, Princeton University Press
- [6] Carmichael I S E, Turner F J and Verhoogen J V. 1974. Igneous Petrology. Department of Geology and Geophysics [J]. Berkeley: University of California
- [7] Wilson M. Igneous Petrogenesis. London:Unwin Hyman. 1989: 1-465
- [8] Best M G and Christiansen E H. Igneous petrology [M]. Blackwell Science Ltd,2001:1-458
- [9] 都城秋穗,久城育夫. 岩石学. 北京:科学出版社(常子文等译),1984:1-344
- [10] Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. Characteristics and tectonic significance of super-suction zone ophilites. Geological Society London Special Publications, 1984, 16(1): 77-94
- [11] 张旗,周国庆. 中国蛇绿岩. 北京:科学出版社,2001
- [12] Wager LR and Brown GM. 1968. Layered Igneous Rocks. Edinburgh and London: Oliver and Boyd
- [13] Coffin M F and Eldholm O. Large igneous provinces:Crustal structure,dimensions,and external consequences [J]. Reviews of Geophysics,1994,32(1):1-36
- [14] Cox K G, Bell J D and Pankhurst R J. The Interpretation of Igneous Rocks. London: George Allen & Unwin. 1997:1-445
- [15] Pearce J A and Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19(2): 290-300.
- [16] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy & Petrology. 1979, 69(1): 33-47
- [17] Capedri S, Venturelli G, Bocchi G, Dostal J, Garuti G and Rossi A. The geochemistry and petrogenesis of an ophiolitic sequence from Pindos, Greece [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1980, 74(2): 189-200
- [18] Glassley W. Geochemistry and Tectonics of the Crescent Volcanic Rocks, Olympic Peninsula, Washington. Geological Society of America Bulletin. 1974, 85(85): 785-794
- [19] Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. Earth and Planetary Science Letters. 1983, 62(1): 53-62
- [20] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. Earth & Planetary Science Letters. 1980, 50(1): 11-30
- [21] Arndt N T. Formation and evolution of the continental crust. Geochem[J]. Perspect., 2013, 2(3): 405-533
- [22] Campbell I H and Taylor S R. No water, no granites: no oceans, no continents[J]. Geophysical Research Letters, 1983, 10: 1061-1064
- [23] 续海今,马昌前. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定——兼论中国东部富钾高Sr/Y比值花岗岩类. 地学前缘, 2003, 10(4): 417-427
- [24] 邵同宾, 嵇少丞, 王茜. 部分熔融岩石流变学. 地质论评, 2011, 57(6): 851-869
- [25] Baker D R. Granite melt viscosity and dike formation[J]. Journal of Structural Geology, 1998, 20: 1395-1404
- [26] 张旗. 广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义. 矿物岩石学杂志, 2014a, 33(1): 199-210
- [27] 张旗. 大陆花岗岩的地球动力学意义. 岩石矿物学杂志, 2014b, 33(4): 785-798
- [28] 张超, 马昌前, Holt F. 含水大陆下地壳的部分熔融: 大别山C型埃达克岩成因探讨. 高校地质学报, 2012, 18(1): 41-51
- [29] Wannamaker P. Comment on the petrologic case for a dry lower crust by Bruce WD Yardley and John W. Valley. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B3): 6057-6064
- [30] Clemens J and Vielzeuf D. Constraints on melting and magmaproduction in the crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 86: 287-306

- [31] 杨晓松,金振民,Huenges E,等. 高喜马拉雅黑云片麻岩脱水熔融实验:对青藏高原地壳深熔的启示. 科学通报,2001,46(3):246-250
- [32] 张旗. 有关埃达克岩实验应用中几个问题的探讨. 岩石矿物学杂志,2015,34(2):1-14
- [33] 华仁民,王登红. 关于花岗岩与成矿作用若干基本概念的再认识. 矿床地质,2002,31(1):165-175
- [34] 沈照理,许绍焯. 关于地下水地质作用. 地球科学,1985,10(1):99-106
- [35] 刘勇胜,高山. 地壳深熔(anatexis)与花岗岩对下地壳的示踪作用. 地质科技情报,1998,17(3):31-38
- [36] Harris N, Ayres M, Massey J. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite: implications for the extraction of Himalayan leucogranite magmas. *J. Geophys. Res.*, 1995,100(B8):15766-15777
- [37] Rutter M J and Wyllie P J. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust. *Nature*, 1998,331:159-160
- [38] Thompson A B, James A, Connolly D. Melting of the continental crust: some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings. *J. Geophys. Res.*, 1995,100(B8):15565-15579
- [39] 张旗,焦守涛. 埃达克岩来自高压背景——一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现. 岩石学报,2020,36(6):1675-1683
- [40] 张旗,葛黎,焦守涛,等. 在大数据背景下看TAS分类的不足及可能的解决方案. 地质通报,2019,38(12):1943-1954.
- [41] Sun S S and McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins*, edited by Saunders A D and Norry M J. Geological Society of London Special Publications, London, 1989,42(1):313-345
- [42] 张鲲,胡俊良,徐德明. 湖南桃林铅锌矿区花岗岩地球化学特征及其与成矿的关系. 华南地质与矿产,2012,28(4):307-314
- [43] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 1990,347:662-665
- [44] Kay R W. Aleutian magnesian andesite: melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978,4:117-132
- [45] 张旗,钱青,王二七,等. 燕山中晚期的“中国东部高原”:埃达克岩的启示. 地质科学,2001,36(2):248-255
- [46] 张旗,王焰,钱青,等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义. 岩石学报,2001,17(2):236-244
- [47] Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987,95(4):407-419
- [48] Auwera J V, Bogaerts M, Liégeois J P, et al. Derivation of the 1.0-10.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas [J]. *Precambrian Research*, 2003,124:107-148
- [49] Bogaerts M, Scaillet B, Liégeois J P, et al. Petrology and geochemistry of the Lyngdal granodiorite (Southern Norway) and the role of fractional crystallisation in the genesis of Proterozoic ferro-potassic A-type granites [J]. *Precambrian Research*, 2003,124:149-184
- [50] Shellnutt J G and Zhou M F. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume. *Chemical Geology*, 2007,243:286-316
- [51] Li Y L, Zhang H F, Guo J H, et al. Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton: A highly fractionated albite granite forced by K-feldspar fractionation. *Chemical Geology*, 2017,450:165-182
- [52] 姜耀辉,郭坤一,贺菊瑞,等. 青藏高原大同西侧石英二长岩体地球化学及岩石系列. 地球化学, 1999,28(6):542-550
- [53] Cisse M, Lü XA, Algeo TJ, et al. Geochronology and geochemical characteristics of the Dongping ore-bearing granite, North China: Sources and implications for its tectonic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017,89:1091-1106
- [54] 徐通,陈清敏,郭岐明,等. 秦祁结合部位宝鸡地区早泥盆世香泉A型正长花岗岩年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质通报,2017,36(7):1118-1128
- [55] Castillo P R. Adakite petrogenesis [J]. *Lithos*, 2012,134-135:304-316
- [56] Toya N, Ban M and Shinjo R. Petrology of Aoso volcano, northeast Japan arc: temporal variation of the magma feeding system and nature of low-K amphibole andesite in the Aoso-Osore volcanic zone. *Contrib Mineral Petrol*, 2005,148:566-581
- [57] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 2005,79:1-24
- [58] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 1999,46:411-429
- [59] 李承东,张旗,苗来成,等. 冀北中生代高Sr低Y和低Sr低Y型花岗岩:地球化学、成因及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 2004,20(1):269-284
- [60] 张旗,王焰,李承东,等. 花岗岩的Sr-Yb分类及其地质意义. 岩石学报,2006,22(9):2249-2269
- [61] 李献华,周汉文,刘颖,等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报,1999,44(18):1992-1998 (in Chinese)
- [62] 林景任,谭东娟,迟效国,等. 胶辽半岛中生代花岗岩. 北京:科学出版社,1992:1-208
- [63] 段志明,李勇,张毅,等. 青藏高原唐古拉山中新生代花岗岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其大陆动力学意义. 地质学报, 2005,79(1):88-97
- [64] 高山林,何治亮,周祖翼. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义. 新疆地质,2006,24(2):125-130
- [65] 耿全如,潘桂棠,金振民,等. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因. 地球科学,2005,30(6):747-760
- [66] 黄俊平,曹圣华,陈振华,等. 西藏冈底斯中段侏罗—早白垩世花岗岩特征. 资源调查与环境,2006,27(4):277-285
- [67] 焦守涛,颜丹平,张旗,等. 八达岭花岗岩的年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报,2013,29(3):769-780

- [68] 李永飞,李之彤,杨芳林,等.义县组主期中酸性岩墙与熔岩地球化学特征及其地质意义.地质与资源,2012,21(1):42-50
- [69] 杨永胜,孙柏年,康鸿杰,等.内蒙古苏尼特左旗北达布锡勒图岩体主微量元素地球化学特征及成因探讨.中国地质,2011,38(2):301-316
- [70] Fu X G, Wang J, Tan F W, et al. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implications. Gondwana Research, 2010, 17: 135-144
- [71] Yang W and Li S G. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. Lithos, 2008, 102: 88-117
- [72] Wang T, Zheng Y D, Li T B, et al. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 715-729
- [73] Wang Q, Li J W, Jian P, et al. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian - Triassic transtension. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 230: 339-354
- [74] Askren D R, Roden M F, Whitney J A. Petrogenesis of Tertiary Andesite Lava Flows Interlayered with Large -Volume Felsic Ash-Flow Tuffs of the Western USA [J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 1021-1046
- [75] Verplanck P L, Farmer G L, McCurry M, et al. The chemical and isotopic differentiation of an epizonal magma body: Organ Needle pluton, New Mexico. Journal of Petrology, 1999, 40: 653-678
- [76] Ilbeyli N, Pearce J A, Thirlwall M F, et al. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey. Lithos, 2004, 72: 163-182
- [77] Calzia J P, Ramo O T. Miocene rapakivi granites in the southern Death Valley region, California, USA [J]. Earth -Science Reviews, 2005, 73: 221-243
- [78] Brueseke M E, Hart W K. Intermediate composition magma production in an intracontinental setting: Unusual andesites and dacites of the mid-Miocene Santa Rosa-Calico volcanic field, Northern Nevada [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2009, 188: 197-213
- [79] Mora J C, Jaimes-Viera M C, Garduño-Monroy V H, et al. Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan Volcanic Arc (Central Area), Chiapas Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 162: 43-72
- [80] Yamamoto T. A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 167: 119-133
- [81] 焦守涛,张旗,祝新友.金铜与钨锡矿床与花岗岩的关系.矿物学报,2013,33(S2):156
- [82] 张旗,金惟浚,王焰,等.花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系.矿床地质,2010,29(5):729-759
- [83] 李斌,鲁安怀,赖健清,等.福建上杭县浸铜湖矿床成矿岩体的地球化学特征及其地质意义.中国有色金属学报,2016,26(11):2369-2382
- [84] Thiéblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite. Earth and Planetary Sciences 1997, 325: 103-109
- [85] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. CR ACAD SCI II A, 1998, 326(1): 27-34
- [86] Defant M J. Reply for comment by R. Conner on the "Evidence suggests slab melting in arc magmas" by M. Defant and P. Kepezhinskias (EOS, 2001, 82: 65, 68-69). EOS, 2002, 66: 256-257
- [87] Oyarzun R, Márquez A, Lillo J, et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc -alkaline magmatism. Mineralium Deposita, 2001, 36: 794-798
- [88] 王强,许继峰,赵振华,等.中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用[J].矿物岩石地球化学通报,2007(04):336-349
- [89] 冷成彪,张兴春,陈衍景,等.中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨.地学前缘,2007,14(5):199-210
- [90] 俞永飞.长江中下游地区中生代成矿期花岗质岩石成因[J].西安文理学院学报(自然科学版),2019,22(03):93-96.
- [91] 叶洪华,文明.东南亚地区埃达克岩和斑岩型铜矿、热液型金矿研究[J].南方金属,2013(05):31-34
- [92] 李印,凌明星,丁兴,等.中国东部埃达克岩及成矿作用[J].大地构造与成矿学,2009,33(03):448-464
- [93] 詹发余,古凤宝,李东生,等.青海东昆仑埃达克岩的构造环境及成矿意义[J].地质学报,2007(10):1352-1368
- [94] 武占祖,陈勇,梁旭辉.埃达克岩的研究现状及其趋势[J].地质找矿论丛,2005(03):204-208
- [95] 廖宗廷.埃达克岩研究及斑岩铜矿找矿新方向[J].铜业工程,2004(02):1-6
- [96] 邵积东.重视埃达克岩的研究,开拓铜、金、银、钨矿的找矿新思路[J].西部资源,2005(01):47-51
- [97] 张亚峰,姚征,易鹏飞,等.高Sr低Y埃达克质岩石与金矿成矿关系——以陕西省凤县八卦庙金矿为例.矿产勘察,2018,9(9):1654-1663
- [98] 张旗.再论花岗岩的分类及其与金铜钨锡成矿的关系——答华仁民先生和王登红博士对“张旗等(2010)花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系”一文的质疑.矿床地质,2011,30(3):557-570
- [99] 张旗.评流行的岩浆热液成矿理论.甘肃地质,2012,21(4):1-14
- [100] 华仁民.关于花岗岩成因分类与花岗岩成矿作用若干基本问题的思考——与张旗先生等商榷.矿床地质,2001,30(1):163-170
- [101] 王登红.关于矿床学研究方法的一点看法——就“埃达克岩”与成矿的关系问题与张旗先生商榷.矿床地质,2001,30(1):171-175
- [102] 张旗,金惟浚,李承东,等.“岩浆热场”说及其成矿意义(上)[J].甘肃地质,2014,23(01):1-18
- [103] 张旗,金惟浚,李承东,等.“岩浆热场”说及其成矿意义(下)[J].甘肃地质,2014,23(02):1-20
- [104] 张旗,金惟浚,李承东,等.岩浆热场与热液多金属成矿作用[J].地质科学,2015,50(01):1-29

- [105] 张旗, 焦守涛, 李承东, 等. 花岗岩与大陆构造、岩浆热场与成矿. 岩石学报, 2017, 33(5): 1524–1540
- [106] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1990
- [107] 任纪舜. 中国及邻区大地构造图. 北京: 地质出版社, 1999
- [108] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996: 1–110
- [109] 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评, 2000, 46(1): 41

SIGNIFICANCE OF Sr AND Yb TO GRANITE THEORY: PHILOSOPHICAL THINKING ON GRANITE RESEARCH

ZHANG Qi^{1,2}, JIAO Shou-tao^{3,4}, LIU Hui-yun^{1,2}

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

4. Technology Innovation Center of Geological Information, MNR, Beijing, 100037, China)

Abstract: The study of granite has a history of hundreds of years, but granite has not formed its own independent theoretical system, and there is no systematic granite classification. Granite is very complex. How to simplify the complex and summarize the most essential, core, and critical signs of granite is a very difficult task. From a philosophical point of view, this paper found that Sr and Yb may be two elements with special meanings. The special feature is that they not only have the characteristics of general trace elements, but also have special functions. The key is that their behavior is related to the residual granite after partial melting. The composition of metamorphic minerals (such as garnet, plagioclase, etc.). It may be precisely because of this factor that Sr and Yb have functions unmatched by other trace elements. This paper proposes a systematic classification of granites according to the permutation and combination of Sr and Yb. The geodynamic significance of granite has been controversial in academic circles. This paper believes that plate tectonics can only affect the continental margins and not the interior of the continent. The most important task of continental evolution research is to restore changes in the history of continental geology, such as extension and compression (some rotations are byproducts of compression), uplift and collapse, orogeny and basin, thickening and thinning, etc. How to identify the above-mentioned changes and their processes is still very difficult in methodology. Relying on Sr, Yb and the theory of equilibrium with the residual phase, a solution is proposed that can solve or roughly solve the above problems. For example, adakite (high Sr, low Yb) represents thickened crust, Nanling type (very low Sr, high Yb) represents thinned crust, Zhemin type (low Sr, high Yb) and Guangxi type (high Sr, high Yb) representing the normal thickness of the crust, the Himalayan granite (low Sr and low Yb) represents the transition between medium pressure and high pressure. Therefore, according to the changes of Sr and Yb, the changes in continental crustal temperature and pressure conditions during the geological history can be roughly restored, the changes in continental landforms (plains, hills, plateaus, and mountains) can be inferred, and the changes in tectonic stress (extrusion leads to thickening, extension leads to thinning) can be discussed. In addition, different types of granites are also related to mineralization. Generally speaking, adakite is related to gold and copper, Nanling type is related to tungsten and tin, Himalayan type is related to gold, and Zhemin and Guangxi types are basically not conducive to mineralization. However, in practice, there are also instances of the co-existence of gold, copper, tungsten and tin in space, and they may be different in genesis or mineralization age or ore-controlling factors. The problem is still very complicated, and there are many phenomena that are difficult to explain. The author just gave an idea and a concept from a macro perspective, but many details are not clear. Research shows that science and philosophy are closely related, and philosophy is a high-level generalization of science. This paper attempts to summarize and simplify the complex granite from a philosophical point of view. It is only a preliminary attempt. There are more issues that need to be studied carefully.

Key words: Sr; Yb; granite; philosophy; classification; pressure; temperature; geochemistry; geodynamic significance