

在大数据背景下看 TAS 分类的不足 及可能的解决方案

张 旗^{1,2}, 葛 燊^{3,4,5}, 焦守涛⁶, 袁 峰^{3,4,5}, 张明明^{3,4,5}, 刘惠云^{1,2}

ZHANG Qi^{1,2}, GE Can^{3,4,5}, JIAO Shoutao⁶, YUAN Feng^{3,4,5}, ZHANG Mingming^{3,4,5}, LIU Huiyun^{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. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;
4. 合肥工业大学矿集区立体探测实验室, 安徽 合肥 230009;
5. 合肥工业大学安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009;
6. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

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. *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*
4. *Laboratory of Three-Dimensional Exploration for Mineral District, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*
5. *Anhui Provincial Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*
6. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*

摘要: 火山岩 TAS 分类是国际地质科学联合会在 1989 年第 28 届国际地质大会上通过的, 迄今已经 40 年了。该分类对推进岩石学和地球化学的研究起了积极的作用, 规范了岩石(尤其火山岩)的命名, 方便了学术界的交流。但是, 不能不承认, 早先的研究, 由于分析方法、分析技术以及数据量的限制, 是存在某些局限性的。现在, 全球已积累了海量的数据, 应当有条件对火山岩的分类做一个新的探讨了。文中讨论了 TAS 分类的初衷、分类的原则及存在的问题, 推出了新的 TAS 分类方案。早先的分类一共划分了 15 个岩区, 新的方案压缩为 10 个, 其中 9 个保留了早先的命名, 新增一个碱流岩区。新的 TAS 图最大的变化在碱性岩系列, 在新的 TAS 图中, 碱性岩系列呈“人”字形分布, 把粗玄岩系列封闭起来, 弥补了早先的 TAS 分类在酸性岩部分的不足, 还发现 TAS 图理论上可能存在的一些问题。本文的探讨是初步的, 只是抛砖引玉, 希望能够引起学术界的关注, 开启利用大数据方法对 TAS 分类的新的研究。

关键词: TAS 图; 火山岩; 分类; 岩石自然组合; 自然分布; 大数据; 全体数据

中图分类号: P588.14; P628 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)12-1943-12

Zhang Q, Ge C, Jiao S T, Yuan F, Zhang M M, Liu H Y. The deficiencies and possible solutions of TAS classification in the context of big data. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(12): 1943-1954

Abstract: The TAS diagram, which is widely used in academia, is a classification scheme for volcanic rocks approved by IUGS in

收稿日期: 2019-04-23; 修订日期: 2019-07-16

资助项目: 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)、国家青年科学基金项目《地震和重力数据联合约束下的苏鲁皖地区壳幔结构反演研究》(批准号: 41504042)、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)和《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)

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

1989. This classification has been active in advancing the research on petrology and geochemistry, regulating the naming of rocks (especially volcanic rocks) and facilitating the exchange of academia. However, it cannot be denied that earlier studies had some limitations due to analytical methods, analytical techniques and data volume limitations. Now that the world has accumulated a huge amount of data, researchers should have the conditions for making new discussion on the classification of volcanic rocks. In this study, the authors have developed a new TAS classification scheme for volcanic rocks using a probability density function. The original TAS diagram defines 15 root names, among which 9 are preserved in this paper. With the addition of one new root name, the authors define a total of 10 root names. The biggest change in the new TAS diagram is in the alkaline rock series. In the new TAS diagram, the trachybasalt series is closed up, thus making up for the earlier TAS classification in the acidic rock part of the deficiency. The authors have also found that the TAS diagram may have some problems. The classification scheme presented in this study is subject to further discussions and tests.

Key words: TAS diagram; volcanic rocks; classification; rock natural compositions; rock natural distributions; big data; all data

火山岩 TAS 分类是 IUGS (国际地质科学联合会) 在 1989 年第 28 届国际地质大会上通过的, 迄今已 40 年。该分类对推进岩石学和地球化学研究起到了积极的作用, 规范了岩石 (尤其火山岩) 的命名, 方便了学术界的交流。

岩浆岩分类是岩石学研究最基本的问题, 是其出发点, 也是岩石学的基础。20 世纪 70—90 年代, IUGS 火成岩分类学分会推荐了侵入岩的 QAPF 分类方案^[1-14]。火山岩由于矿物颗粒细小, 很难识别, 许多是玻璃质的, 显微镜下很难确定其成分, 需要借助岩石化学分析加以判断。于是相应地推出了火山岩的 TAS 分类方案, 随后在火山岩分类的基础上又提出了侵入岩的 TAS 分类。上述分类已经得到各国科学家的信赖, 成为学术界一致的认识^[13, 15-19], 很少有人对这个方案提出异议。笔者认为, 该方案确有明显的优点, 但仔细考究, 也有不足之处。

例如 TAS 图解的不同岩区是以直线和斜线分割的 (图 1), 这样的分割是否合理? 直线和斜线虽然简单易行, 但是, 它是否能真实地反映岩石的自然组合和自然分布? 又如, 该方案规定 $\text{SiO}_2=45\%$ 是超基性岩与基性岩之间的界线, 也是苦橄质玄武岩与玄武岩之间的界线。可是, 苦橄质玄武岩并非超基性岩, 严格说属于基性岩类, 不是超基性岩, 这显然自相矛盾。再者, 碱性岩部分划分的岩区很多, 而实际上全球火山岩主要是亚碱性的, 碱性岩很少, 碱性岩的划分是否能够简化一些? 还有, IUGS 通过的 TAS 分类中玄武岩在 B 区, 这是一个矩形区域 (图 1), 又规定 B 区可以细分为碱性玄武岩 (有霞石标准矿物出现) 和亚碱性玄武岩 (无霞石标准矿物出现) 2 个亚类。B 区原本就属于正常系列, 现在又要从正常系列中划出碱性岩, 是否自相矛盾? 再有, TAS 分类是以根名 (root name) 作为岩区名称

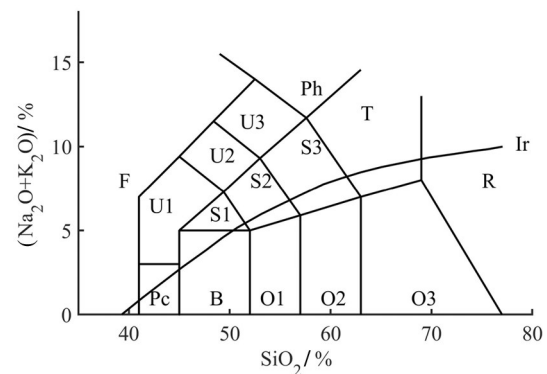


图 1 TAS 火山岩分类命名图^[20]

Fig. 1 TAS volcanic rock classification and nomenclature diagram

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

的, 在该分类中, basalt、andesite、dacite、rhyolite 属于根名很好理解, 于是, picro-basalt、basalt-andesite 应当属于亚类或亚根名。但是, 该分类却把 picro-basalt、basalt-andesite 也当作根名, 是否概念上混淆了? 按照这个原则, andesite-basalt、dacite-rhyolite、rhyolite-dacite 是否也可以作为根名? 诸如此类的问题还有很多。

地球上岩浆岩的出现应当是有一定条件的, 而且可能有一定规律。例如, 由地幔部分熔融形成的基性岩具有一定的特征, 形成一个以玄武岩为主的岩石组合^[2, 21-22]。地壳如果有来自地幔热的供给, 使下地壳发生部分熔融, 形成的是中酸性的岩浆组合。这样的组合可以很多, 研究岩石的自然组合和分布, 是岩石分类必然遇到的问题。笔者认为, 是

否属于一个组合,不是依据理论和模式,而是按照数据集中和分布的情况决定的,与成因无关,但是,很可能反映了成因的某些影响。TAS 图解简洁实用,是它明显的优点,但是,随着科学的发展和数据的积累,也显示出一些不足。早先的研究,由于分析方法、分析技术、数据量及研究思路的限制,可能并不是非常完美^[23]。目前,全球已经积累了海量的数据,有条件对 TAS 分类做新的研究。本次工作秉承这一宗旨对该问题进行了初步探索。

1 火成岩分类的始末

岩石的分类问题早在岩石学成为地质科学中一门独立的学科时就引起了重视。早期地质学岩石命名很混乱,Trigor^[24]为此专门收集了当时经过鉴定和有特定名词的火成岩计 777 种,其中深成岩 275 个,浅成岩(包括细晶岩、伟晶岩、煌斑岩及微粒脉岩等) 254 个,喷出岩 248 个,再加上同义语、复合语、群体名和某些不通用和未采用的名词,共有 1022 个名词。Le Maitre 等^[7]在提交给 IUGS 的报告中,从 786 篇文献中检索出 1534 个岩石名词,足见岩石名词之复杂和混乱及统一岩石名词的必要性。因此,国际学术界对这个问题有很大兴趣并非偶然。早在一百多年前,欧美许多岩石学家就对火成岩的定量矿物分类提出了许多方案和建议^[3,5,11,15,25-29]。在众多科学家的推动下,在 1897 年,于圣彼得堡举行的第 7 届国际地质大会上将岩石的分类和命名列入大会议程,并于会后成立了岩石命名国际委员会。在 1899 年第 8 届国际地质会议(1900,巴黎)的前夕,该委员会举行预备会议讨论了岩石的分类草案,认为在岩石分类中占首要地位的是矿物成分,岩石命名首先应考虑岩石组成中主要矿物的相对数量,其次才是化学的分类。1968 年在布拉格召开的第 23 届国际地质大会上,瑞土地质学家 Streckeisen 提出了一份岩石分类的建议。1972 年 4 月,分委会在伯尔尼举行了有 13 个国家代表参加的第一次会议,讨论了侵入岩总的分类原则。此后,分委会还分别在格勒诺布尔(1975 年)、悉尼(1976 年)、布拉格(1977 年)、帕多瓦(1979 年)、巴黎(1980 年)、剑桥(1981 年)和格拉纳达(1983 年)举行了会议,反复讨论、修改该方案^[7,20]。

2 TAS 火山岩分类的原则

国际地科联火成岩分类委员会在完成了深成

岩的 QAPF 分类后,开始了火山岩分类的研究,并在多次国际会议上进行了广泛的讨论。分委会考虑到火山岩不同于侵入岩的情况,并提出以下建议^[7,20,30]:①如果实际矿物成分可以用来分类,那么根据其在 QAPF 图中的位置对火山岩进行分类和命名,其他参数则可用来对火山岩作进一步的细分。②如果实际矿物成分不能用来分类,那么可以用化学参数作为分类的依据,但划分岩石类别应与 QAPF 矿物的分类相对应。于是分委会在 1981 年的剑桥会议上提出利用全碱-二氧化硅(TAS)图解作为火山岩分类的建议(图 1)。

同时,分委会也赞同下述原则:简单的分类比复杂的分类更可取,直线分界线比弯曲分界线更可取。一种岩石应当总是能够在不知道其产地或与其伴生的其他岩石的情况下进行分类,换句话说,该分类除要求所讨论的岩石是火山岩外,不应包含任何需要说明的内容^[20]。鉴于此,Le Martre 教授在帕多瓦建立了一个分类委员会工作小组,分析研究 TAS 图解作为分类依据的优越性,提出了一个火山岩 TAS 分类的建议。该建议被广为传阅,并成为格拉纳达会议讨论的基础。在这次会议上,这个建议稍作修改后,得到分类委员会正式通过^[20]。

会议指出,使用 TAS 图进行分类必须注意以下四点:①该分类是纯描述性的,不一定意味着成因关系;②该分类是为利用新鲜火山岩的分析数据而设计的,为此,建议删去 H₂O 大于 2%和 CO₂ 大于 0.5%的分析数据;③在使用之前,分析数据都必须在不计算 H₂O 和 CO₂ 的情况下换算成 100%;④已被风化、蚀变、交代、变质或经过晶体堆积作用的岩石,其分析数据在该分类中都不能使用,否则会得出虚假的结果。

3 TAS 分类说明

TAS 岩石分区的界线是怎样确定的,Le Matrai^[7,20]有详细的说明。

3.1 不同根名(root name)的命名

如图 1 所示,TAS 图共有 15 个根名(root name);邓晋福等^[17]将其译为“基本名称”;“基本名称”是意译,“根名”是直译)。不同的根名分别用字母标示,并将火山岩划分为 3 个系列,描述其在 CIPW 标准矿物成分中二氧化硅的饱和度状况:○代表过饱和,U 代表不饱和,S 代表饱和(也可以代表弱过饱或

弱不饱和)。

TAS分类规定苦橄玄武岩、玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩各区之间的界线为竖的直线,以与其他分类中已经使用的界线一致^[20,31]。分委会推荐 $\text{SiO}_2=52\%$ 为玄武岩的上限,这个界线与通用的超基性、基性和中性岩石之间的区分一致。在Frolova等^[31]和Peccerillo等^[32]的分类方案中,英安岩与流纹岩的分界线定在一个不变的 SiO_2 值上。

其他的分界线则是估量其在QPAF分类中的位置来描绘的。例如,把碧玄岩-碱玄岩、响质碱玄岩、碱玄响岩和响岩的区与粗面玄武岩、粗面安山岩和碱性粗面岩-粗面岩的区分开的斜线,要位于尽量靠近标准矿物QAPF图中的10%标准矿物似长石等直线的位置上(F区)。同样,碱性粗面岩-粗面岩区与碱性流纹岩区的斜线在QAPF图中靠近20%标准矿物石英的位置上(Q区)。把粗面安山岩和碱性粗面岩-粗面岩的区与玄武安山岩、安山岩和英安岩的区分开的斜线,是由2种岩石之间出现的间断来定位的。这2种岩石是文献中称为典型碱性的岩石和被认为属于钙-碱性的或拉斑玄武质的岩石。

TAS图共采用了数据库中的23937个数据^[20]。该图中确定的S系列和U系列之间的分界线,分别平行于碱性粗面岩-粗面岩区与粗面安山岩区之间的分界线和响岩区与碱玄质响岩区之间的分界线。虽然这些分界线与某些其他分界线成直角,但是不一定要把这些分界线画成这样,因为这些分界线之间的交角取决于在2个坐标轴上选择的相对标尺。

3.2 TAS图的构成

(1)TAS图首先把全部火山岩分为3个系列,每个系列再划分为若干岩类。三大系列即钙碱性(CA)、拉斑玄武岩(TH)和碱性(A)系列。上述三大岩石系列由于历史的沿革和发展,经历过很大的变化。据邓晋福^[33]研究,钙碱性(CA)术语至少有7种岩石学涵义,拉斑(玄武岩)系列(TH)术语至少有6种涵义,碱性系列(A)至少有4种涵义^[17]。可见,相同的CA、TH、A术语可有不同的化学参数,尽管术语相同(英文,中文名称写法均相同),但它们的岩石学涵义可以不同。

(2)TAS分类B区的根名是玄武岩,按 SiO_2 饱和度可进一步划分为碱性和亚碱性玄武岩,为此,必须进行CIPW标准矿物计算:出现霞石标准矿物者称为碱性玄武岩,无霞石标准矿物者称为亚碱性玄

武岩。对于S1区(粗面玄武岩区)、S2区(玄武质粗面安山岩区)和S3区(粗面安山岩区),每个区均有2个根名,即按 $\text{Na}_2\text{O}-2\%$ 大于或小于 K_2O 划分为钠质或钾质。例如,粗面玄武岩区(S1区)有2个根名:钠质的为夏威夷岩(Hawaiite),钾质的为钾质粗面玄武岩(potassic trachybasalt)。同样,S2和S3也各有2个名称,分别为钠质的橄榄粗安岩和钾质的橄榄玄武粗安岩(还有译为钾玄岩的);钠质的歪长粗安岩和钾质的安粗岩。

对于U1区的命名,需要通过CIPW标准矿物计算来确定。当标准矿物 $\text{OI}>10$ 时称为碧玄岩, $\text{OI}<10$ 时称为碱玄岩。

TAS分类对于R区(流纹岩区)、T区(粗面岩区)和Ph区(响岩区)进一步划分的依据是过碱性指数(peralkaline index),即 $[(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3]$ 大于或小于1来确定的。具体步骤如下: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。另外,在确认过碱性流纹岩和过碱性粗面岩之后,按 Al_2O_3 大于或小于 $1.33(\text{TFeO})+4.4\%$ 对过碱性岩石作更进一步划分,位于该坐标系中分界线上方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 rhyrite)(=钠闪碱流岩,comditite),位于分界线下方的则称为碱流质粗面岩(pantelleritic trachyte)和碱流质流纹岩(pantelleritic rhyrite)(=碱流岩,pantellerite)。

看来,TAS分类对过碱性岩石的划分十分繁琐^[17,20]。

4 TAS分类存在的问题

对于TAS分类,全球岩石学家和地球化学家已经研究、讨论了近百年,最终得出一个令全球科学家折服的方案,全球科学家按照该方案执行,这里流淌着千千万万科学家的心血和汗水^[1,5-10,30]。但是,科学是发展的,人类的认识是不断进步的。今天已经进入大数据时代,在大数据的眼光下,TAS图解是否最合适?葛黎等^[34]利用GEOROC数据库资料对全碱对硅(TAS)的图解进行了研究。本次研究认为,目前的TAS分类可能并不完善,至少有下列几个问题值得思考。

4.1 为什么TAS图的分类以直线和斜线分割?

如上所述,这个原则是1984年作为TAS分类主

持人的 Le Martre^[20]在向 IUGS 提交的报告中确定的,岩石命名分类委员会赞同下述原则:简单的分类比复杂的分类好,直的分界线比弯曲的分界线好。看来,以直线和斜线分割是 40 多年前当时学术界的共识。然而,从今天的角度看就不一定合适了。笔者采用全球数据库数据考察了多种岩石,发现没有几种是可以以直线加以区分的(图 2)。在图 2 中,玄武岩、苦橄质玄武岩和苦橄岩数据的密集情况都是以曲线表示的,反映了自然界岩石的分布。

地球上的所有岩石都有自己的分布规律。出现在地球上的岩浆岩,不论是幔源的还是壳源的,都应当是在一定条件下形成的^[13,16,19,35-36]。岩浆形成以后还会经历各种各样的变化,如分离结晶作用、混合作用、混染作用、交代作用、蚀变作用等^[16,19,35-36]。岩石成分也会发生一定的变化,这个变化具有一定的范围和规律,这也在岩石自然分布的范围内。尊重岩石的自然分布,反映岩石的自然分布,是火成岩分类学第一位重要的任务。

4.2 玄武岩 SiO₂ 的上限问题

Le Bas 等^[10]在提交给国际地科联火成岩分类学分会关于火山岩分类命名的报告中确定了 3 条主要界线:超镁铁质岩与玄武岩的 SiO₂ 为 45%,玄武岩与玄武安山岩的 SiO₂ 为 52%,安山岩与英安岩 SiO₂ 为 63%(图 1)。据 Le Bas 等^[10]的解释,早先的方案将玄武岩与玄武安山岩的界线确定在 SiO₂=53%,后来

火成岩分类学分会一致同意将该界线调整为 52%^[37]。

实际情况如何呢?据王金荣等^[38]的统计,全球 MORB 平均为 50.14%,IAB 为 51.84%。也就是说,全球 IAB 的平均值已经接近 52%,超过 52% 的数据可能不在少数。张旗等^[37]在研究云南白马雪山蛇绿岩时遇到过一个火山岩剖面,其 SiO₂ 含量的变化大体在 50%~54% 之间,按照 TAS 的规定分别属于玄武岩和玄武安山岩 2 个岩区,可是野外和镜下均不存在明显差别,都是玄武岩的特征。镜下主要显示间粒结构、粗玄结构和斑状结构,野外 SiO₂ 含量大于 52% 和小于 52% 的岩石之间也没有明显的界线^[35]。看来,在某些情况下,玄武岩的上限也是可以变化的。

4.3 苦橄质玄武岩与玄武岩之间的界线

IUGS 将苦橄质玄武岩与玄武岩的界线定在 SiO₂=45%^[10,32,37,39],并且明确指出这也是基性岩与超基性岩的界线(图 1)。这个问题更麻烦,Jiao 等^[40]对该问题作了专门的研究^[40],结论性意见如下。

(1)全球火山岩数据的研究揭示, SiO₂=45% 并非苦橄质玄武岩与玄武岩之间的界线,苦橄质玄武岩与玄武岩的 SiO₂ 含量有很大的重叠部分(图 2)。苦橄质玄武岩及其类似的岩石,如大洋岩(oceanite)及富辉橄玄武岩(ankalamite)的 SiO₂ 也是变化的,基本上不受 SiO₂=45% 的限制。

(2)苦橄质玄武岩不是超基性岩,从岩石名称

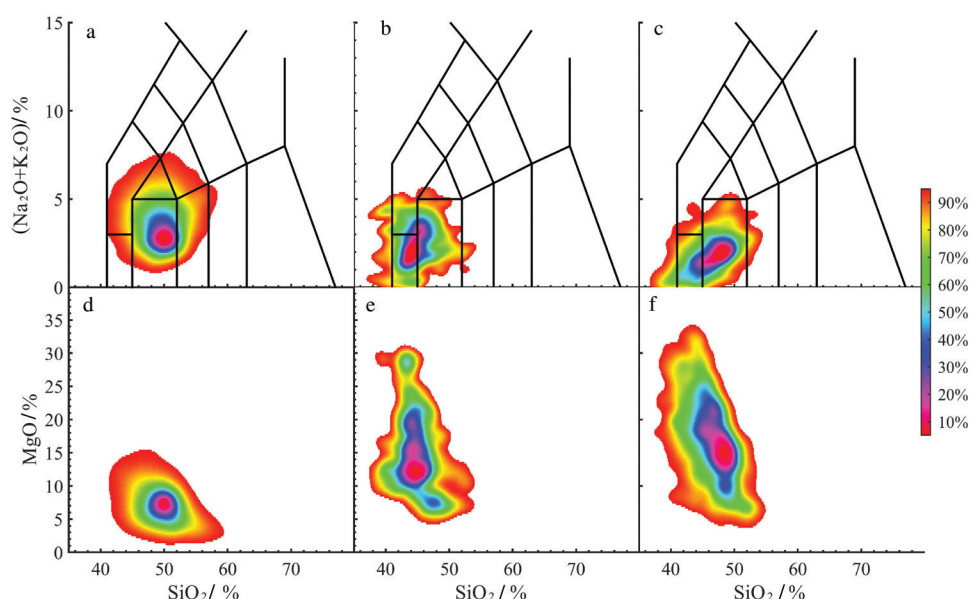


图 2 玄武岩、苦橄质玄武岩和苦橄岩的 TAS 图(分别为 a、b、c 图)和 SiO₂-MgO 图(分别为 d、e、f 图)

Fig. 2 TAS diagrams (a, b, c) and SiO₂-MgO diagrams (d, e, f) of basalt, picrite basalt and picrite

上看属于基性岩类。按照岩石学教科书的规定,苦橄岩才是超基性的火山岩,而苦橄质玄武岩与苦橄岩的区分主要依靠橄榄石斑晶的含量。岩石学研究表明,橄榄石是否出现与火山岩冷却速度及橄榄石结晶速度有关,有些没有大量橄榄石出现的玄武岩其实也是苦橄质玄武岩甚至苦橄岩。因此,玄武岩、苦橄质玄武岩、苦橄岩可能是过渡的。一般来说,玄武岩是基性岩,但是,也不排除某些富镁玄武岩可能是超基性岩。在TAS图解上,玄武岩、苦橄质玄武岩和苦橄岩的 SiO_2 含量是重叠的(图2)。

(3)对全球侵入和喷出的超基性岩的统计表明,很少超基性岩受 $\text{SiO}_2=45\%$ 限制(除幔源的纯橄岩和方辉橄榄岩外,连Iherzolite和peridotite也不受 $\text{SiO}_2=45\%$ 的限制^[40]),把 $\text{SiO}_2=45\%$ 作为基性岩与超基性岩的界线似乎并不合适。

(4)鉴于苦橄质玄武岩在TAS图上的表现,且全球大多数超基性岩似乎并不受 $\text{SiO}_2=45\%$ 的限制, $\text{SiO}_2=45\%$ 并不是基性岩与超基性岩的界线,因此,建议TAS图删去对超基性岩的讨论,TAS图不适合超基性岩^[40]。尤其是玄武岩,其为基性岩还是超基性岩,不能单由橄榄石含量决定,因此, $\text{SiO}_2=45\%$ 也不适用于作为玄武岩的下限。

4.4 B区玄武岩的问题

IUGS规定玄武岩的总碱量可高达5%(图1)。而Yoder等^[41]认为,玄武岩的总碱量通常不超过3%,某些富硅的玄武岩碱含量可以超过3%,而一些贫硅的碱性玄武岩总碱量可低于3%。McDonald等^[21-22]在研究夏威夷地区的夏威夷岩时,确定拉斑玄武岩与夏威夷岩的界线约在 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=4\%$ (当 $\text{SiO}_2=50\%$ 时)和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=2\%$ (当 $\text{SiO}_2=45\%$ 时),与Yoder等^[41]的见解大体一致,也与图1中的Ir曲线大体一致。

此外,IUGS火山岩分类委员会在确定TAS作为火山岩的分类图时还明确一条:玄武岩(B区)可进一步细分为碱性玄武岩和亚碱性玄武岩2类,这取决于它们是否含有标准矿物霞石。这一方案早在1892年就被Iddings^[11]确立,且一直被广泛使用。而这一划分在1985年伦敦的国际地质大会上再次得到确认。这是什么意思呢?有标准矿物霞石的玄武岩是碱性玄武岩,夏威夷岩就有霞石标准矿物^[21-22],夏威夷岩应当是碱性玄武岩。但是,夏威夷岩的碱性玄武岩在S1区,而IUGS规定的碱性玄武

岩在B区。同样是碱性玄武岩,却出现在2个不同的岩区,是否暗示S1区的夏威夷岩不同于B区的碱性玄武岩?

4.5 碱性岩问题

碱性岩是按照岩相学标志划分的,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和碱性暗色矿物^[2,4,7-8,17,22,46]。这一点,学术界的认识大体一致。

TAS图解上碱性岩的分类很繁琐,需要一些较复杂的计算才能确定,操作起来太麻烦。实际上,碱性岩在地球上分布很少,据查瓦里茨基^[42]的统计占岩浆岩的1%左右,而笔者统计的全球碱性岩数据量为8%左右(据GEOROC和PetDB数据库资料)。碱性岩的规模一般很小,但是,鉴于其在矿物学上的特殊性及具有磷酸盐及铌-钽矿床的远景,故对其研究较重视,认为碱性岩有重要的理论和现实意义^[43-45]。因此,文献中碱性岩的数据量与碱性岩的实际分布是不匹配的。

5 分类应当遵循的原则

上一节历数了TAS分类可能存在的问题,而如何解决上述问题,首先要明确分类应当遵循的原则。

5.1 岩石分类命名是描述性的,没有成因的含义

Le Matrai^[7,20]在对TAS图解说明时指出,TAS分类是纯描述性的,不一定意味着成因关系。他强调,该分类除要求所讨论的岩石是火山岩外,不应包含任何需要说明的内容^[7,20]。这是正确的,本文也遵循这一原则。

5.2 岩石分类应当反映岩石的自然组合和自然分布

火成岩是一种岩浆,喷出地表的称喷出岩或火山岩,固结在地壳浅部的为深成岩或侵入岩。最早的岩石分类具有强烈的地域性,如Iddings^[11]和Harker^[47]发现,产于大西洋(如亚速尔群岛)和太平洋(如安第斯山)的岩浆岩明显不同,前者是碱性的,后者是亚碱性的,分别称为大西洋型岩石系列和太平洋型岩石系列。2个系列反映了2种不同的成因、不同的组合。邓晋福等^[48]指出,构造环境也是一种火成岩组合。例如,大洋中脊火成岩是一个岩石组合,岛弧的所有岩石也是一个组合,这是从大的构造背景来说的。

应当指出,IUGS的TAS分类遵循了岩石自然分布,许多岩区的界线选在不同岩石分布密度最小

的地方^[7]。可能由于某些原因,该分类在某些问题的处理上又没有遵循上述原则,例如对玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩各区的界线,选择了目前通用的垂直于 SiO₂ 横坐标的分界线^[7]。又如 S 系列的 S1、S2、S3 与 T 之间,以及 U 系列的 U1、U2、U3 与 Ph 之间的界线为相互平行的斜线,各区范围大小差不多^[7],这些均是人为规定的。再如对地球上出现频率最高的玄武岩,IUGS 规定其为一个矩形(图 1, SiO₂ 在 45%~52% 之间, Na₂O+K₂O 在 0%~5% 之间)。

如图 2 所示,自然界的岩石基本上都不可能都是方方正正聚合在一起以直线和斜线分割的。本文收集了全球全部玄武岩数据(67715 件),发现玄武岩在 TAS 图上极度分散(图 3),说明数据库的玄武岩数据是杂乱无章的,甚至可能包括一些分析错误、命名错误的的数据等(图 3 红色斜十字图例)。其次,较可靠的玄武岩数据(图 3 中以不同颜色圆圈表示)也不呈矩形分布,而是一个不规则的近椭圆的多边形。此外,可靠的玄武岩数据也不受 SiO₂ 为 45% 或 52% 的下限和上限的制约(图 3)。

5.3 TAS 分类中贯穿的岩石命名非此即彼的思路是否合适

TAS 分类统一了岩石名称,例如, SiO₂=52% 是玄武岩和玄武安山岩之间的界线,超过了就不是玄武岩而是玄武安山岩。 SiO₂=51.6% 属于玄武岩,而 SiO₂=52.3% 则属于玄武安山岩。这样的命名符合 TAS 分类的原则,但不一定合理。例如前面介绍的

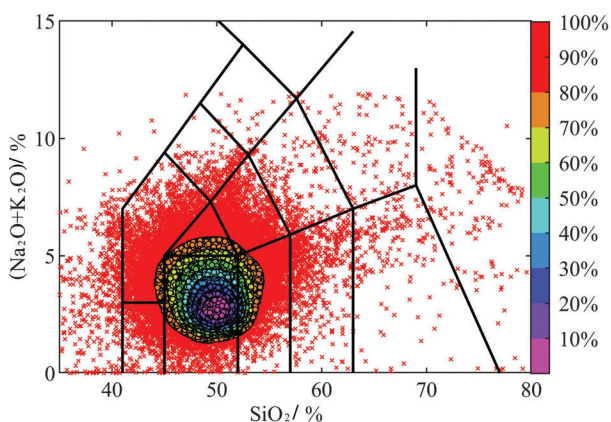


图 3 全球玄武岩基于概率密度的数据再清洗结果 (红色的斜十字图例大部分是垃圾数据,真正可信的是圆圈的数据,玄武岩最密集的区域在 SiO₂=50%、NaO+K₂O=2.5% 左右)

Fig. 3 Global basalt data re-cleaning results based on probability density

笔者在云南研究的一个剖面^[35],该剖面上火山岩的 SiO₂ 含量在 52%~54% 之间,属于一个系列,是玄武岩的一个自然组合,人为地把它分割为玄武岩和玄武安山岩 2 个岩区显然不合适。

6 TAS 分类调整

6.1 从数据出发,让数据发声

TAS 分类需要调整,如何调整,可能不同学者有不同的见解。本文从数据出发,将全球全部火山岩(24 万多个)数据投进 TAS 图解(图 4),发现全球火山岩主要属于基性岩,主要为正常系列的岩石,碱性岩很少。

前文已经指出,全球碱性岩的数量很少,但分类很繁琐。从图 4 看,碱性岩系列中碧玄岩(U1)的数据量最多,其次是响岩(Ph),而碧玄质响岩(U3)几乎很少有数据。响岩则相当复杂,分别集中在 2 个区域,且大部分响岩落入粗面岩区(T)。看来,Ph 与 T 两个岩区之间的界线不合适(图 4)。

6.2 火山岩划分为 3 个系列

众所周知,全球火山岩分为 3 个系列,即正常系列、粗玄岩系列和碱性岩系列,这 3 个系列也是 TAS 图解采用的方案。本次研究表明,3 个系列的区分也不容易,因为 3 个系列之间的重叠很大,尤其在基性岩部分。为此,笔者对数据库中的数据进行归并,例如对于正常系列,是从数据库中选取具有上述 root name 的数据,删去数据中标注有“碱性”作为附加名称的数据,如 basalt, alkaline; basalt, shoshonitic; basalt, latitic; basalt, trachytic; basalt,

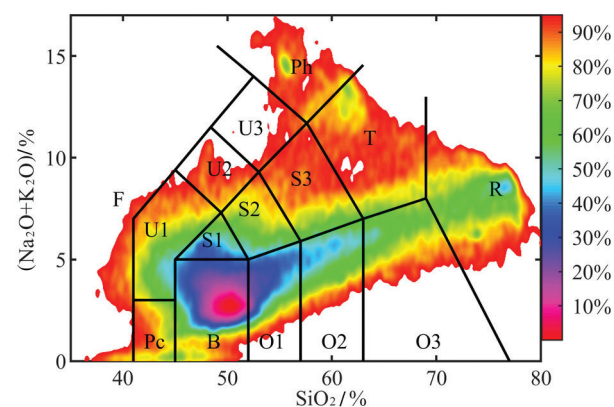


图 4 全球火山岩在 TAS 图解中的分布密度 (图中代号同图 1)

Fig. 4 Distribution density map of global volcanic rocks in the TAS diagram

trachydoleritic; andesite, alkaline; andesite, latitic; andesite, trachytic; dacite, alkaline; dacite, trachytic; rhyolite, alkaline; rhyolite, trachytic等,有些属于地方性的术语难以归类,则直接把数据投在TAS图中决定取舍。将删去的上述数据归入粗玄武岩系列。其次,删去上述root name中含似长石类(白榴石、黄玉、霞石、黄长石、蓝方石等)和碱性暗色矿物(钠铁闪石、钠闪石、霓石、霓辉石等)的数据及过碱性岩石(如 basalt, basanitic; basalt, nepheline; basalt, peralkaline; basalt, tephritic; rhyolite, comenditic; rhyolite, peralkaline; rhyolite, topaz; rhyolite, soda等),将删去的上述岩石并入碱性岩系列。对于粗玄武岩系列,则将包含有似长石类和碱性暗色矿物的岩石及过碱性的岩石归入碱性岩系列。

(3)调整的过程即不断试错的过程。科学研究本身就是一个不断试错的过程,在不断试错中逼近真理。在试错过程中,笔者主要着眼于正常系列的研究,主要集中在2个方面:一是如何减少正常系列与粗玄武岩系列之间的重叠;另一个是正常系列的不同岩区如何划分?图5显示了全球正常系列岩石的自然分布。从图5看,正常系列的数据主要集中在系列的两端:基性端员是玄武岩,数据量最多,主要集中在SiO₂=50%左右,与图4一致;酸性端员是流纹岩,数据量显著减少。正常系列数据量最少的部分在流纹岩与英安岩的界线附近(图5)。

正常系列之间不同岩区的界线如何确定?笔者考虑了多种方案,最后采用数据中出现 basalt、andesite、dacite 和 rhyolite 根名的术语(不考虑 microbasalt 和 basalt-andesite,它们不是根名)。上述

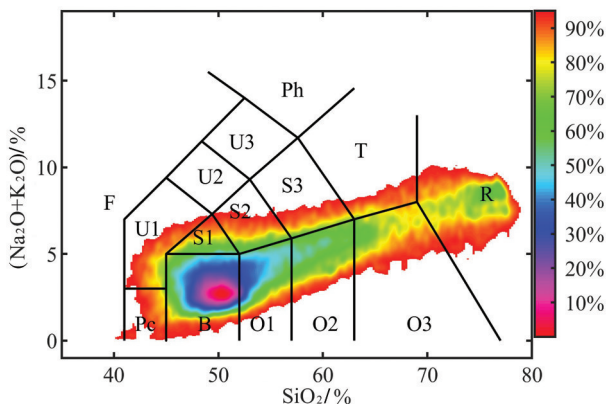


图5 全球正常系列火山岩数据分布趋势图(图中代号同图1)
Fig. 5 Distribution map of global normal series volcanic rocks

岩区的界线与早先的界线基本一致,由于删去了玄武安山岩区,玄武岩与安山岩之间的界线大致在SiO₂=55%(图6)。

此外,经过上述处理,全球3个系列的数据仍然有很大的重叠(图7)。为此,笔者开发了一个小软件(密度分布函数方法),以解决这个问题^[49]。

7 新的火山岩TAS分类

图8是图7的归纳,是本文提出的火山岩TAS分类图。新方案尽可能沿用早先的命名(只新增了一个碱流岩区),但范围有所改变,岩区数目有所减少。以下简要说明之。

7.1 正常系列

正常系列包括玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩4个岩区。早先的分类中还有玄武安山岩和苦橄玄武岩2个岩区(图1),本文建议取消上述2个岩区(理由详见参考文献[40])。新TAS图玄武岩区大大扩展了,上限在SiO₂=55%左右,且不设下限(涵盖了早先的苦橄质玄武岩区)。此外,安山岩和英安岩之间的界线大体不变(SiO₂=63%),英安岩与流纹岩之间的界线从70%左右调整到68%左右(图8)。

正常系列与粗玄武岩系列的界线是根据2个系列之间的重叠最小程度拟合的(图8),该界线在中酸性岩部分大体相当于O系列与S系列的分界线,在基性岩部分大体沿Ir曲线的方向(图8)。早先的TAS图解对于流纹岩的Na₂O+K₂O没有限制(R岩区,对比图1和图8),本文将其限制在上述分界线(Ir)以下,以上为碱性岩系列的碱流岩。

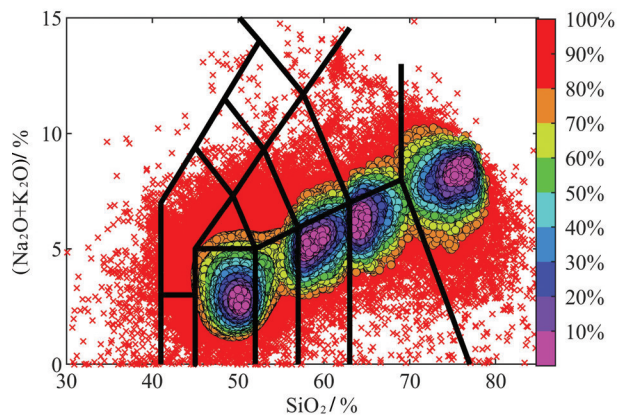


图6 正常系列玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩数据分布
Fig. 6 Distribution of normal series of basalt, andesite, dacite and rhyolite

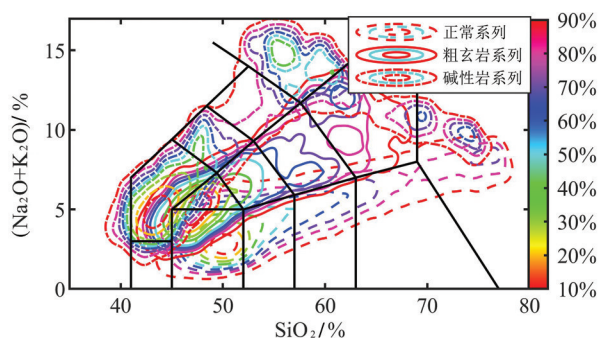


图7 三个系列数据的分布

(棕色细线示正常系列,红色细线示粗玄岩系列,蓝色细线示碱性岩系列;3个系列在基性岩部分重叠十分严重)

Fig. 7 Distribution of three series of data

7.2 粗玄岩系列

粗玄岩系列包括粗玄岩、粗安岩和粗面岩 3 个岩区,其与正常系列的界线前面已经介绍,二者的界线(包括与碱性岩系列)在基性岩部分重叠较多,很难准确区分。粗玄岩系列以基性岩部分数据最多,中性岩部分数据明显减少,酸性岩部分数据更少(对比图 1 和图 8)。粗玄岩系列的粗玄岩岩区范围有很大的扩展,包括全部 S1 区、S2 区的一部分和 B 区的一部分(大体与 Ir 界线重叠);粗安岩大体相当于早先的 S3 区,包括一部分 S2 区,粗面岩大体相当于早先的 T 区,但是范围大大缩小了,T 区由开口变为封闭(图 8)。

7.3 碱性岩系列

碱性岩系列也分为 3 个区:碧玄岩区、响岩区和碱流岩区(pantellerite)。碱性岩系列与粗玄岩系列的界线以岩石中出现似长石和碱性暗色矿物为标志,与早先的 TAS 图解界线接近(图 8)。早先的 TAS 图解将碱性岩系列划分为 5 个岩区(图 1),由于似长石岩的数量很少(数据库仅有 207 件),且并不是以 $\text{SiO}_2=45\%$ 作为界线与碧玄岩分开,故取消该岩区,将其合并入碧玄岩区(包括数量更少的响岩质碧玄岩和响岩质碱玄岩)。新 TAS 图解的碧玄岩区范围扩大了,包括早先的 F 区、部分 Pc 区和大部分 U2 区(图 8)。响岩区包括 Ph、U3 区和部分 T 区。碱性岩系列最大的变化是增加了一个碱流岩区,包括碱流岩(pantellerite)、钠闪碱流岩(comendite)、过碱性流纹岩(peralkaline-rhyolite)等,主要分布在早先 R 区的上部 and T 区的右部(图 8)。这个岩区在

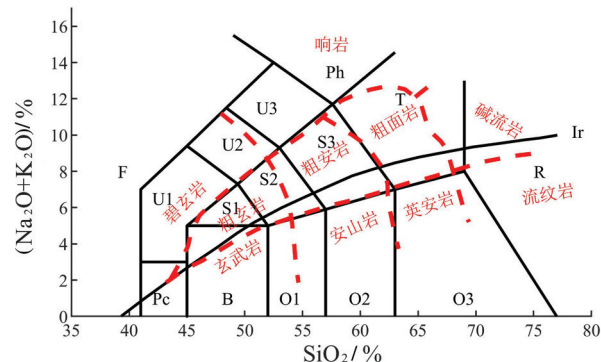


图8 新的火山岩 TAS 分类图解(黑色实线示早先 TAS 分类的界线,红色虚线为本文的 TAS 分类界线)

Fig. 8 New volcanic rock TAS classification diagram

TAS 图解中没有标出,是本文新设的。但是,Le Maitre 等^[7]早已指出,R 区的根名是流纹岩,假若过碱性指数 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ (分子比) >1 ,则还可进一步分出过碱性流纹岩。看来,Le Maitre 等有先见之明,可能由于某些原因没有在 TAS 图解上有所表示。本次研究从数据库检索出相当数量的碱流岩数据,使之可以构成一个岩区(对比图 1 和图 8)。

8 新的 TAS 图解的使用

早先的 TAS 图解使用是有严格规定的:①该图解只能应用于新鲜岩石,故要删去 $\text{H}_2\text{O}^+>2\%$ 和 $\text{CO}_2>0.5\%$ 的岩石;所有分析均在无 H_2O 和 CO_2 的基础上重新计算为 100%^[10]。而使用新的 TAS 分类(图 8)则无上述限制,不论火山岩是否经历了蚀变、变质,也无需重新计算为 100%。②早先的分类要把化学分析数据换算为 CIPW 标准矿物,再根据计算中霞石标准的有无确定所属的岩区,碱性岩的计算尤其麻烦。而使用本文推荐的方案,上述计算不再需要,只要将数据投在 TAS 图解上即可。③早先的分类命名原则是数据点投到哪个岩区即属于哪个名称,本文不这样规定。从图 7 看,不同岩区的重叠是普遍的,尤其基性岩部分。因此,新的 TAS 图解的界线具有过渡性质,不存在岩石名称命名唯一性的规定。例如一个剖面或一套岩石组合的数据,投在 TAS 图解上可能出现跨岩区分布的情况,则不一定属于不同的岩石。因此,在使用本分类方案时,应根据岩石分布密度确定它们是否属于 1 个组合或 2 个不同的组合。如图 2-e 所示,苦橄质玄武岩按

照MgO含量的差异至少可以分为2个组合。对比图7和图8,碱流岩也明显可以分为2个亚类(图8碱性岩系列蓝色线条圈定的酸性岩部分)。

9 存在的问题

(1)本文提出的TAS分类方案,是以全球24万个火山岩数据作为基础的,是数据分析的结果。但是,由于方法上的局限,上述结果并不令人满意。今后的数据量会更多,如何对这些数据进行处理,方法学的突破是一个急待解决的问题。

(2)超基性岩与基性岩的界线定在 $\text{SiO}_2=45\%$,它是什么来历?这是一个基本的问题,笔者几乎穷尽了全部超基性岩数据,仍然没有解决这个问题。

(3)碱性岩系列在TAS图解中呈“人”字形分布是早先想不到的,尤其在酸性岩部分,碱性岩系列与正常系列直接接触也令人费解。笔者曾经尝试查找粗玄岩系列的酸性岩,由于数据量少而无法表示。众所周知,火山岩3个系列主要是依据火山岩的硅是否饱和来划分的:硅过饱和为正常系列,硅饱和为粗玄岩系列,硅不饱和为碱性岩系列。而具体识别时的标志却是以是否出现标准矿物霞石(区分正常系列与粗玄岩系列)和是否出现实际碱性矿物作为标志(划分碱性岩系列的标志)。上述规定表现在TAS图解上,则是按照随着 SiO_2 含量的变化总碱量($\text{NaO}+\text{K}_2\text{O}$)的变化来决定的,其含义是硅饱和程度与总碱量之间存在一定的相关关系:总碱量低,硅饱和程度高;反之总碱量高,硅饱和度低。但是,总碱量与硅饱和程度是2个不同的概念,总碱量与硅饱和度是否一一对应也不清楚。上述标志还要求:无霞石标准矿物的,总碱量低;有霞石标准矿物的,总碱量较高;有实际矿物霞石出现的,总碱量最高。岩石学自身是否有上述规律呢?霞石的化学成分为 $\text{KNa}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$,霞石的确富碱,但是,全岩总碱量并不是由霞石一种矿物决定的,霞石出现的岩石其总碱量并不一定是最高的。数据库有大量不含霞石的岩石,其总碱量甚至比含霞石的岩石还高。由此说明,有实际矿物霞石出现与总碱量之间并无一一对应的关系。看来,TAS图解的理论基础还需要进一步讨论。

10 小结

(1)TAS图解是IUGS推荐的火山岩分类方案,

已经使用40年了,已成为学术界的共识。在大数据时代,从大数据的眼光看,TAS图解存在一些问题,需要加以调整和改进。

(2)本文收集了全球火山岩数据,考察了这些数据在TAS图解上的表现,采用大数据方法对上述数据进行处理,得出了新的火山岩TAS分类方案。早先的TAS图解分为15个岩区,互相之间以直线和斜线分割;本文将其缩减为10个岩区,其间的界线按照数据分布的疏密分割。本文建议取消苦橄质玄武岩、玄武安山岩、玄武粗面岩、碱玄质响岩、响岩质碱玄岩、似长石岩6个岩区,增加1个碱流岩岩区。

(3)本文的研究是初步的,提出的方案可能还存在许多问题。新的TAS分类是根据大量的数据确定的,实际上本文的数据远远不够。如果能收集到更多的数据,将能够得到更好的分类。

(4)TAS图解的3个系列主要是依据火山岩的硅是否饱和来划分的,具体识别标志却是以是否出现标准矿物霞石(区分正常系列与粗玄岩系列)和是否出现实际碱性矿物作为标志(区分粗玄岩系列与碱性岩系列的标志),而表现在TAS图上则是按照随着 SiO_2 含量的变化总碱量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)的变化来决定的。上述3个标志之间是什么关系?能否一一对应?看来,TAS图解的理论基础可能也需要进一步讨论。

本文只是抛砖引玉,希望能够引起大家的关注,开启利用大数据方法对TAS分类的重新研究。

后记:笔者开始只是感觉TAS图解可能存在一些不足,遂开启了对全球数据的研究。随着研究的进展,发现TAS图解存在的问题不少。对数据进行反复的琢磨,尝试各种方法,初步得出了一些结果。这些结果与早先的TAS分类大相径庭,是这些结果合理还是早先的分类合适?本文无法定论。研究的过程令人非常纠结,因为,早先的研究应当说是经过了千锤百炼的,但是,在全球数据基础上给出的结果却是令人震撼的。随着科学的发展,岩石命名已经很少有人关注了。笔者认为,火成岩分类命名可能需要重新认识,希望本次研究能够引起学术界的关注,揭开火成岩分类命名研究新的一页。

致谢:衷心感谢三位审稿专家对本文的细心批评与评论,感谢与张成立教授的讨论。本文修改了多次,最终稿相对于初稿扩充了几近一倍的篇幅,

也得益于对批评意见的理解与领悟。

参考文献

- [1] Iddings J P. Origin of Igneous Rocks[M]. Bull. Phil. Soc. Washington, 1892, 12: 89–213.
- [2] Chayes F. Alkaline and subalkaline basalts[J]. Am. Jour. Sci., 1966, 264: 128–145.
- [3] Streckeisen A, Le Maitre R W. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks[J]. N. Jb. Miner. Abh., 1979, 136: 169–206.
- [4] Fitton J G, Upton B G J. Alkaline Igneous Rocks[M]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1987.
- [5] 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, 523–48.
- [6] Le Maitre R W. Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classifications[J]. Contr. Miner. Petrol., 1976, 56: 181–9.
- [7] Le Martre R W, Bateman P, Dudek A. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [8] Kuno H. High-alumina basalt[J]. J. Petrol., 1960, 1: 121–145.
- [9] Kuno H. Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs[J]. Bull. Volcanol, 1966, 29: 195–222.
- [10] Le bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. J. Petrol., 1986, 27: 745–750.
- [11] Middlemost E A K. A contribution to the nomenclature and classification of volcanic rocks[J]. Geol. Mag., 1980, 117: 51–7.
- [12] Murray J W. A Guide to Classification in Geology[M]. Chichester Ellis Horwood Ltd, 1981.
- [13] Rollison H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Scientific and Technical, New York, 1993.
- [14] 王碧香. 国际火成岩分类命名研究现状[J]. 地质科技情报, 1990, (4): 30–31.
- [15] Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. The Interpretation of Igneous Rocks[M]. London: George Allen & Unwin, 1979.
- [16] Carmichael I S E, Turner F J, Verhoogen J V. Igneous Petrology[M]. Department of Geology and Geophysics, Berkeley: University of California, 1982.
- [17] 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.
- [18] 都城秋穗, 久城育夫. 岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1–344.
- [19] Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [20] Le Maitre R W. A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram[J]. Australian J. Earth Sci., 1984, 31: 243–255.
- [21] MacDonald G A, Katsura T. Chemical compositions of Hawaiian lavas[J]. J. Petrol., 1964, 5: 83–133.
- [22] 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 Willims. Geol. Soc. Am. Mem., 1968, 116: 477–522.
- [23] 张旗, 周永章. 大数据正在引发地球科学领域一场深刻的革命——《地质科学》2017 年大数据专题代序[J]. 地质科学, 2017, 52(3): 637–648.
- [24] Trigor W E. Speiziclle Petrographic der Eruptivgesteine[M]. Berlin, 1935.
- [25] Rittmann A. Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1973.
- [26] Streckeisen A. To each plutonic rock its proper name[J]. Earth-Sci. Rev., 1976, 12: 1–33.
- [27] Hatch F H, Wells A K, Wells M K. The Petrology of the Igneous Rocks[M]. Thomas Murby, London, 1972.
- [28] De La Roche H, Leterrier P, Grandclaude P, et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using the R1–R2 diagram and major element analyses. Its relationships with current nomenclature[J]. Chem. Geol., 1980, 29: 183–210.
- [29] Zancettin B. Proposed new chemical classification of volcanic rocks[J]. Episodes, 1984, 7: 19–20.
- [30] Streckeisen A. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks, recommendations and suggestions of the IUGS commission on the systematics of igneous rocks[J]. Geology (Boulder), 1979, 7: 331–335.
- [31] Frolova T I, Petrova M A. The classification diagram of effusive rocks[C]//IUGS Subcommittee, 18th circular, Contrib., 1974, 39: 25–30.
- [32] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1976, 58: 63–81.
- [33] 邓晋福. 火成岩系列划分的回顾与当代含义[J]. 岩石矿物学杂志, 1991, 10(1): 37–42.
- [34] 葛黎, 顾海欧, 汪方跃, 等. 基于数据密度确定分布区域的方法: 以 TAS 图解分析为例[J]. 地质科学, 2018, 53(4): 1240–1253.
- [35] 张旗, 李达周, 张魁武. 横断山区镁铁-超镁铁岩[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [36] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [37] Streckeisen A. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks[J]. N. Jb. Miner. Abh., 1978, 134: 1–14.
- [38] 王金荣, 陈万峰, 张旗. MORB 数据挖掘: 玄武岩判别图反思[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(2): 420–431.
- [39] Carmichael I S E, Turner F J, Verhoogen J. Igneous Petrology[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [40] Jiao S T, Zhang Q, Ge C et al. Distribution of Picrite Basalt on TAS and the Boundary between Basic and Ultrabasic Rocks: Research and Discovery of Global Volcanic Rock Data (in press).
- [41] Yoder H S Jr, Tilley C E. Origin of basalt magmas: an experiment

- study of natural and synthetic rock systems[J]. *J. Petrol.*, 1962, 3: 342-532.
- [42]查瓦里茨基 A H. 火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 1958.
- [43]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.
- [44]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.
- [45]黄文龙. 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.
- [46]吴利仁, 刘若新, 梅厚钧, 等. 云南某地基性岩岩石学上的一些问题[J]. *地质科学*, 1959, 2(11): 354-364.
- [47]Harker A. The natural history of igneous rocks: I. Their geographical and chronological distribution[J]. *Science Progress* (1894-1898), 1896, 6: 12-33.
- [48]邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 392-402.
- [49]葛粲, 张旗, 李修钰, 孙贺, 等. 一维到三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.