

基于大数据方法建立大洋安山岩构造环境判别图

刘欣雨¹, 张旗², 张成立¹

LIU Xinyu¹, ZHANG Qi², ZHANG Chengli¹

1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;*

2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*

摘要: 岩浆岩的地球化学元素往往对其构造环境具有一定的指示作用, 前人使用构造环境判别图描述二者之间的关联关系。然而, 安山岩因其岩石成因的复杂性和构造环境的“单调性”, 在判别图研究领域并未受到重视。收集了GEOROC和PetDB两个数据库中的全球新生代洋中脊安山岩(MORA)、洋岛安山岩(OIA)和岛弧安山岩(IAA)。使用43个元素组成的924个比值建立超过42万个直角坐标系, 将三类安山岩数据投入坐标系中, 并通过MATLAB计算三者之间的交叠率筛选出4个最佳判别图: $\lg(\text{Ga}/\text{Cs})-\lg(\text{Ba}/\text{Nb})$ 、 $\lg(\text{TFeO}/\text{Ga})-\lg(\text{Eu}/\text{Pb})$ 、 $\lg(\text{K}_2\text{O}/\text{Nb})-\lg(\text{Ga}/\text{Cs})$ 和 $\lg(\text{MnO}/\text{Pb})-\lg(\text{Cs}/\text{Nb})$ 。利用核密度曲线对比图分析判别图中的元素及元素比值, 结果表明: ①LILE(大离子亲石元素)与HFSE(高场强元素)的比值关系能有效区分MORA和IAA; ②LILE与其他元素的比值关系则更有利于从三者中识别出OIA; ③LILE在一定程度上比HFSE更易于判别大洋安山岩的构造环境。研究表明, 安山岩可以成为一种使用范围更广泛的构造环境指示剂, 其判别效果甚至优于玄武岩判别图。这也进一步说明, 安山岩的成因虽然比玄武岩复杂, 但是大数据方法是提取出具有构造环境指示意义的相关关系的有效途径。

关键词: 安山岩; 构造环境; 大数据; 地球化学

中图分类号: P588.14⁺4; P628 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)12-1963-08

Liu X Y, Zhang Q, Zhang C L. The establishment of oceanic andesites tectonic environment discrimination diagrams with big data method. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(12):1963-1970

Abstract: Geochemical elements of magmatic rocks often indicate their tectonic environments. Previous geologists used tectonic environment discriminant diagrams to describe their correlation. However, it is too challenging to apply discriminant diagrams to identifying the tectonic environment of andesites because of their complexity of petrogenesis and the unicity of their tectonic environment. Based on the GEOROC and PetDB databases, the authors intergrated the global Cenozoic oceanic andesites with three categories: mid-oceanic ridge andesites (MORA), oceanic island andesites (OIA) and island arc andesites (IAA). With 924 element ratios consisting of any two of 43 elements, the authors built more than 420,000 rectangular coordinate systems. 4 optimal discriminant diagrams were sifted by calculating overlap ratios among the three types of oceanic andesites: $\lg(\text{Ba}/\text{Nb})$ versus $\lg(\text{Ga}/\text{Cs})$, $\lg(\text{Eu}/\text{Pb})$ versus $\lg(\text{TFeO}/\text{Ga})$, $\lg(\text{Ga}/\text{Cs})$ versus $\lg(\text{K}_2\text{O}/\text{Nb})$ and $\lg(\text{Cs}/\text{Nb})$ versus $\lg(\text{MnO}/\text{Pb})$. The elements and element ratios were analyzed by comparing the kernel densities of the three types of andesites, with some conclusions reached: (1) The ratio of LILE and HFSE can effectively differentiate MORA and IAA; (2) the ratio of LILE and other elements is useful to identifying OIA from the other two types; (3) in a certain degree, LILE is more appropriate for determining tectonic environments of oceanic

收稿日期: 2019-04-17; **修订日期:** 2019-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(批准号:41421002)、大陆动力学国家重点实验室科技部专项(编号:201210133)和中国地质调查局项目《资源环境重大问题综合区划与开发保护策略研究》(编号:DD20190463)

作者简介: 刘欣雨(1991-), 女, 在读博士生, 从事安山岩大数据研究。E-mail: liuxy0529@qq.com

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

andesites than HFSE. This study presents that andesite is likely to be a widely used indicator of tectonic environments, which might be more appropriate than basalt discriminant diagram. It further indicates that even the andesite genesis is much more complicated than basalt, big data method is an effective approach to extract the correlation with tectonic discriminant significant.

Key words: andesite; tectonic environment; big data; geochemistry

基性火山岩的构造环境通常是控制岩浆作用的主导因素,在一定程度上限制了岩浆源区矿物组成及温压条件,导致岩浆岩具有不同的地球化学组成^[1]。因此,基性火山岩的地球化学特征通常对原始岩浆的构造属性具有指示作用。构造环境判别图清晰、简明地展示了二者之间的关系,并被广泛应用于玄武岩和花岗岩的构造环境研究中^[2-6]。安山岩广泛出露于造山带中,其构造环境主要为陆缘弧、岛弧等汇聚板块边缘,但也有一些安山岩分布在洋中脊^[7-8]、大陆内部(如大陆裂谷)等构造环境^[9]。然而,前人对安山岩的微量元素是否能识别、如何识别不同构造环境的研究程度远低于对玄武岩,仅个别学者对此做了研究^[10-12]。安山岩突出的构造背景特征容易使人忽视除岛弧、陆缘弧以外的构造环境,复杂的岩石成因也阻碍了对其构造环境判别标志的提取。因此,安山岩构造环境判别的研究工作迟迟难以推进。

随着互联网及计算机技术的飞速发展,数据的获取变得轻而易举,对数据的处理方法也有了明显的进步。大数据时代的到来使科学研究开辟了数据驱动模式的研究方法,不仅能合理有效地弥补理论研究的不足,还可能从大数据模式中获取更多新的信息。Verma等^[13]收集了全球4023个中新世—全新世中性岩样品的数据,采用线性回归方法对不同地球化学元素系列(主量元素、相容元素、不相容元素等)分别构筑了构造环境判别图组,利用高维度判别图有效识别出洋岛(OI)、岛弧(IA)、陆缘弧(CA)、大陆裂谷(CR)和碰撞带(Col)5种构造环境。由此看来,安山岩的地球化学元素在一定程度上可以反映其构造环境的差异性,且从数据出发的

研究思想为安山岩构造环境判别图的建立找到了突破口。

目前,全球积累了海量的岩石、矿物地球化学和同位素年龄数据,并建立了多个岩石地球化学数据库(表1)。其中GEOROC和PetDB两个数据库因其覆盖面广、数据量大,已被广泛应用于研究中^[14-21]。本文基于上述2个数据库收集整理了全球新生代大洋安山岩的数据,尝试建立大洋安山岩构造环境判别图。

1 研究方法

1.1 数据处理

1.1.1 离群数据的识别与剔除

在对数据集进行分析时,常使用平均值作为数据集的质心以代表数据集的主要特征。若个别数据与主体特征存在较大差异时,会明显影响平均值的结果,容易得出错误的结论。统计学中有许多限定离群值的计算规则,其中 3σ 准则最常见,即当某元素单个样品数据与该元素全体样品的平均值之差大于或等于该元素标准差(σ)的3倍时,称该数据为“离群数据”,应予以删除^[22]。然而,岩石地球化学数据库中的数据受不同实验室数据质量的差异、不同时期测试方法的准确度等影响,容易产生一些不易识别的误差数据,从而整体降低数据集的置信度。为了快速从众多数据中获得更准确的信息,本文将离群数据的判断标准提高为 2σ 。即,假设某一元素中数据集为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,其平均值为 \bar{X} 。则对任意 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$),当 $|x_i - \bar{X}| \geq 2 * \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$ 时,认为 x_i 为离群数据,应予以剔除。

表1 全球岩石地球化学数据库信息(截至2018年12月)

Table 1 General information for global rock geochemistry databases (by December 2018)

数据库名称	所属机构或系统	主要功能	数据保有量/件	网址
GEOROC	MPG	大陆和海洋岩石地球化学数据库	845310	http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc
PetDB	EarthChem	海底岩石地球化学数据库	90108	http://www.earthchem.org/petdb
NAVDAT	EarthChem	北美火山岩和侵入岩数据库	64985	http://www.navdat.org
MetPetDB	NSF	变质岩岩石学数据库	27011	http://metpetdb.rpi.edu/
PANGAEA	ICSU	地球和环境科学数据库	18536	http://pangaea.de/

1.1.2 计算元素比值并取对数

当双变量图解中的横-纵坐标为 $X-X/Y$ 、 $X-Y/X$ 或 $X/Z-Y/Z$ 时,即使 X 、 Y 、 Z 为相互独立的 3 个变量,图解中的数据点也会显示出一定程度的相关关系,这种现象在统计学中被称为“伪相关”或“不纯相关”^[23]。这种效应在早期的玄武岩构造环境判别图中已被广泛使用,例如 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图^[24]等。为了使离散的数据点在双变量图解中相对集中或显示出相关性,本文对全部元素进行两两组合计算比值。

此外,对计算的元素比值取以 10 为底的对数可以保证如下 2 个优势:①由于 $\lg(X/Y)=-\lg(Y/X)$, $\lg(X/Y)$ 可视作 $\lg(Y/X)$ 的等效变量,能大幅缩减后期的计算量。②对于个别元素来说,仅靠计算比值仍无法完全消除离散效应,增加对数计算则能进一步优化变量间的相关性。

1.2 指示判别效果的参数——交叠率

本文采用包围有效数据点的最小凸多边形来表示样品散点在图中的分布情况,并利用 MATLAB 中 `convhull` 函数可求得凸多边形的面积 S 。当计算 3 组样品的交叠率时,先分别计算出 3 组样品的凸多边形面积 S_1 、 S_2 、 S_3 ,再根据两两凸多边形之间的交点计算重叠面积 Δs_1 、 Δs_2 、 Δs_3 。最后,使用交叠率 e 指示判别效果。

当 3 个凸多边形存在相交区域时(图 1-a),交叠率 e 计算公式如下:

$$e = \max \left(\frac{\Delta s_1}{\min(S_1, S_2)}, \frac{\Delta s_2}{\min(S_1, S_3)}, \frac{\Delta s_3}{\min(S_2, S_3)} \right)$$

当只存在一个交点时(图 1-b), $e=0$;当不存在交叠时(图 1-c), $e=-1$;当存在交叠时, $e>0$,且交叠率 e 越小,重叠面积越小。

1.3 核密度估计曲线对比图

地球化学数据中常呈非正态分布,且数据库由

于各种原因可能包含一定量的错误数据,算术平均值可以给定不同元素在各构造环境中的参考值,但很难客观反映各元素丰度的分布特征。因此本文采用分布密度函数曲线的方法,直观显示不同类别安山岩样品中不同元素的差异特征。

对于分布密度函数的估计一般有 2 种:参数估计和非参数估计。参数估计仅适用于对已知分布类型(如正态分布、卡方分布等)的样本集合进行求解。非参数估计(核密度估计)不利用有关数据分布的先验知识,对数据分布不附加任何假定,是一种从数据样本本身出发研究数据分布特征的方法^[25]。岩石地球化学数据库中的数据具有较强的混杂性和较宽的变化范围,很难得到先验的分布类型,因此本文采取最常用的高斯核密度函数估计曲线的方法,对样本数据各元素的丰度分布情况进行刻画。

简单来讲,高斯核密度函数估计是以每个数据点的值作为横坐标生成相应的高斯函数,然后通过求和计算总数据集的核密度估计曲线(图 2)。具体计算公式及方法见参考文献^[25],本文不再赘述。

2 大洋安山岩构造环境判别图

本文将大洋安山岩划分为洋中脊安山岩(MORA)、洋岛安山岩(OIA)和岛弧安山岩(IAA)。将数据库中 SiO_2 含量为 52%~63% 的新生代火山岩定义为新生代安山岩样品,根据其构造环境类别 Spreading Center 和 Ocean Island 分别提取出 MORA(719 个样品)和 OIA(2844 个样品)。又根据地理位置(Aleutian Arc, Kurile Arc, Lesser Antilles, Ryukyu Arc, Sunda Arc, Honshu Arc, Mariana Arc, Tonga Arc),从 Convergent Margin 类别中提取出新生代 IAA 数据(13908 个样品)。不同构造环境的新

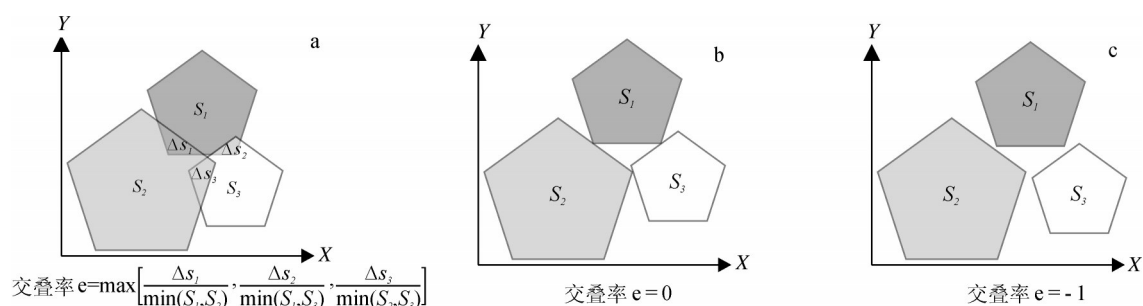


图 1 交叠率计算方法示意图

Fig.1 Schematic diagrams of overlap ratio calculation

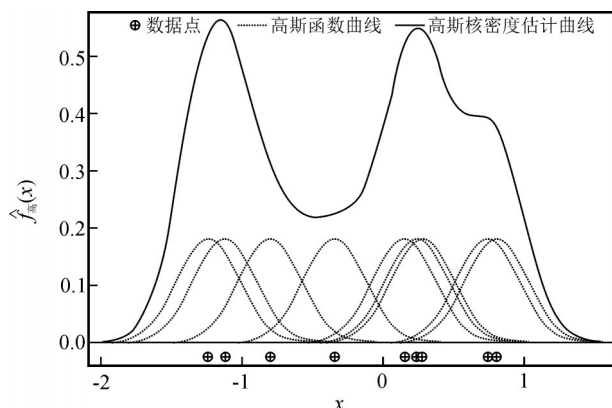


图2 高斯核密度函数估计曲线计算示意图
(据参考文献[25]修改)

Fig. 2 Schematic diagram of Gaussian kernel density estimation curve

生代安山岩样品均分布在对应的现代构造位置(图3),其构造属性明确,是判别图建立的基础。

选取岛弧安山岩、洋岛安山岩和大洋中脊安山岩中的43个元素(包括10个主量元素和33个微量元素),两组组合计算出924个比值,通过MATLAB编程计算获得42万余个交叠率值,根据交叠率从小到大的排序,最终生成4幅最佳判别图(图4)。使用 2σ 原则排除离散值后,多边形包络线中的数据点具有较好的代表性和普适性,但本文仍展示了全部数据点的分布情况并绘制了有效数据的边界线,以方便其他学者使用该套图解。结果表明,OIA明显区别于IAA和MORA,但IAA和MORA无论用什么元素比值对进行划分,都不可避免地存在少量重叠区域。因此使用虚线划分MORA和IAA,使用实线划分OIA和另外2类安山岩。

3 讨论

Pearce提出的玄武岩构造环境判别图解中大多使用高场强元素(如Nb、Ta、Zr、Ti等)作为判别标志,因为这类元素的地球化学性质较稳定,不易随流体或其他作用迁移变化,有可能对古老的岩石样品也具有判别作用^[2-3]。李曙光^[5]提出的蛇绿岩判别图中虽使用了Ba、Th这类活动元素,但利用典型实例证明了海水侵蚀和变质作用不会严重影响这2个元素的含量。众多学者也强调,在判别图的建立与使用中,应注意避免使用活动性较强、易受岩石形成过程或后期地质作用改变的元素^[26-27]。而本文提

出的IAA-OIA-MORA判别图解,在提取横、纵坐标时并未考虑任何地质作用过程对不同元素的影响,除使用较稳定的高场强元素(HFSE,如Nb、Ga)外,还频繁使用了活动性较强的大离子亲石元素(LILE,如 K_2O 、Ba、Cs、Pb等),是完全使用数据驱动的研究模式得出的结果。

通过对所得判别图中的横、纵坐标数据绘制核密度函数曲线(图5),能更清晰地辨认出各图解中主要的判别标志,以及洋中脊安山岩、洋岛安山岩、岛弧安山岩三者之间的差异。 $\lg(K_2O/Nb)$ 和 $\lg(Ba/Nb)$ 均表现出OIA<MORA<IAA的特征(图5-a,b); $\lg(Cs/Nb)$ 和 $\lg(TFeO/Ga)$ 的判别作用则相对较弱,其中 $\lg(Cs/Nb)$ 表现为MORA<OIA \approx IAA(图5-c), $\lg(TFeO/Ga)$ 表现为OIA \neq OIA \approx MORA(图5-d); $\lg(Ga/Cs)$ 、 $\lg(Eu/Pb)$ 和 $\lg(MnO/Pb)$ 表现为OIA<IAA<MORA的特征(图5-e,f)。

对比曲线形态及间距大小可以看出,MORA与IAA的主要判别标志是 $\lg(K_2O/Nb)$ 、 $\lg(Ba/Nb)$ 和 $\lg(Cs/Nb)$ 。其中作为分子的元素K、Ba、Cs均为LILE,而作为分母的元素Nb属于HFSE,表明LILE和HFSE的比值关系可能是MORA和IAA之间的主要差异。此外,OIA与其他2类安山岩的主要判别标志为 $\lg(Ga/Cs)$ 、 $\lg(Eu/Pb)$ 和 $\lg(MnO/Pb)$ 。值得一提的是, $\lg(TFeO/Ga)$ 在三者之间的平均值基本相同,但在OIA中的分布范围明显大于MORA和IAA,亦可视为一个有效的判别标志。该结论进一步证明了核密度曲线对比图相较以往的平均值蛛网图具有一定的优势。

为了进一步明确各元素在MORA、OIA和IAA之间的判别作用,本文绘制了单元素(取 \lg 对数值)的核密度曲线对比图(图6)。高场强元素具有IAA \approx MORA<OIA的特征(图6-a,b);大离子亲石元素主要表现为MORA<IAA<OIA(图6-c,d),但也有个别元素存在差异,例如 $\lg(Pb)$ 和 $\lg(Cs)$ 表现为MORA<IAA \approx OIA(图6-e,f),而 $\lg(Eu)$ 表现为MORA \approx IAA<OIA(图6-g);其他元素(如MnO和TFeO)则在三者中差异不明显(图6-h,i)。结果表明,无论是HFSE还是LILE,都在IAA-OIA-MORA判别图解中具有明显的判别作用,且从曲线形态及间距看,被前人避之不及的LILE反而起到了更好的判别效果。由此看来,大数据方法是跨越理论假设获取价值信息的有效途径。

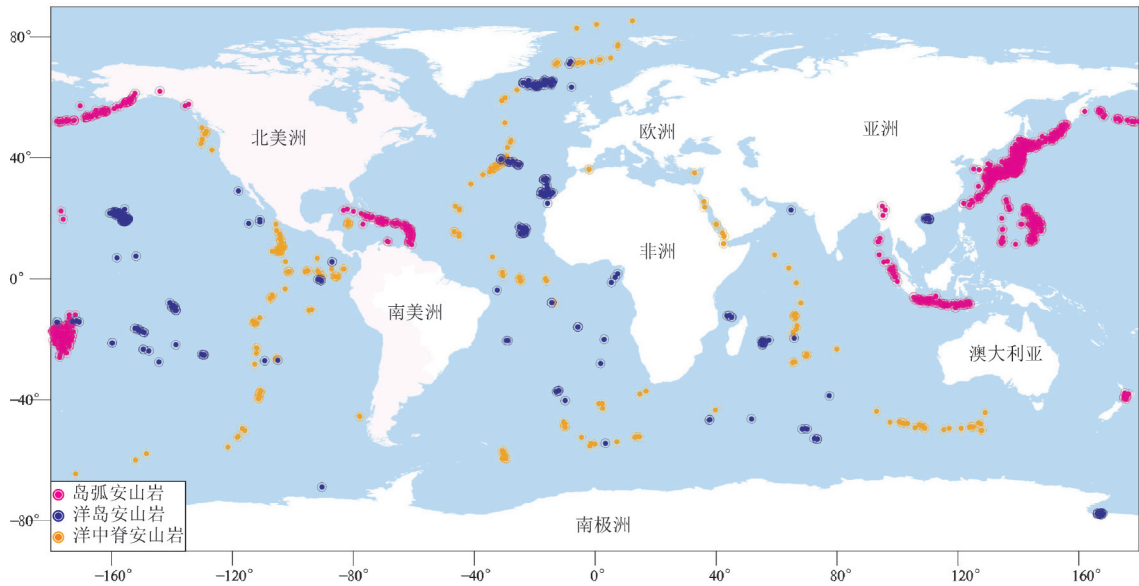


图 3 新生代大洋安山岩全球分布

Fig. 3 Global distribution map of the Cenozoic oceanic andesites

此外,从元素核密度曲线对比图中还能明显看到,OIA 和 MORA 在个别元素中具有双峰/多峰特征(如 Ba、Pb、Cs 等)。笔者推测,该特征可能是地幔

不均一性的体现,而 OIA 和 MORA 在形成过程中受地幔物质来源影响较大,在不同地区可能捕获了不同类型的地幔物质组成,最终体现在岩石地球化学特征中。但是否确定如此,还需结合数据点的经纬度等信息进行更详细的研究和分析。

通常认为,玄武岩是直接通过地幔部分熔融形成的产物,且其物质组成在形成过程中受到的干扰较小,能够代表原始岩浆的成分,可用于指示岩石形成的构造背景。相比之下,安山岩的成因更复杂,前人通过各种研究方法,主要提出 4 种成因模型:①含水地幔楔部分熔融^[28-30];②幔源玄武质岩浆结晶分异^[31];③基性岩浆与酸性岩浆发生混合^[32-34];④地幔橄榄岩与酸性岩浆相互作用^[35]。无论是哪种成因模型,安山岩的地球化学组分都会受到流体、地壳混染等作用过程的改造,因此依照早先的判别图理论,安山岩并不适宜用来判别构造环境。本文从全球数据出发,计算出了几乎没有重叠区域的大洋安山岩构造环境判别图,说明安山岩即使经历了复杂的岩浆作用过程,其中某些化学组分仍然有可能保留由构造环境所决定的专属特性。这是大数据研究给予的重要启示,也是数据驱动模式研究的魅力所在。

需要说明的是,受地球化学分析测试方法

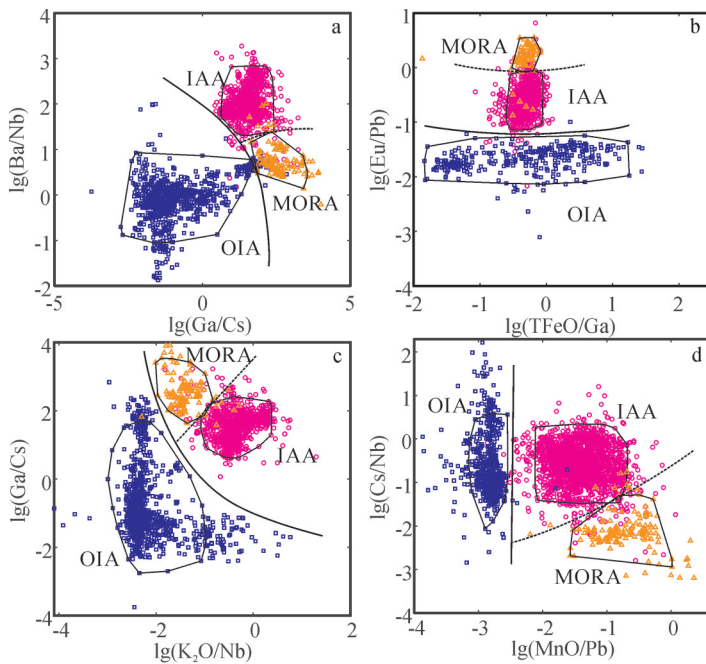


图 4 IAA-OIA-MORA 判别图

Fig. 4 Discriminant diagrams of IAA-OIA-MORA

a—lg(Ga/Cs)-lg(Ba/Nb); b—lg(TFeO/Ga)-lg(Eu/Pb); c—lg(K₂O/Nb)-lg(Ga/Cs); d—lg(MnO/Pb)-lg(Cs/Nb)

MORA—洋中脊安山岩; OIA—洋岛安山岩; IAA—岛弧安山岩

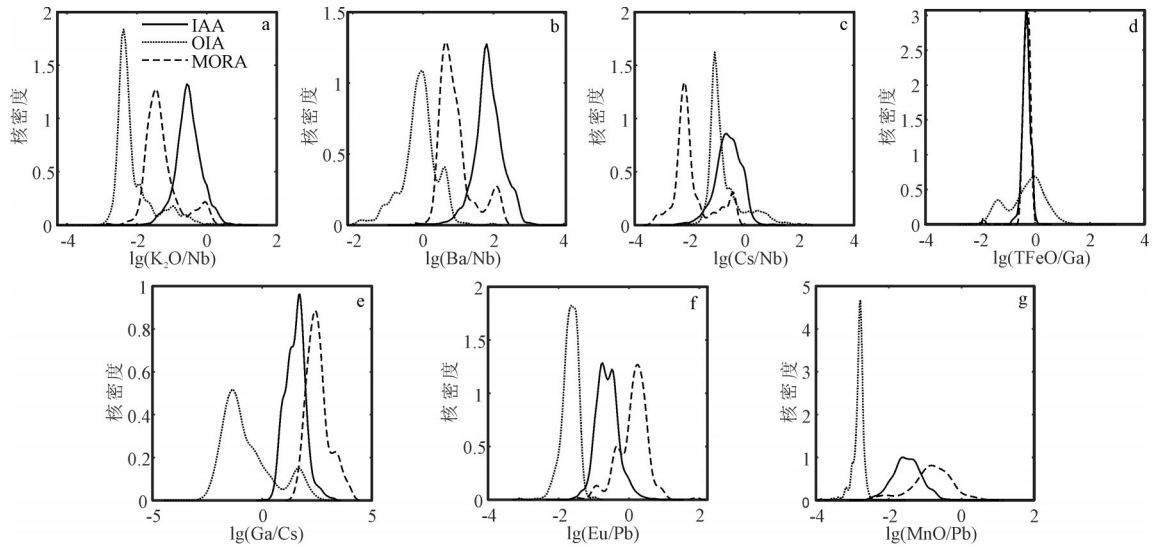


图5 元素比值核密度曲线对比图(代号同图4)
 Fig. 5 Kernel density diagrams of element ratios

及不同研究目的的影响,不同图解中使用的数据量具有较大差异。即使本文已采用大数据模式进行计算,仍难以避免当数据量较小时产生的采样偏差,导致判别图可能具有地域专属性。因此,建议在利用安山岩判别构造环境时,联合使用本套图解,以获取更可靠的判别结果。

4 结论

(1)通过大数据方法建立的 $\lg(\text{Ga}/\text{Cs})-\lg(\text{Ba}/\text{Nb})$ 、 $\lg(\text{TFeO}/\text{Ga})-\lg(\text{Eu}/\text{Pb})$ 、 $\lg(\text{K}_2\text{O}/\text{Nb})-\lg(\text{Ga}/\text{Cs})$ 和 $\lg(\text{MnO}/\text{Pb})-\lg(\text{Cs}/\text{Nb})$ 图解能够有效识别新生代洋

中脊安山岩、洋岛安山岩和岛弧安山岩,说明大洋安山岩的构造属性能使用全岩的某些元素比值进行有效识别。

(2)各元素比值的核密度曲线对比图分析结果表明,LILE与HFSE的比值关系能有效区分MORA和IAA;LILE与其他元素的比值关系则更有利于从三者中识别出OIA。单元素分析结果表明,活动性较强的大离子亲石元素也能保留大洋安山岩的构造环境信息,并在一定程度上比稳定的高场强元素具有更强的判别作用。

(3)尽管安山岩的成因比玄武岩复杂,但大数

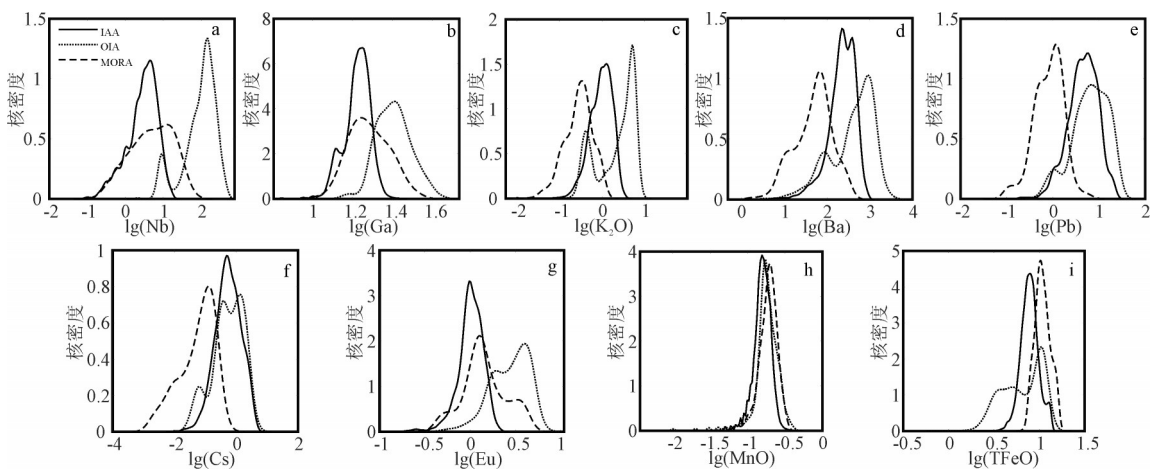


图6 元素核密度曲线对比图(代号同图4)
 Fig. 6 Kernel density diagrams of elements

据方法仍然能从纷繁的数据中提取出具有构造指示意义的有效判别标志,为今后的研究提供了新的思路。

致谢:天津大学水利系韩帅博士为本文使用的交叠率方法提供了重要思路,审稿专家提出了详尽的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]赵振华.关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J].大地构造与成矿学,2007,31(1):92-103.
- [2]Pearce J A, Cann J R. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1971, 12(3): 339-349.
- [3]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1973, 19(2): 290-300.
- [4]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [5]李曙光.蛇绿岩生成构造环境的Ba-Th-Nb-La判别图[J].岩石学报,1993,(2):146-157.
- [6]Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1983, 62(1): 53-62.
- [7]Byers C D, Muenow D W, Garcia M O. Volatiles in basalts and andesites from the Galapagos Spreading Center, 85° to 86° W[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1983, 47(9): 1551-1558.
- [8]Byerly G R, Melson W G, Vogt P R. Rhyodacites, andesites, ferro-basalts and ocean tholeiites from the galapagos spreading center[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1976, 30(2): 215-221.
- [9]Gill J B. Organic Andesites and Plate Tectonics[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1981: 1-314.
- [10]Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. Chemical Geology, 1981, 32: 139-154.
- [11]Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. Lithos, 1989, 23(1): 1-18.
- [12]Condie K C. Geochemistry and Tectonic Setting of Early Proterozoic Supracrustal Rocks in the Southwestern United States[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(6): 845-864.
- [13]Verma S P, Verma S K. First 15 probability-based multidimensional tectonic discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against post emplacement compositional changes and petrogenetic processes[J]. Turkish Journal of Earth Sciences, 2013, 22: 931-995.
- [14]Williamson B J, Hodgkinson M, Imai A, et al. Testing the Plagioclase Discriminator on the GEOROC Database to Identify Porphyry-Fertile Magmatic Systems in Japan[J]. Resource Geology, 2018, 126(2): 1-6.
- [15]Nielsen S G, Marschall H R. Geochemical evidence for mélange melting in global arcs[J]. Science Advances, 2017, 3(e16024024): 1-7.
- [16]Chapman J B, Ducea M N, Decelles P G, et al. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera[J]. Geology, 2015, 43(10): 919-922.
- [17]White W M. Oceanic Island Basalts and Mantle Plumes: The Geochemical Perspective[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2010, 38(38): 133-160.
- [18]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.
- [19]王金荣,陈万峰,张旗,等.N-MORB和E-MORB数据挖掘——玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论[J].岩石学报,2017,(3):993-1005.
- [20]张旗,袁方林,焦守涛,等.雷达图在地球科学研究中的应用及其意义[J].科学通报,2017,(1):79-89.
- [21]刘欣雨,张旗,张成立,等.中新世全球重要事件及其意义:数据挖掘的启示[J].科学通报,2017,(15):1645-1654.
- [22]王文松.测量列中离群值的判断[J].电测与仪表,1992,(11):5-10.
- [23]Vermeesch P. Tectonic discrimination diagrams revisited[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7(6): 1-55.
- [24]Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, et al. The Oman Ophiolite as a Cretaceous Arc-Basin Complex: Evidence and Implications[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1981, (1454): 299-317.
- [25]李存华,孙志挥,陈耿,等.核密度估计及其在聚类算法构造中的应用[J].计算机研究与发展,2004,41(10):1712-1719.
- [26]Condie K C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2003, 4(1): 1-28.
- [27]朱弟成,廖忠礼,潘桂棠,等.正确使用构造判别图解和地球化学数据的一些建议[J].地球与环境,2001,29(3):152-157.
- [28]Kelemen P B. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1995, 120(1): 1-19.
- [29]唐功建,王强.高镁安山岩及其地球动力学意义[J].岩石学报,2010,(8):2495-2512.
- [30]Straub S M, Gomez-Tuena A, Stuart F M, et al. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011, 303(34): 337-347.
- [31]Annen C, Sparks R S J. Effects of repetitive emplacement of basaltic intrusions on thermal evolution and melt generation in the crust[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2002, 203(3): 937-955.
- [32]Zhu M S, Miao L C, Yang S H. Genesis and evolution of subduction-zone andesites:evidence from melt inclusions[J]. International Geology Review, 2013, 55(10): 1179-1190.

[33]Depaolo D J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1981, 53(2): 189-202.

[34]Beier C, Haase K M, Brandl P A, et al. Primitive andesites from the Taupo Volcanic Zone formed by magma mixing[J]. Contributions

to Mineralogy & Petrology, 2017, 172(5): 33.

[35]Streck M J, Leeman W P, Chesley J. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt[J]. Geology, 2007, 35(1): 351-354.

《地质通报》第39卷第1期要目预告

开启区块链地质应用新时代	周永章等
新疆东准噶尔地区老君庙岩群时代厘定、原岩恢复及对基底指示意义	杨 硕等
西太平洋维嘉平顶山沉积特征及富钴结壳资源意义	赵 斌等
小兴安岭南部长乐组二长花岗岩形成时代、地球化学特征及地质意义	尹志刚等
华北板块北缘勃隆克A型花岗岩锆石U-Pb定年及其地质意义	李春麟等
内蒙古阿尔塔拉中三叠世A型花岗岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及构造意义	王金芳等
相山矿田北部产铀花岗斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及成因类型研究	王利玲等
资源环境承载协调理论与评价方法	李瑞敏等
基于双曲距离协调度模型的地下水资源与经济承载协调关系分析	王 轶等
河北省地质资源环境承载能力评价方法	王欣宝等
安徽省地质环境承载能力试评价	魏 路等
基于DEA模型的矿产资源承载能力评价——以湖南省资源型县为例	项广鑫等
乌蒙山毕节市七星关区资源环境承载能力评价探索	陈 武等
西南岩溶山区地下水资源承载能力评价研究——以贵州省七星关区为例	唐佐其等
宜兴市地质资源环境承载能力评价	张 丽等
基于国土空间自然适宜性的三类空间划分方法——以湖南省为例	曾 毅等