

# 碱性岩及碱性与亚碱性岩系列的界线 ——基于全球火山岩数据的探讨

焦守涛<sup>1,2</sup>, 张 旗<sup>3</sup>, 葛 粲<sup>4</sup>, 朱月琴<sup>1</sup>, 袁玲玲<sup>1</sup>, 邵葆蓉<sup>5</sup>, 凌 晓<sup>5</sup>, 袁 峰<sup>4</sup>, 周永章<sup>2</sup>  
JIAO Shoutao<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi<sup>3</sup>, GE Can<sup>4</sup>, ZHU Yueqin<sup>1</sup>, YUAN Lingling<sup>1</sup>, SHAO Baorong<sup>5</sup>,  
LING Xiao<sup>5</sup>, YUAN Feng<sup>4</sup>, ZHOU Yongzhang<sup>2</sup>

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中山大学地球科学与工程学院/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. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;

5. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Survey/Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;*

3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

4. *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

5. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

**摘要:**国际地球科学联合会规定,碱性岩必须要有实际碱性矿物和/或似长石出现作为标志,但同时又同意 TAS 图中 B 区的玄武岩可以细分为碱性玄武岩和亚碱性玄武岩,取决于它们是否有标准矿物霞石出现。有标准矿物霞石出现的玄武岩归入碱性玄武岩,夏威夷岩有霞石标准矿物出现,是碱性玄武岩。碱性玄武岩和夏威夷岩分别出现在 TAS 图上的两个区(碱性玄武岩在 B 区,夏威夷岩在 S1 区),这是否存在概念上的混乱? 早先学术界关于碱性和碱性岩的定义并不完美,由许多学者厘定的碱性-亚碱性的界线区分的不是拉斑与碱性系列,而是正常系列与粗玄武岩系列。采用全球火山岩数据考察 TAS 图及碱性-亚碱性界线,发现碱性岩与碱性岩在术语的解释上存在瑕疵并提出解决的方案。

**关键词:** TAS; 碱性岩; 碱性; 亚碱性; 大数据; 玄武岩

**中图分类号:** P588.14; P628      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-2552(2019)12-1955-08

**Jiao S T, Zhang Q, Ge C, Zhu Y Q, Yuan L L, Shao B R, Ling X, Yuan F, Zhou Y Z. Alkaline rock and the distinction between alkaline and sub-alkaline: A discussion on data of global volcanic rocks. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(12): 1955-1962**

**Abstract:** What is the true meaning of commonly used alkaline and sub-alkaline curves? It is reasonable for the International Union of Geological Sciences to make the requirement that alkaline rocks must have actual alkaline minerals and/or feldspar appearance as

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2019-07-13

资助项目: 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》(编号: 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》(编号: 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》(编号: 81300001)、中国地质调查局项目《国家地质大数据汇聚与管理(中国地质调查局发展研究中心)》(编号: DD20190381A)、《资源环境重大问题综合区划与开发保护策略研究》(编号: DD20190463)和《地质矿产智能化调查系统开发与应用》(编号: DD20190416)

作者简介: 焦守涛(1988-), 男, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: jiaoshoutao88@163.com

通讯作者: 张旗(1937-), 男, 博士, 研究员, 从事地质大数据研究。E-mail: zq1937@126.com

markers. However, the International Union of Geological Sciences also agrees that the basalt in area B of the TAS diagram could be subdivided into alkaline basalt and sub-alkaline basalt, depending on whether they have standard mineral nepheline. The basalt of the standard mineral nepheline is classified as alkaline basalt, while the Hawaiian rock is the alkaline basalt, due to the existence of standard minerals of nepheline. Why do they appear in the two districts on the TAS diagram (alkaline basalt in area B, Hawaiian Rock in the S1 area), and is this a conceptual confusion? It seems that the previous academic definition of alkaline and alkaline rock is somewhat confusing, the alkaline-sub-alkaline boundary determined by many experts is not the tholeiite and alkaline series, but is between normal series and dolerite series. In this paper, the global volcanic rock data are used to investigate TAS diagram and alkaline-sub-alkaline boundary, and it is found that alkaline and alkaline rocks are defective in the interpretation of terms and thus this paper proposes solutions. This matter involves the basic theory of petrology, to which the academia should pay more attention.

**Key words:** TAS; alkaline rock; alkaline; sub-alkaline; big data; basalt

碱性岩的概念最早由 Iddings<sup>[1]</sup>于 1892 年提出,《火成岩岩石学》认为碱性岩是火成岩的一个大类,通常含似长石和/或钠质辉石(碱性辉石)和/或钠质角闪石(碱性角闪石)。以前,地质学家们发现,以亚速尔群岛为代表的大西洋周边其洋岛上产出的岩石与以安第斯山脉为代表的环太平洋产出的岩石性质有很大的差别。前者产出橄榄玄武岩、霞石岩、碧玄岩、响岩等岩石组合,称大西洋岩套;后者产出玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等岩石组合,称太平洋岩套。大西洋岩套的主要造岩矿物为似长石、钠质辉石、钠质角闪石等,而太平洋岩套的主要造岩矿物为长石、普通辉石、普通角闪石等。科学家们经过进一步的研究发现,这 2 类岩石的硅含量与碱含量有显著的差别:前者硅含量低,碱含量相对高,表现在所成岩石中几乎没有石英出现;后者硅含量高,碱含量相对低。研究表明,形成大西洋岩套的岩浆为碱性玄武型岩浆,形成太平洋岩套的岩浆为拉斑玄武型岩浆。1971 年, Irvine 等<sup>[2]</sup>根据上述的简单区别及许多地区的研究,总结提出将岩浆岩划分为碱性系列与亚碱性系列。在此之前, MacDonald 等<sup>[3-8]</sup>厘定了一个碱性-亚碱性或碱性-拉斑系列之间的界线,是 TAS 图上的一条曲线(图 1)。

这条曲线的真正含义是什么?它区分的是碱性与亚碱性岩石吗?在 TAS 图上,这个曲线与岩石命名是矛盾的,也不代表真正的碱性岩。因为,国际地科联命名的碱性岩是有实际碱性矿物和/或似长石出现的岩石,在 TAS 图上位于“U”字母的区域(图 1)。这里存在许多概念上混淆的地方,本文基于全球火山岩数据对这一问题进行研究。

## 1 碱性与亚碱性系列的界线

拉斑玄武岩和碱性橄榄玄武岩最早由 Kennedy<sup>[9]</sup>

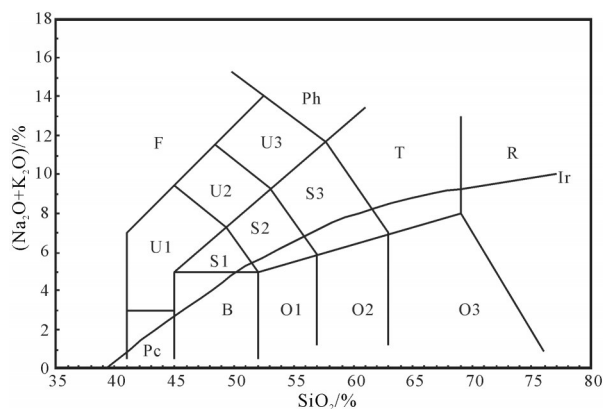


图 1 TAS 火山岩分类命名图

Fig. 1 Classification and nomenclature of TAS diagram of volcanic rocks

Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—似长石岩; U1—碱玄武岩、碧玄武岩; U2—响岩质碱玄武岩; U3—碱玄武质响岩; Ph—响岩; Ir—碱性亚碱性界线

定义,即拉斑系列是一套硅饱和的岩石,镁质橄榄石能够与贫钙的辉石发生反应;而碱性橄榄玄武岩是硅不饱和的岩石,镁质的橄榄石与钙质的辉石大致同时结晶且彼此保持平衡。根据矿物学关系,碱性橄榄玄武岩是碱性的,因为,在  $\text{SiO}_2$  含量相同的情况下,碱性橄榄玄武岩比拉斑玄武岩的碱含量更高<sup>[7]</sup>。

玄武岩较复杂,早在 20 世纪 60 年代, Yoder 等<sup>[10]</sup>根据玄武岩的标准矿物组成将玄武质岩石分为 5 类:①拉斑玄武岩(硅过饱和),有标准矿物紫苏辉石和石英;②拉斑玄武岩(硅饱和,即紫苏辉石玄武岩),有标准矿物紫苏辉石;③橄榄拉斑玄武岩(硅不饱和),有标准矿物紫苏辉石和橄榄石;④橄榄玄武岩,有标准矿物橄榄石;⑤碱性玄武岩,有标准矿物橄榄石和霞石。按照上述分类,出现标准矿物霞

石的是碱性玄武岩。

### 1.1 对夏威夷玄武岩的研究

图 1 的曲线是学术界达成一致的碱性与亚碱性(拉斑系列)的界线,这条界线的厘定是从对夏威夷的研究开始的。以 MacDonald 为代表的一批学者,对夏威夷玄武岩作了多年的研究<sup>[3,6-8]</sup>,积累了几百个岩石地球化学分析数据。按照 MacDonald 等<sup>[7]</sup>的研究,夏威夷的玄武岩分为 2 类(图 2):拉斑岩套和碱性岩套。

(1)拉斑岩套:含拉斑质矿物组分,样品点位于图 2 的斜线下部,包括:①拉斑玄武岩,橄榄石含量小于 5%;②橄榄拉斑玄武岩,橄榄石大于 5%;③大洋岩(oceanite,大洋类型的苦橄质玄武岩),含丰富的橄榄石斑晶和小于 30%的长石。

(2)碱性岩套:含碱性矿物组分,落在图 2 斜线的上部,包括:①碱性玄武岩,橄榄石含量小于 5%;②碱性橄榄玄武岩,橄榄石含量大于 5%,含标准矿物霞石小于 5%;③碧玄岩,含标准矿物霞石大于 5%,有实际霞石和少量长石;④碧玄岩类,含标准霞石大于 5%而无实际霞石矿物;⑤富辉橄玄岩(ankaramite,相当于苦橄质玄武岩),含大量的橄榄石和辉石斑晶,长石含量小于 30%;⑥夏威夷岩,色度中等至较高,与玄武岩类似,但是标准和实际的长石是中长石,Na/K 值通常大于 2;⑦橄榄粗安岩(mugearite),类似夏威夷岩,长石是奥长石。

图 2 是二氧化硅-全碱图,包括所有的夏威夷地区的岩石。需要说明的是,夏威夷产出的少量霓石岩,包括在碱性岩套中,但安卡拉米岩(富辉橄玄岩)用不同的符号表示<sup>[20]</sup>。正如 Kuno 等<sup>[9]</sup>所指出的,2 个岩套可以非常清楚地区分。

MacDonald<sup>[19]</sup>的研究进一步指出,夏威夷地区实际上存在 3 个火山岩岩套:拉斑玄武岩、碱性岩和霞石岩,它们的化学成分不同。夏威夷火山的主体是拉斑玄武岩,其次是体积较小(通常小于 1%)的碱性熔岩;这 2 种类型的熔岩在一个薄的过渡带中互层。霞石岩熔岩与其他熔岩相隔很长的时间间隔,与下伏火山岩为侵蚀不整合接触。他们还进一步论述:大洋岩(oceanites)也属于碱性岩套(alkalic suite),虽然在夏威夷没有发现,大洋岩在其他许多地方出现,如萨摩亚。霞石岩套包括霞石岩、黄长霞石岩、碧玄岩、碱性橄榄玄武岩,以及少量的橄霞玄武岩、苦橄玄武岩、钛铁粒玄武岩等。按照上述描

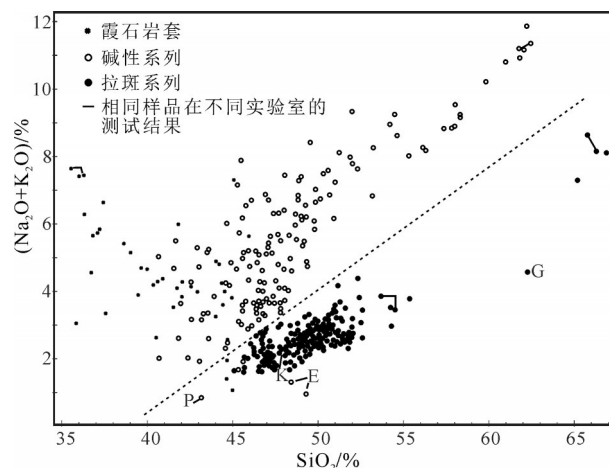


图 2 夏威夷岩硅碱图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Silica-alkaline diagram of Hawaiian rock

述,夏威夷岩是碱性岩,与霞石岩不同。而现今的概念和国际地科联的决议认为,夏威夷岩属于粗玄武岩系列,霞石岩才是碱性岩<sup>[21-22]</sup>。

### 1.2 对环太平洋东部岛弧地区的研究

日本著名学者 Kuno 研究了环太平洋地区的许多近代和现代的火山岩,如堪察加、日本、朝鲜、中国东北、阿留申、美国西北部、新西兰、印度尼西亚、伊豆-马里亚纳、千岛、南桑得威奇、汤加等<sup>[3-5]</sup>,认为碱性橄榄玄武岩即为碱性岩,可以与夏威夷岩、橄榄粗安岩、粗安岩、粗面岩和碱性流纹岩成为一个岩石组合<sup>[6]</sup>。Kuno 非常重视对碱性橄榄玄武岩的研究,把它作为碱性岩的标志性岩石使用,当时的概念,alkalic olivine basalts 指的是硅不饱和的含霞石标准矿物的岩石。

### 1.3 其他学者的见解

Yoder 等<sup>[10]</sup>建议碱性玄武岩的总碱含量通常超过 3%。在某些硅质拉斑玄武岩中,碱含量超过 3%,而一些不含硅的碱性玄武岩中总碱含量可低于 3%。

IUGS 火山岩分类委员会在确定 TAS 作为火山岩的分类图解时,还明确一条:玄武岩(B区)可进一步细分为碱性和亚碱性玄武岩,取决于它们是否具有标准矿物霞石,这一区别在 1985 年伦敦会议上再次得到确认。

## 2 什么是碱性岩

### 2.1 碱性岩的概念

Iddings<sup>[11]</sup>最早为了划分 2 类广泛发育的岩浆岩

系列(玄武岩、粗面岩、响岩系列和玄武岩、安山岩、流纹岩系列),在《火山岩的起源》一书中提出了碱性岩和亚碱性岩的术语。长期以来由于划分标准的不同,对于碱性岩的定义也存在较大的分歧。主要有2种观点:一些学者认为碱性岩是一种与构造条件有关的岩石类型<sup>[23-24]</sup>,并将Iddings二分法中提到的碱性岩系列和亚碱性岩系列分别对应于大西洋型系列和太平洋型系列。后来以地理名称命名的方法逐渐被废弃,开始用碱性、亚碱性或钙碱性、钙性这些术语代替。Shand<sup>[25]</sup>认为,碱性岩是一个岩相学概念,其最重要的特征是具有过碱性和硅不饱和的特点, $11(K_2O+Na_2O)>Al_2O_3$ (分子数)和 $6+(K_2O+Na_2O)>SiO_2$ ,矿物学上表现为出现碱性暗色矿物、似长石等浅色矿物。国际地科联(IUGS)火成岩分类学分会1989年提出的深成岩矿物定量分类命名方案中,考虑了Shand<sup>[25]</sup>的定义(即碱性岩以含似长石或碱性暗色矿物为特征)。

另外一种观点也承认碱性岩是一个岩相学的概念,是根据岩浆岩的化学成分或根据化学成分计算出来的各种指数和标准矿物再结合各种图表,将岩浆岩按碱度类型划分成碱性岩和非碱性岩。这种观点认为,碱性岩是根据其化学成分判别其碱性程度属于碱性的岩浆岩,认为碱性岩可以有不同的酸度,甚至矿物相中也可以出现石英。关于此观点的代表学者主要有Peacock<sup>[26]</sup>、Rittmann<sup>[27]</sup>及中国学者邱家骧<sup>[28]</sup>、曾广策等<sup>[29]</sup>等。

## 2.2 过碱性岩

什么是过碱性岩(peralkaline rocks)?据邓晋福等<sup>[30]</sup>的介绍,国际地科联的火山岩TAS分类对于R区(流纹岩区)、T区(粗面岩区)和Ph区(响岩区)的进一步划分是依据过碱性指数(peralkaline index),即 $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$ 值大于或小于1确定。对于R区(流纹岩区)和Ph区(响岩区)过碱性指数大于1者,称为过碱性流纹岩和过碱性响岩<sup>[22]</sup>。另外,在确认过碱性流纹岩和过碱性粗面岩之后,还要按照 $Al_2O_3$ 大于或小于 $1.33(TFeO)+4.4%$ 对过碱性岩石进一步划分,大于该值的过碱性岩石称为钠闪碱流质粗面岩(comenditic trachyte)和钠闪碱流质流纹岩(comenditic rhyolite)(=钠闪碱流岩,comendite),而小于该值的则称碱流质粗面岩(pantelleritic trachyte)和碱流质流纹岩(pantelleritic rhyolite)(=碱流岩,pantellerite)。由此可知,过碱性岩石的划分十分

繁琐。

Avanzinelli等<sup>[31]</sup>指出,过碱性的长英质火山岩一般与碱性玄武岩伴生,缺乏中性岩。虽然在某些情况下也可观察到从碱性玄武岩-夏威夷岩-橄榄粗安岩和钠闪石岩-过碱性流纹岩的演化过程<sup>[32]</sup>。

从描述可知,过碱性岩实际上是碱性岩<sup>[31,33-40]</sup>。如数据库中的“rhyolite, peralkaline”条目,在TAS图中即与comendite(钠闪碱流岩)和pantellerite(碱流岩)的数据在一起(图3)。国际分类<sup>[21-22]</sup>也特别强调,碱性花岗岩一词的使用只限于那些含有碱性角闪石和/或碱性辉石的岩石,只把过碱性花岗岩称为碱性花岗岩。

## 2.3 IUGS的矛盾

IUGS岩石命名分委会的碱性岩和似长岩小组讨论了碱性岩的概念,一致认为只能将矿物成分中存在似长石和/或者碱性辉石及碱性角闪石的岩石称做碱性岩。Daly<sup>[42]</sup>、Shand<sup>[25]</sup>、吴利仁<sup>[43]</sup>等认为,碱性岩是一个岩相学类型,其基本特征是硅酸不饱和、碱质含量高、矿物成分出现似长石、碱性暗色矿物,不含石英。

按照Middlemost<sup>[44]</sup>的说明,火成岩分委会用霞石标准矿物分子的存在与否将玄武岩细分为碱性玄武岩或亚碱性玄武岩,并规定10%的橄榄石标准矿物分子为碧玄岩和碱玄岩的界线。

由上述学者的观点可知,碱性岩的标志非常明确,即为含碱性矿物的岩石。过碱性的提法也可以理解,有霞石标准的是碱性岩,那么,有实际霞石矿物的就是过碱性岩,这是真正的碱性岩。

IUGS岩石命名委员会经过多次讨论,明确了碱性岩的定义,即矿物成分中有似长石和/或碱性辉石及碱性角闪石的岩石才可以称为碱性岩。但是,该委员会同时又同意有霞石标准矿物的玄武岩为碱性玄武岩。那么,碱性玄武岩是否碱性岩呢?从图1看,碱性玄武岩显然不同于碱性岩,玄武质的碱性岩是碧玄岩。于是,碱性玄武岩就不是碱性岩了。

此外,图1的Ir界线及图2的碱性亚碱性界线,区分的也不是正常系列与碱性岩系列,而是正常系列与粗玄岩系列。Kuno<sup>[5]</sup>、MacDonald<sup>[20,33,45]</sup>等所说的碱性不是碱性岩的概念,而是粗玄岩的概念。

对于碱性玄武岩,IUGS火成岩分委会明确是以出现霞石标准矿物为标志<sup>[44]</sup>。而对于碱性花岗岩,该委员会又规定仅限于那些含有碱性角闪石

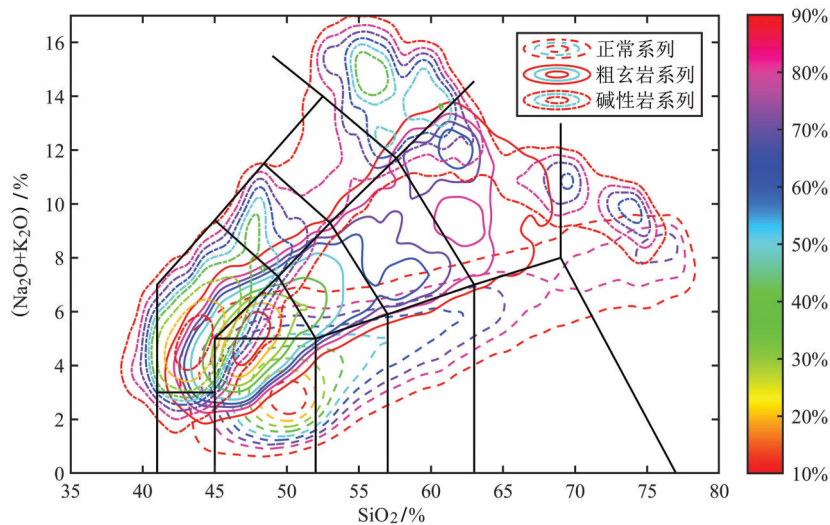
图3 三个系列火山岩的TAS分类图<sup>[41]</sup>

Fig. 3 TAS classification maps of three series of volcanic rocks

和/或碱性辉石的岩石<sup>[21-22]</sup>。二者自相矛盾? 按照 IUGS 的规定,碱性玄武岩属于粗玄岩系列,碱性花岗岩属于碱性岩系列。看来,碱性、碱性玄武岩、碱性花岗岩、碱性岩,碱性与亚碱性等,这里的“碱性”的概念是不一样的,联系到过碱性的术语,过碱性玄武岩相当于碧玄岩,为碱性岩;过碱性花岗岩等同于碱性花岗岩,也属于碱性岩,既然过碱性花岗岩与碱性花岗岩是一个意思,为什么需要 2 个术语? 由此看来,碱性在概念上是混乱的。

### 3 讨论

#### 3.1 粗玄岩系列与碱性岩系列概念上的模糊

碱性岩类在自然界分布很少,据查瓦里茨基<sup>[46]</sup>的统计,碱性岩类占岩浆岩的 1% 左右,而本文统计的全球碱性岩数据量为全部火山岩的 8% (据 GEOROC 和 PetDB 数据库)。碱性岩常沿大陆内部的深大断裂或裂谷带分布,如东非大裂谷、贝加尔裂谷、中国的攀西等地均发育有多种类型的碱性岩。碱性岩的规模一般很小,但是由于这类岩石主要起源于地幔,通过研究这些岩石可以获取深部地幔的重要信息,加之碱性岩在矿物上的特殊性及其与磷酸盐矿产、铌-钽矿床和放射性元素矿产有密切联系,因此研究碱性岩有重要的理论和现实意义<sup>[29,47-49]</sup>,故对碱性岩的研究较详细,因此,文献中发表的碱性岩数据量与碱性岩的实际分布不匹配。

按照许多学者的观点及 IUGS 的定义,碱性岩是一套含碱性矿物的岩石<sup>[1,21,25-29]</sup>。而在讨论碱性与亚碱性系列的区分时,采用的却是有霞石标准矿物的岩石<sup>[5,19,45]</sup>。有实际矿物霞石和标准矿物霞石是 2 个不同的概念,有标准矿物霞石,说明岩石是硅不饱和的,而有实际矿物霞石则是真正的碱性岩。

例如,夏威夷地区存在拉斑岩套、碱性岩套和霞石岩套 3 套岩石组合<sup>[19]</sup>。在这里,碱性岩套相当于 TAS 图的粗玄岩系列,霞石岩套属于 TAS 图的碱性岩系列。因此,夏威夷的碱性岩套的说法不合适。MacDonald 认为,夏威夷的碱性岩套与霞石岩套都属于碱性岩套,只是霞石岩的碱性更高而已。例如 MacDonald 等<sup>[20]</sup>指出,夏威夷的霞石岩套与碱性岩套均属于碱性岩套,这与现今的 TAS 图的概念不同。按照 TAS 图的规定,夏威夷出现的是正常系列、粗玄岩系列和碱性岩系列这 3 套岩石系列。而 Kuno<sup>[5]</sup>和 MacDonald<sup>[19,45]</sup>等厘定的碱性与亚碱性的界线,实际上指的是粗玄岩系列与亚碱性(正常)系列之间的界线。

在前人的研究中,霞石岩套既包括霞石岩、黄长石霞石岩、碧玄岩,还有属于粗玄岩岩套的碱性橄榄玄武岩、富辉橄玄武岩、苦橄质玄武岩、钛铁粗玄岩等<sup>[6-7,45,50]</sup>。在这里<sup>[6-7,45,50]</sup>,粗玄岩系列与碱性岩系列被当成一个系列(岩套)。

### 3.2 粗玄岩系列与碱性岩系列如何区分

为了解决上述问题,本文收集全球火山岩的数据,将数据分为正常系列、粗玄岩系列和碱性岩系列,分类计算各类岩石的密度分布函数,并按照密度从高到低计算累积密度函数<sup>[51]</sup>。由于各类岩石的累积密度的取值范围均是从0%到100%,不同类型不同数量的岩石样本集合在空间上的分布情况可以较平等地对比。上述研究结果如图3、图4所示(图4是图3的归纳和简化)。

(1)TAS图上的Ir曲线和O系列与S系列的界线应当具有同样的含义,Ir曲线的含义是区分碱性亚碱性系列;O系列和S系列则分别代表正常系列与粗玄岩系列。碱性的特征是有标准矿物霞石分子,而粗玄岩系列的标志也是有标准矿物霞石出现。因此,二者是一个含义。虽然含义相同,却各有各的界线。Ir曲线是根据太平洋许多地方及夏威夷的资料总结出来的,而O与S系列的界线是构建TAS图时根据全球2万多个数据汇总并以直线表示的<sup>[21,41]</sup>。因此,二者含义相同,但是依据不同,放在一起,互相矛盾。

本文根据全球火山岩的数据厘定的正常系列与粗玄岩系列的界线(图4,红色虚线),即相当于Ir界线,也相当于O与S系列之间的界线。①本文的界线在O1与S2之间,O2与S3之间,O3与T之间的界线基本与早先的TAS图吻合,说明TAS图当时厘定的界线可信。②TAS图在 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 时没有对正常系列与粗玄岩系列予以区分,而Ir曲线却是延伸到酸性岩范围的;而本文的研究表明,正常系列与粗玄岩系列是可以延伸到酸性岩范围的,但界线不同于Ir曲线,而是O3与T之间连线的继续延伸。③

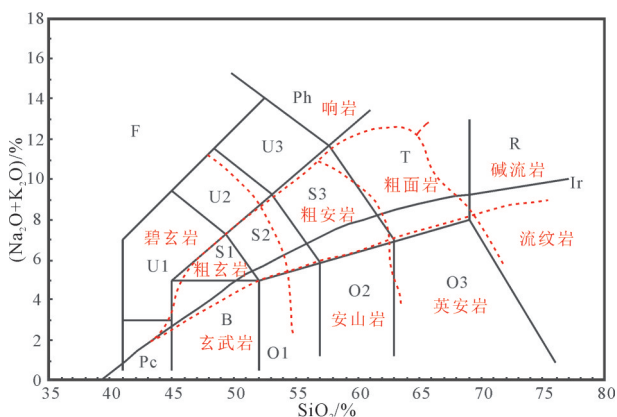


图4 新的TAS图<sup>[41]</sup>

Fig. 4 Preliminary version of the new TAS diagram

基性岩部分是Ir曲线构建的重要依据。而TAS图规定的玄武岩范围,区分玄武岩与夏威夷岩,大体以 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5\%$ 作为界线。这样的规定与早期研究结果<sup>[5,19,45]</sup>不符。当时IUGS为什么要别出心裁不得而知。但是,可能正是由于这样的划分并不合适,所以,IUGS又提出玄武岩可以重新划分为碱性亚碱性2类,以解决这个矛盾。可是,如上所述,碱性玄武岩与夏威夷岩是一个标准:有标准矿物霞石。IUGS的附加规定是一种弥补,也说明在最初确定TAS图分类时可能考虑不周。本文的正常系列与粗玄岩系列的界线在基性岩部分与Ir界线大体一致,说明Kuno<sup>[5]</sup>、MacDonald<sup>[19,45]</sup>等早先的研究在基性岩部分经得起考验。

(2)碱性、碱性岩在概念上模糊,应加以修正。本文强调,碱性岩必须是出现实际矿物似长石或碱性辉石和碱性角闪石的岩石,这是IUGS的规定,是正确的。Ir曲线区分开的是正常系列与粗玄岩系列。碱性岩系列与Ir曲线没有任何关系。粗玄岩系列与正常系列比较是偏碱性的,但是,不能称之为“碱性”。“碱性”等同于“碱性岩”,应当是有明确含义的,仅指有似长石和碱性暗色矿物出现的情况。有标准矿物霞石出现的岩石,是比没有标准矿物霞石出现的岩石偏碱性了,但是,不能冠之以“碱性”。按照正确的表述,Ir曲线区分的不是碱性亚碱性,而是偏碱性亚碱性。偏碱性不是碱性,亚碱性虽然有“碱性”2个字,实际上一点碱性的意思都没有,是拉斑系列、正常系列的意思。

(3)大数据研究厘定的TAS图,最大的变化是在碱性岩系列部分<sup>[41]</sup>。早先的TAS图,碱性岩在酸性岩部分是缺失的,T区是粗面岩,代表粗玄岩系列的酸性部分。而Ph代表响岩,响岩位于T区之上,与R区无关。本文则从T和R区中割裂出一大块归入碱性岩系列,命名为碱流岩<sup>[41]</sup>,使碱性岩系列在酸性岩部分与正常系列直接接触,这是之前预料不到的。笔者猜测,这种情况或许与3个系列划分的标准不同有关。3个系列的划分标准大体是正常系列无霞石标准矿物、粗玄岩系列有霞石标准矿物,可碱性岩系列出现霞石实际矿物。其实际含义是:正常系列是硅饱和或硅过饱和的(硅过饱和出现石英);有霞石标准矿物出现说明岩石硅不饱和;而有霞石实际矿物出现则是硅强烈不饱和的。故3个系列表述的是硅饱和程度的差别,而TAS图表达的则

是随着硅含量的变化岩石总碱量变化的情况。岩石总碱量与岩石硅饱和程度肯定有关,但它们是否一一对应则不清楚。按理,正常系列与碱性岩系列是被粗玄岩系列隔开的,但是,全球数据表明不是这种情况,说明岩石硅饱和程度与总碱量不可能是——对应的关系,笔者追求的和选择的标志并不一样,这从理论上说是不合理的,因此,出现矛盾的情况是可以理解的。

#### 4 结 论

(1)大数据研究表明,早先的研究及 IUGS 关于碱性岩的定义,碱性和亚碱性的划分方案,在碱性岩、碱性方面的考虑是有缺陷的,碱性岩与碱性在概念上是模糊的。碱性较复杂,粗玄岩系列相对于正常系列是碱性的,碱性岩系列相对于粗玄岩系列是碱性的。学术界在使用“碱性”的术语时,有时指的是粗玄岩系列,有时指的是碱性岩系列,造成概念上的混乱。

(2)本文建议规范“碱性”术语的使用,“碱性”、“碱性系列”、“碱性岩”应当是同义词。因此,图 1 的 Ir 曲线区分的应当是拉斑与粗玄岩系列,而不是亚碱性与碱性系列。亚碱性的术语似乎也不妥,“亚”者“次”也,亚碱性指的是正常系列、拉斑系列,而不是碱含量少的碱性系列。

(3)本文采用全球火山岩数据考察 TAS 图及碱性—亚碱性界线,发现碱性与碱性岩在术语的解释上存在瑕疵。这件事情关系重大,牵涉到岩石学的基础理论问题,应当引起学术界的重视。本文的一些见解不一定恰当,欢迎大家批评。

**致谢:**审稿专家的建议和修改意见,使本文更加完善,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- [1]Iddings J P. Origin of igneous rocks[J]. Bull. Phil. Soc., Washington, 1892, 12: 89–213.
- [2]Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Can. J. Earth Sci., 1971, 8: 523–548.
- [3]Kuno H, Yamasaki K, Iida C, et al. Differentiation of Hawaiian magmas: Japanese Jour[J]. Geology and Geography, 1957, 28: 179–218.
- [4]Kuno H. High-alumina basalt[J]. Journal Petrology, 1960, 1: 121–145.
- [5]Kuno H. Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs[J]. Bulletin of Volcanology, 1966, 29: 195–222.
- [6]MacDonald G A. Petrography of the island of Hawaii[M]. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1949, 214D: 51–96.
- [7]MacDonald G A, Katsura T. Chemical compositions of Hawaiian lavas[J]. Journal Petrology, 1964, 5: 83–133.
- [8]Macdonald G A, Powers H A. Contribution to the petrography of Haleakala volcano, Hawaii[J]. Geol. Soc. America Bull., 1946, 57: 115–124.
- [9]Kennedy W Q. Trends of differentiation in basaltic magmas[J]. Amer. J. Sci. Ser., 1933, 5, 25: 239–256.
- [10]Yoder H S Jr, Tilley C E. Origin of basalt magmas: An experimental study of natural and synthetic rock systems[J]. J. Petrol., 1962, 3: 342–532.
- [11]Cross W. Lavas of Hawaii and their relations[M]. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 1915: 88, 97.
- [12]Hamilton E I. Distribution of some trace elements and the isotopic composition of strontium in Hawaiian lavas[J]. Nature, 1965, 206: 4981, 251–253.
- [13]Moore J G. Petrology of deep-sea basalt near Hawaii[J]. Am. Jour. Sci., 1965, 263: 40–52.
- [14]Muir I D, Tilley C E. Contributions to the petrology of Hawaiian basalts, I. The picrite-basalts of Kilauea[J]. Am. Jour. Sci., 1957, 255: 241–253.
- [15]Powers H A. Differentiation of Hawaiian lavas[J]. Am. Jour. Sci., 5th ser., 1935, 30: 57–71.
- [16]Powers H A. Composition and origin of basaltic magma of the Hawaiian Islands[J]. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1955, 7: 77–107.
- [17]Schilling J, Winchester J W. Rare earths in Hawaiian basalts[J]. Science, 1966, 153: 867–869.
- [18]Wagner L R, Mitchell R L. Trace elements in a suite of Hawaiian lavas[J]. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1953, 3: 217–223.
- [19]MacDonald G A. Composition and Origin of Hawaiian Lavas[C]// Coats R R, Hay R L, Anderson C A. Studies in volcanology: a memoir in honour of Howel Williams. Geol. Soc. Am. Mem., 1968, 116: 477–522.
- [20]Macdonald G A, Katsura T. Variations in the lava of the 1959 eruption in Kilauea Iki[J]. Pacific Sci., 1961, 15: 358–369.
- [21]Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A. A Classification of Igneous Rock and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [22]Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, et al. Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks[M]. Cambridge University Press, 2002:1–236.
- [23]Harker A. The natural history of igneous rocks: I. Their geographical and chronological distribution[J]. Science Progress, 1896, 6(1): 12–33.
- [24]Harker A. The natural history of igneous rocks[M]. Methuen. London, 1909: 1–344.
- [25]Shand S J. The problem of the alkaline rocks[J]. Proceedings of the

- Geological Society of South Africa, 1922, 25: 19–33.
- [26] Peacock M A. Classification of igneous rock series[J]. *Journal of Geology*, 1931, 39: 54–67.
- [27] Rittmann A, Vincent E A. *Volcanoes and Their Activity*[M]. John Wiley and Sons, 1962.
- [28] 邱家骧. 秦巴碱性岩[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [29] 曾广策, 邱家骧. 碱性岩的概念及其分类命名综述[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(1): 31–37.
- [30] 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. *地质论评*, 2015, 61(4): 717–734.
- [31] Avanzinelli R, Bindi L, Menchetti S, et al. Crystallisation and genesis of peralkaline magmas from Pantelleria Volcano, Italy: an integrated petrological and crystal–chemical study[J]. *Lithos*, 2004, 73: 41–69.
- [32] Nelson S A, Hegre J A. Volcán Las Navajas, a Pliocene–Pleistocene trachyte/peralkaline rhyolite volcano in the northwestern Mexican volcanic belt[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1990, 52: 186–204.
- [33] MacDonald R. Evolution of peralkaline silicic complexes: Lessons from the extrusive rocks[J]. *Lithos*, 2012, 152: 11–22.
- [34] Villari L. The island of Pantelleria[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1974, 38: 680–724.
- [35] Cornette Y, Crisci G M, Gillot P Y, et al. The recent volcanic history of Pantelleria: a new interpretation[C]//Sheridan M F, Barberi F. *Explosive Volcanism*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1983, 17: 361–373.
- [36] Mahood G A, Hildreth W. Geology of the peralkaline volcano at Pantelleria, Strait of Sicily[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1986, 48: 143–172.
- [37] Civetta L, Cornette Y, Crisci G, et al. Geology, geochronology and chemical evolution of the island of Pantelleria[J]. *Geological Magazine*, 1984, 121: 541–562.
- [38] Civetta L, Antonio M, Orsi G, et al. The geochemistry of volcanic rocks from Pantelleria Island, Sicily Channel: petrogenesis and characteristics of the mantle source region[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 1453–1491.
- [39] Mahood G A, Stimac J A. Trace–element partitioning in pantellerites and trachytes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2257–2276.
- [40] Lowenstern J B, Mahood G A. New data on magmatic H<sub>2</sub>O contents of pantellerites, with implications for petrogenesis and eruptive dynamics at Pantelleria[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1991, 54: 78–83.
- [41] 张旗, 葛粲, 焦守涛, 等. 在大数据背景下看 TAS 火山岩分类的不足及可能的解决方案[J]. *地质通报*, 2019, 38(12): 1943–1954.
- [42] Daly R A. Origin of the alkaline rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1910, 21(1): 87–118.
- [43] 吴利仁. 若干地区碱性岩研究[M]. 北京: 科学出版社, 1966: 71–123.
- [44] Middlemost E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth–Science Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- [45] MacDonald G A. Dissimilarity of continental and oceanic rock types[J]. *Journal of Petrology*, 1960, 1: 172–177.
- [46] 查瓦里茨基 A H. 火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 1958.
- [47] 赵振华. 富碱侵入岩——窥探地幔成分的窗口[C]//欧阳自远. *中国矿物岩石地球化学研究进展*. 兰州: 兰州大学出版社, 1994: 113–114.
- [48] 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–346.
- [49] 黄龙文, 许继峰, 陈建林, 等. 滇东南个旧白云山碱性岩年代学和地球化学及成因意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(5): 716–732.
- [50] Tilley C E, Yoder H S Jr, Schairer J F. Melting relations of volcanic tholeiite and alkali rock series: *Geophys. Lab. Ann. Rept*[M]. *Carnegie Inst. Year Book*, 1965, 64: 69–82.
- [51] 葛粲, 张旗, 李修钰, 等. 低维到高维密度分布函数及其可视化在大数据分析中的应用——以苦橄质玄武岩等为例[J]. *地质通报*, 2019, 38(12): 2043–2052.