

花岗岩命名、分类及大地构造背景的岩石化学解读： 以Q'-ANOR图解为例

孙明明, 汪洋*

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 花岗岩是大陆地壳中最常见的长英质侵入岩。Q'-ANOR图解被广泛应用于长英质侵入岩的分类命名, 而该图解判别结果的准确性却很少受到关注。本文以全球1952组同时包含主量元素和造岩矿物含量的数据集为基础, 将Q'-ANOR图解的判别结果与实际矿物含量QAP图解的定名结果进行比较, 发现仅有55%的样本能够被“正确”地分类。进一步的研究表明, Q'-ANOR图解可以很好地区分富斜长石长英质侵入岩类与富碱性长石长英质侵入岩类。具有不同矿物学与岩石化学特征的花岗岩套在Q'-ANOR图上的投影呈现出不同的空间展布趋势; 其轨迹指示钙质和钙碱质花岗岩类在Q'-ANOR图解中的演化趋势受石英-长石共结关系的制约, 而碱质和碱钙质花岗岩类则表现为前期受斜长石-碱性长石共结制约、后期受石英-长石共结制约的演化趋势。来自不同构造环境的花岗岩类组合在Q'-ANOR图解中的投影图像明显可分, 因此Q'-ANOR图解可以作为辨别花岗岩套构造-岩浆特征的工具。

关键词: 花岗岩分类; Q'-ANOR图解; 岩石成因; 构造-岩浆特征

中图分类号: P581; P583; P588 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240138

The nomenclature and classification of granitoids and the petrochemical interpretation of geotectonic settings of granitoids: A case study of the Q'-ANOR diagram

SUN Ming-ming, WANG Yang*

School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Granitoids are the most common felsic intrusive rocks occurred in the continental crust. The Q'-ANOR diagram is widely used in the classification and nomenclature of felsic intrusive rocks. However, little attention has been paid to the accuracy of the classification of rocks by using the Q'-ANOR diagram. In this study, based on a global dataset of 1952 pairs of major element contents and actual mineral modals of felsic intrusive rocks, we have compared the discriminant results of the Q'-ANOR diagram with those of the modal QAP classification diagram of actual mineral contents, and have found that only 55% of samples from the dataset can be “correctly” classified by using the Q'-ANOR diagram. However, the further examinations show that the Q'-ANOR diagram can be used to successfully distinguish the alkali-feldspar-rich felsic intrusive rocks from the plagioclase-rich ones. The projections of different granitoid groups that are defined by their petrochemical and mineralogical features display distinguished distribution patterns in the Q'-ANOR diagram. The trajectories of granitoids reveal that the calcic and the calc-alkalic granitoids in the Q'-ANOR diagram changed their compositions along the cotectic crystallization line of quartz and feldspars during the whole path, but the alkali and the alkali-calcic granitoids changed their compositions along the cotectic crystallization path of alkali-feldspar and plagioclase in the early stage and along the cotectic crystallization path of quartz-feldspars in the late stage.

收稿编号: 2024-0107, 2024-06-04 收到, 2024-11-19 改回

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(D1912)

第一作者简介: 孙明明(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩石学. email: 1743191535@qq.com

*通信作者简介: 汪洋(1969—), 男, 博士, 研究方向: 岩石学. email: allen_thalassa@sina.com

引用此文:

孙明明, 汪洋. 2025. 花岗岩命名、分类及大地构造背景的岩石化学解读: 以Q'-ANOR图解为例. 矿物岩石地球化学通报,

doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240138

Sun M M, Wang Y. 2025. The nomenclature and classification of granitoids and the petrochemical interpretation of geotectonic settings of granitoids: A case study of the Q'-ANOR diagram. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240138

Furthermore, the projection points of granitoids from different tectonic environments in the Q'-ANOR diagram are clearly distinguishable, so the Q'-ANOR diagram can be used as a tool for discriminating the tectono-magmatic characteristics of granitoid suites.

Key words: classification of granitoids; the Q'-ANOR diagram; petrogenesis; tectono-magmatic characteristics

0 引言

花岗岩类是大陆地壳中最常见的侵入岩,许多金属矿床的形成都与花岗质岩浆活动密切相关(Philpotts and Ague, 2009, 2022; Nédélec and Bouchez, 2015)。虽然花岗岩类的主要造岩矿物组成相对简单,但其矿物学和岩石地球化学特征却表现出多样性,这导致对花岗岩类的分类命名、类型/系列划分、成因存在较多争议(Frost et al., 2019; Glazner et al., 2019; Hogan, 2019; Bonin et al., 2020; 张旗和原杰, 2024)。随着分析技术的发展,花岗岩类微量元素和同位素数据有大量发表,然而主量元素作为可以反映主要造岩矿物实际矿物百分含量的关键化学成分,对花岗岩研究的重要性仍旧没有减少(Bonin et al., 2020; Janoušek and Moyen, 2020)。主量元素是众多侵入岩岩石化学分类命名图解的基础,如:O'Connor(1965)的钙长石-钠长石-钾长石标准矿物图解(简称An-Ab-Or图解),Cox等(1979)的侵入岩 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)图解(硅-全碱图解,即TAS图解),Debon和Le Fort(1983, 1988)的石英阳离子-斜长石阳离子图解(简称Q-P图解),Enrique(2018)的石英-钾长石-钠长石-钙长石标准矿物图解[简称2Q-(Or+Ab)-4An图解],Enrique和Esteve(2019)的 SiO_2 -CaO/($\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}$)图解等。主量元素被广泛应用于划分花岗岩类型/组合,其典型代表包括Barbarin(1999)的花岗岩类矿物-化学分类、Frost等(2001)的花岗岩分类等。主量元素为花岗岩类成因研究提供了重要依据(Jacob et al., 2021; Moyen et al., 2021),也是构建岩浆岩大地构造环境判别图解的重要参数(Verma, 2020a, 2020b)。Streckeisen和Le Maitre(1979)发表的石英-斜长石标准矿物图解(简称Q'-ANOR图解)作为深成侵入岩石英-碱性长石-斜长石分类命名图(简称QAP; Streckeisen, 1976; Le Maitre, 2002)的替代工具而被广泛应用,但很少有人检验其定名结果与实际矿物含量QAP定名的一致性。本文采用全球不同地区的1952组主量元素与实际造岩矿物含量数据(附表1)对其定名结果进行检验,对Q'-ANOR图解在花岗岩类型划分、成因分析和大地构造背景判别方面的应用进行了回顾和总结,以求拓展花岗岩研究中主量元素岩石化学方法的深度和广度。

1 为什么火成岩岩石学研究仍然需要“标准矿物”?

Cross等(1902)研究火成岩岩石分类时将火成岩主量元素氧化物含量按照一定的顺序和规律结合成若干理想成分的“标准矿物”组合。火成岩的“标准矿物”与其所含实际矿物有差别,但是把“标准矿物”作为一个统一的对比标准来研究火成岩问题非常有用,CIPW标准矿物是目前应用最为广泛的“标准矿物”计算方法(Cox et al., 1979; Streckeisen and Le Maitre, 1979; 邱家骧和林景仟, 1991; Rollinson, 1993; Young, 2003, 2008; Philpotts and Ague, 2009; Rollinson and Pease, 2021; Buckle et al., 2023)。CIPW标准矿物被用于火成岩分类(Streckeisen and Le Maitre, 1979; Enrique, 2018)、描述实验岩石学结果(Tuttle and Bowen, 1958; Morse, 2024)、探讨花岗岩类的成因演化(Sun and Wang, 2024)。现代岩石学研究者如此评价CIPW标准矿物的成功:“It is a credit to Cross, Iddings, Pirsson, and Washington for their skills as petrographers that the norm calculation has stood the test of time and gives results that are similar to those now obtained using thermodynamic principles.”(Philpotts and Ague, 2009)。

造岩矿物是火成岩的基本组成单元,其组成和含量是火成岩(尤其是侵入岩)分类命名的基础,这一认识已牢牢扎根于百年来火成岩的研究历史之中(Johannsen, 1939; Streckeisen, 1976; Le Maitre, 2002; Young, 2003, 2008; Le Bas, 2006; Philpotts and Ague, 2009, 2022; Frost et al., 2019; Glazner et al., 2019; Hogan, 2019)。Bonin等(2020)对花岗岩类主量元素成分的线性判别分析(linear discrimination analysis, LDA)表明,刻画花岗岩类主量元素成分特征的线性判别因子 LD_1 的贡献比例为53.6%,其中 SiO_2 、 TFeO 、 Na_2O 和 K_2O 是决定 LD_1 因子的主要氧化物; LD_2 的贡献比例为32.6%,其中 Al_2O_3 和 Na_2O 是决定 LD_2 因子的主要氧化物; LD_3 的贡献比例为9.8%, CaO 是决定 LD_3 因子的主要氧化物。显然石英、碱性长石和斜长石是决定花岗岩类主量元素特征的最主要造岩矿物。所以,作为长英质侵入岩分类命名的“标准”,国际地科联(IUGS)推荐的QAP分类命名方案已被业界广为接

受(Bonin et al., 2020)。

准确的QAP定名需要定量统计岩石样品的实际造岩矿物含量,十分耗费时间,近年来科研文献中报道的侵入岩实际矿物含量多为半定量结果。侵入岩矿物镜下图像人工智能识别模型的特征训练对图像的数据标签有极强的依赖性,并且数据标签人工标定过程受主观因素影响大(王名越等,2024)。基于标准矿物的花岗岩类分类命名图解可以避免繁琐的造岩矿物含量定量统计,被认为是实际矿物含量QAP定名的替代性工具(Streckeisen and Le Maitre, 1979; Enrique and Esteve, 2019)。Q'-ANOR图解采用标准矿物含量对长英质侵入岩进行分类命名,图解的横坐标轴 $AN-OR=100\times An/(Or+An)$,纵坐标轴 $Q'=100\times Qz/(Qz+Or+Ab+An)$,其岩性划分和命名与QAP分类一致。超镁铁质侵入岩等不适用于QAP分类命名的火成岩也不适用于Q'-ANOR图解(Le Maitre, 2002)。Q'-ANOR图解所涉及的Q(石英)、Or(钾长石)、Ab(钠长石)、An(钙长石)标准矿物包含的氧化物是SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O和CaO,是花岗岩类主量元素成分LDA的LD₁、LD₂和LD₃因子的主要贡献者,因此不需要对本文涉及的数据做降维处理。

关于CIPW标准矿物的内容在近年来的国内岩石学专业教材中多有缺失(汪洋, 2007),而国外火成岩石学专业教材保有相关内容(如:Philpotts and Ague, 2009, 2022),所以部分国内学者对岩石样品成分点投影于Q'-ANOR图坐标轴上(出现“0”值)感到不解。这种现象是由于CIPW计算流程中最后计算石英标准矿物,若流程前面步骤中氧化物SiO₂已被用于其它标准矿物分子的计算而“消耗”殆尽,则样品的石英标准矿物分子Q含量为零。同理,长石类标准矿物的计算顺序仅排在石英之前,前面的步骤中氧化物CaO已被用于其它标准矿物分子的计算而“消耗”殆尽,则样品的钙长石标准矿物分子An含量为零(Cross et al., 1902; 邱家骧和林景仟, 1991; Philpotts and Ague, 2009, 2022)。石英标准矿物Q含量为零的样品表明其岩石化学成分属于硅饱和和类型,标准矿物Q含量大于零的样品,其岩石化学成分属于硅过饱和和类型;钙长石标准矿物An含量为零的样品表明其富含碱性长石而斜长石含量极低(Cross et al., 1902; 邱家骧和林景仟, 1991)。所以,投影在Q'-ANOR图坐标轴上的“0”值数据具有岩石学意义,而非异常值。

Sun和Wang(2024)将基于标准矿物的2Q-(Or+Ab)-4An图解应用于花岗岩类分类命名和成因解释方面的问题。对于同样基于标准矿物的Q'-ANOR图解是否能够较为准确地对花岗岩类进行分类命名,仍然存在不同认

识(Rollinson, 1993; 邓晋福等, 2015b; 张金朋和汪洋, 2024)。本文将依次论述:(1)以QAP定量矿物含量定名为基准,检验Q'-ANOR图解识别岩性的准确度;(2)将Bonin等(2020)归纳的6个花岗岩类组合的数据集合投影在Q'-ANOR图解中,讨论Q'-ANOR图解中各类花岗岩套成分点投影的岩石成因意义;(3)将产出于典型构造背景的若干花岗岩套数据投影在Q'-ANOR图解中,探讨应用Q'-ANOR图解中花岗岩套成分点投影类型推断其形成的大地构造背景的可行性。

2 Q'-ANOR图解岩性识别准确度检验

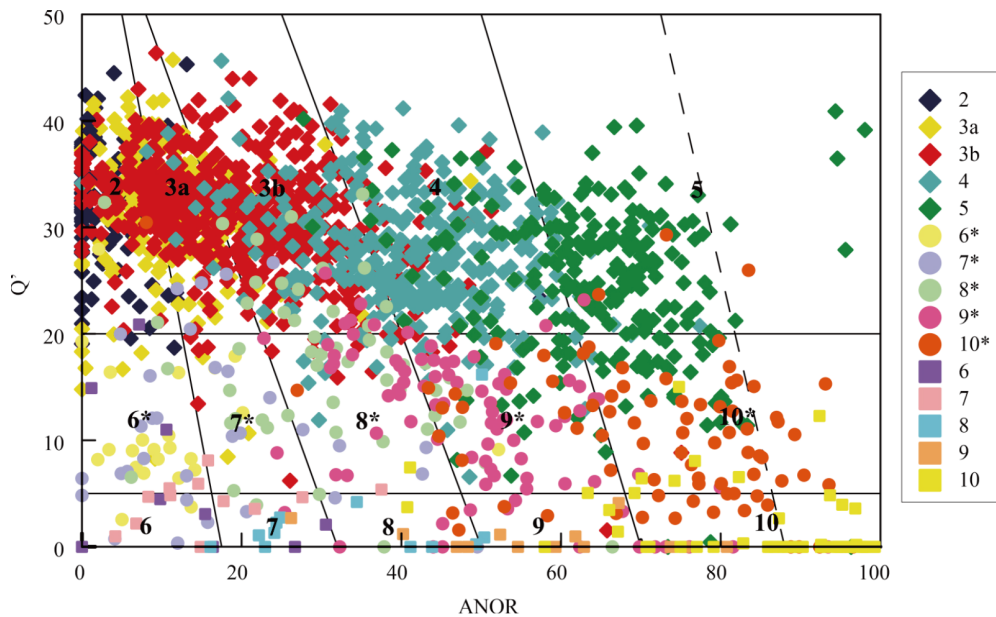
本文通过系统汇编全球不同地区同时报道有主量元素和造岩矿物含量定量分析结果的1952组数据(附表1),对Q'-ANOR图解定名相当于实际矿物含量QAP定名的可信度进行检验。需要注意的是,许多文献报道的岩石实际矿物目估含量不是定量统计结果,不能用于检验Q'-ANOR图解。本文应用SINCLAS软件(Verma et al., 2002)进行CIPW标准矿物含量计算,二价铁和三价铁氧化物含量依据Middlemost(1989)的建议调整。结果投影在Q'-ANOR图解中(图1),图中样品点的颜色代表按其实际矿物含量在QAP图中投影所确定的岩性。

对投影结果进行统计显示,有1059个样本在Q'-ANOR图解的岩性归属与实际矿物含量QAP分类结果一致,正确率约54.5%。分区统计结果(表1只统计样本数量大于50的各岩区识别正确率,下同)显示,除碱长花岗岩和闪长岩而外,Q'-ANOR图解对其它岩性的识别正确率在30%~60%之间,多数为50%~60%。狭义花岗岩(即QAP的3区)不细分为正长花岗岩(3a区)和二长花岗岩(3b区)时,Q'-ANOR图解的识别正确率为69%。

表1 长英质侵入岩Q'-ANOR图解岩性识别正确率
Table 1 The success rates of the Q'-ANOR diagram for identification of felsic intrusive rocks

QAP分区	样本数量	Q'-ANOR图解正确判别数	正确率
2	116	100	86.21%
3a	200	85	42.50%
3b	600	301	50.17%
3(3a+3b)	800	552	69.00%
4	399	246	61.65%
5	245	143	58.37%
8*	53	16	30.19%
9*	90	44	48.89%
10*	82	45	54.88%
10	52	40	76.92%

注:QAP分区数字所代表岩性见图1图注。



2—碱长花岗岩;3a—正长花岗岩;3b—二长花岗岩;4—花岗闪长岩;5—英云闪长岩;6—碱长正长岩;6*—石英碱长正长岩;7—正长岩;7*—石英正长岩;8—二长岩;8*—石英二长岩;9—二长闪长岩;9*—石英二长闪长岩;10—闪长岩/辉长岩;10*—石英闪长岩/石英辉长岩。
图中右倾粗斜线代表富斜长石侵入岩类(右侧)与富碱性长石侵入岩类(左侧)的岩性界线

图1 汇编的长英质侵入岩成分数据在Q'-ANOR图解上的投影(底图据Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig. 1 The projections of compiled compositional data of felsic intrusive rocks in the Q'-ANOR diagram (base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

为更深入分析Q'-ANOR图解复现QAP分类正确率偏低的原因,我们对Q'-ANOR图解在区分样品的石英相对含量、碱性长石与斜长石相对比例的识别精度分别进行了检验(表2)。检验石英相对含量判别精度的步骤是:将QAP定义的特定岩类样品落在Q'-ANOR图解相同岩区及其水平方向的相邻岩区视为判别“正确”,即QAP厘定的碱长花岗岩(2区)样品在Q'-ANOR图解中落入2区和3a区都视为“正确”,QAP厘定的正长花岗岩(3a区)样品在Q'-ANOR图解中落入3a、3b和2区都视为“正确”,其余类推。

检验碱性长石与斜长石相对比例判别精度的步骤是:将QAP定义的特定岩类样品落在Q'-ANOR图解相同岩区及其垂向方向的相邻岩区视为判别“正确”,即QAP厘定的正长花岗岩(3a区)样品在Q'-ANOR图解中落入3a区和7*区都视为“正确”,QAP厘定的石英正长岩(7*区)样品在Q'-ANOR图解中落入7*区、7区和3a区都视为“正确”,QAP厘定的正长岩(7区)样品在Q'-ANOR图解中落入7区和7*区都视为“正确”;其余类推(表3)。

对比表2和表3可知,Q'-ANOR图解对样品石英相对含量的识别准确程度明显优于其对碱性长石与斜长石相对比例的识别,意味着Q'-ANOR图解无法准确复现QAP图解的碱性长石与斜长石相对比例分区结果。如

表2 Q'-ANOR图解对于石英相对比例的识别正确率

Table 2 The success rates of the Q'-ANOR diagram for discriminating the quartz proportions of felsic intrusive rocks

rocks				
QAP分区	Q'-ANOR分区	总个数	一致个数	百分比
2	2, 3a	116	110	94.83%
3a	2, 3a, 3b	200	190	95.00%
3b	3a, 3b, 4	600	478	79.67%
3	2, 3a, 3b, 4	800	773	96.63%
4	3b, 4, 5	399	355	88.97%
5	4, 5	245	184	75.10%
8*	7*, 8*, 9*	53	32	60.38%
9*	8*, 9*, 10*	90	64	71.11%
10*	9*, 10*	82	59	71.95%
10	9, 10	52	43	82.69%

果将富斜长石长英质侵入岩(英云闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长闪长岩、闪长岩、二长闪长岩,即4、5、9*、10*、9、10区)归为一类,富碱性长石长英质侵入岩(碱长花岗岩、正长花岗岩和二长花岗岩、石英正长岩、石英二长岩、正长岩、二长岩等,即2、3、6*、7*、8*、6、7、8区)归为另一类,则Q'-ANOR图解的识别正确率达80%~90%(表4)。这表明Q'-ANOR图解可以很好地区分富斜长石长英质侵入岩类与富碱性长石长英质侵入岩类。

表3 Q'-ANOR图解对于碱性长石与斜长石相对比例的识别正确率

Table 3 The success rates of the Q'-ANOR diagram for discriminating the ratios of alkali feldspar and plagioclase of felsic intrusive rocks

QAP分区	Q'-ANOR分区	总个数	一致个数	百分比
2	2,6*	116	103	88.79%
3a	3a,7*	200	88	44.00%
3b	3b,8*	600	310	51.67%
3	3a,3b,7*,8*	800	567	70.88%
4	4,9*	399	270	67.67%
5	5,10*	245	176	71.84%
8*	3b,8*,8	53	29	54.72%
9*	4,9*,9	90	52	57.78%
10*	5,10*,10	82	60	73.17%
10	10*,10	52	46	88.46%

表4 Q'-ANOR图解对富斜长石长英质侵入岩类与富碱性长石长英质侵入岩类的识别正确率

Table 4 The success rates of the Q'-ANOR diagram for discriminating the alkali-feldspar-rich felsic intrusive rocks from the plagioclase-rich ones

岩类	QAP分区	Q'-ANOR分区	总个数	一致个数	百分比
富碱性长石长英质侵入岩	2,3,6*,7*,8*,6,7,8	2,3,6*,7*,8*,6,7,8	1058	1001	94.61%
富斜长石长英质侵入岩	4,5,9*,10*,9,10	4,5,9*,10*,9,10	882	727	82.43%

自然界中的各类岩石之间是过渡的,分类图解中的岩类分界是人为划定的(Williams et al.,1954)。有的岩石化学图解将石英相对含量大于10%的样品都归为(广义)花岗岩类[如O'Connor(1965)的An-Ab-Or分类图],所以我们将汇编数据中富石英($Q'>10$)样品依据其碱性长石与斜长石相对比例进行识别。此时Q'-ANOR图解的正确率为67%~87%(表5)。

综上所述,长英质侵入岩样品在Q'-ANOR图解的投影不能精细地复现实际矿物含量QAP分类的结果,但可以很好地将富石英样品识别出来,也可以很好地区分富斜长石长英质侵入岩类与富碱性长石长英质侵入岩

表5 富石英 ($Q'>10$) 样品的Q'-ANOR图解识别正确率

Table 5 The success rates of the Q'-ANOR diagram for discriminating the quartz-rich ($Q'>10$) samples

QAP分区	Q'-ANOR分区	总个数	一致个数	百分比
2/6*	2,6*	125	109	87.20%
3/7*/8*	3,7*,8*	856	612	71.50%
4/9*	4,9*	456	304	66.67%
5/10*	5,10*	285	207	72.63%

类。因此,Q'-ANOR图解虽不适合作为长英质侵入岩的命名依据,但可用于展示花岗质岩套/组合/系列内部的岩石化学成分变化趋势,为揭示其成因提供重要线索。

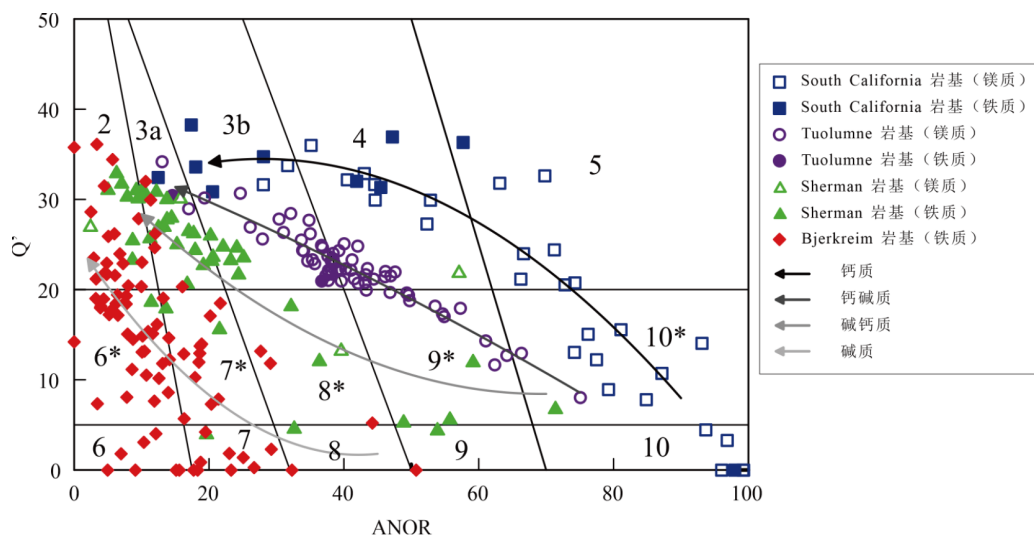
3 应用Q'-ANOR图解揭示不同花岗岩类的成因信息

虽然QAP分类为花岗岩类提供了一个客观的命名方案,在实际工作中人们往往更关注由不同岩性组成的侵入岩岩套的岩石、矿物及地球化学组成所体现的岩石组合/系列/类型特征,进而探究其成因。国际花岗岩研究的主流认识已从早期的S-I-M-A分类转为采用更加依据客观指标的花岗岩类型分类,如:Frost等(2001)基于铁镁比例(Fe^*)、修正碱钙指数(MALI)和铝饱和度(ASI)的分类方案,Barbarin(1999)的矿物-化学分类(Frost and Frost,2014;Nédélec and Bouchez,2015;Bonin et al.,2020)。将Frost等(2001)厘定的典型碱质、碱钙质、钙碱质和钙质系列演化趋势投影在Q'-ANOR图解中可以更清晰地展示不同花岗岩类组合/系列/类型的主量元素演化趋势(图2)。

在Q'-ANOR图中,钙质South California岩套和钙碱质Tuolumne岩基呈现出从闪长岩/辉长岩端元向狭义花岗岩端元的演化趋势。碱钙质Sherman岩基和碱质Bjerkeim-Sokndal岩基投影点则表现为先平行ANOR边而后再向狭义花岗岩端元演化的趋势。这表明碱钙质、碱质系列的花岗岩类与钙质、钙碱质系列的演化路径不同。

根据人造花岗闪长岩(haplogranodiorite)体系An-Ab-Or-Q四面体(图3),贫Si富Ca的原始岩浆(成分投影点接近An端点)向Q-An-Ab-Or共结面(e1-e2-e3)演化;到达共结面后,岩浆的成分进一步沿共结面向Ab-Or-Q切面(即简并花岗岩haplogranite)的最低点或共结点演化(Sun and Wang,2024)。在此演化路径中,演化岩浆的成分受制于共结的石英和长石矿物,在Q'-ANOR图解中表现为闪长岩/辉长岩-花岗岩变化趋势。与之相反,贫Si和Ca的原始熔体则首先通过Or或Ab的结晶向共晶表面e4-E2-E1-e5演化,然后残余熔体沿着平面趋向石英-长石共结面,到达共结面之后熔体沿E2-E1共结线向Ab-Or-Q切面的最低点或共结点演化。在此演化路径中,熔体成分的演化先受制于共结的斜长石和碱性长石的分离结晶,在下一阶段受制于共结的石英和长石的分离结晶,在Q'-ANOR图解中表现为第一阶段平行(反映长石组成变化的)ANOR轴,第二阶段才表现出沿Q'轴的垂向Le趋势。

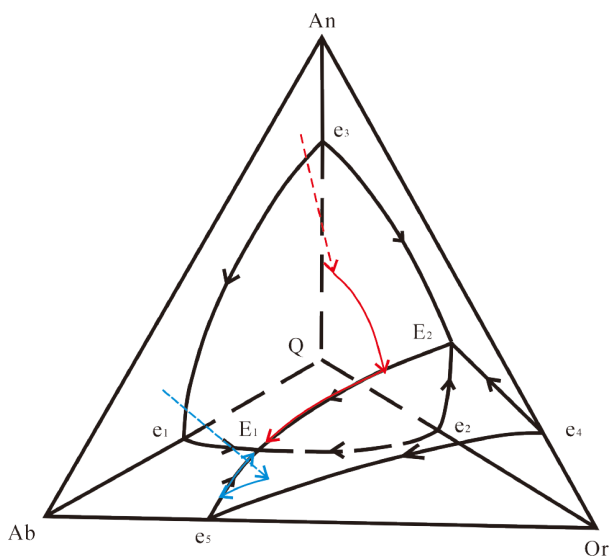
Bonin等(2020)在Barbarin(1999)矿物-化学分类方案基础上将花岗岩类分为六大类型:(1)富含角闪石



数据来源：钙质(Southern California岩套,据Larsen,1948);钙碱质(Tuolumne岩基,据Bateman et al.,1988);碱钙质(Sherman岩套,据Frost et al.,1999);碱质(Bjerkeim-Sokndal岩基,据Duchesne and Wilmart,1997)。相应的趋势线方程为,钙质(C): $Q'=29.126+0.384\times(ANOR)-0.007\times(ANOR)^2$;钙碱质(C-A): $Q'=35.973-0.292\times(ANOR)-0.001\times(ANOR)^2$;碱钙质(A-C): $Q'=35.617-0.784\times(ANOR)+0.006\times(ANOR)^2$;碱质(A): $Q'=25.649-1.136\times(ANOR)+0.013\times(ANOR)^2$, $ANOR<45$

图2 典型的钙质、钙碱质、碱钙质、碱质花岗岩套的Q'-ANOR投影及趋势线(底图据Streckeisen and Le Maitre,1979)

Fig. 2 The projections of four typical calcic, calc-alkalic, alkali-calcic, and alkalic granite suites and their variation trend curves in the Q'-ANOR diagram (base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)



红色折线表示钙质、钙碱质熔体演化路径,蓝色折线表示碱质、碱钙质熔体演化路径

图3 饱和水的人造花岗闪长岩体系示意性相图(据Luth, 1976修改)

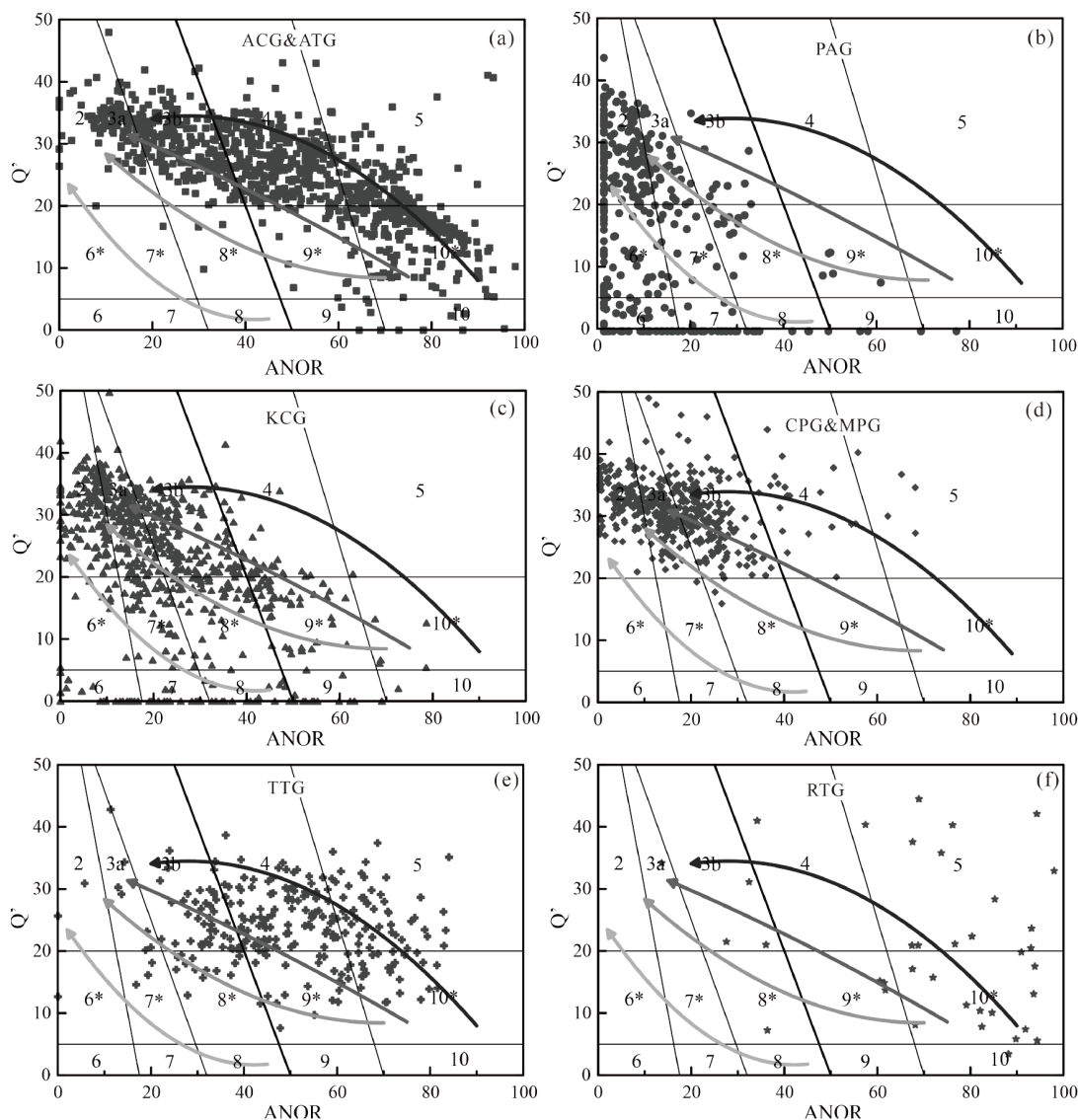
Fig.3 Schematic phase diagram of the haplogranodiorite—H₂O system (modified from Luth 1976)

的钙碱性花岗岩和岛弧拉斑玄武质花岗岩(ACG和ATG);(2)过碱性和碱性花岗岩类(PAG);(3)含堇青石和富黑云母的过铝质花岗岩类、含白云母过铝质花岗岩类及碰撞后碰撞强过铝花岗岩(CPG和MPG);(4)富钾钙碱性花岗岩类(KCG);(5)太古代英云闪长

岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩(TTG);(6)大洋中脊拉斑玄武质花岗岩(RTG)。

在Q'-ANOR图解中,这些花岗岩类型的成分点显示出不同的分布模式(图4)。ACG和ATG与PAG代表了花岗岩类的两种端元演化趋势(图4a,4b):ACG和ATG显示出略向上凸起的钙质、钙碱质趋势,PAG整体沿碱性趋势线走向呈下凹形分布,其中投影在Q'=0的横坐标或ANOR=0的纵坐标上成分点,表明这些样品属于硅饱和(Q'=0)的长英质岩石,或钙长石含量极低(ANOR=0)的硅过饱和(Q'>0)高演化长英质岩石。KCG主要分散在钙碱质、碱钙质、碱质趋势线之间,投影点多数属于碱长花岗岩和狭义花岗岩(即正长花岗岩和二长花岗岩)(图4c)。过铝质的CPG和MPG样品点绝大多数投影在碱长花岗岩和狭义花岗岩区域,落在富斜长石的英云闪长岩和花岗闪长岩区域的很少见,与KCG相比缺失具有碱质趋势的成分点(图4d)。TTG和RTG投影点的分布趋势与ACG和ATG具有相似之处,但TTG和RTG落入狭义花岗岩区域的样品点要少得多(图4e,4f)。邓晋福等(2015a,2017,2018)将TTG组合与弧岩浆组合混淆起来的认识是不恰当的(详见张金朋和汪洋,2024)。

结合前文基于图3的讨论,我们认为ATG和ACG类型通过钙质、钙碱质演化路径形成,PAG通过碱钙质、碱质演化路径形成,原始幔源岩浆的分离结晶主导了两者的形成过程(Bonin,2020;Castro,2020;Moyen



数据来源于Bonin 等(2020)

图4 不同花岗岩类型在Q'-ANOR图解上的投影(底图据Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig. 4 The projections of six granitoid groups in the Q'-ANOR diagrams (base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

et al., 2021)。CPG和MPG的主量元素特征表明其主要源于富钾质陆壳源岩的部分熔融,而非偏镁铁质的原始岩浆结晶演化的产物。KCG则是一个混合的花岗岩类型,包括来自不同源岩与演化路径的花岗岩类,主体可被归入Castro(2020)划分的第二类I型花岗岩。与CPG和MPG不同,TTG和RTG的源岩贫钾,熔体演化路径由An-Ab-Q三元系近似,其终点不是简并花岗岩体系的Or-Ab-Q共结点,而是沿图3中的e1-e3共结线向富钠长石的方向演化,最终产物是富钠长石的“奥长花岗岩”(参见张金朋和汪洋, 2024)。由于Q'-ANOR图解的横坐标没有考虑钠长石组分,所以该图解对于TTG和RTG的成因解释受局限。

总的来说,不同花岗岩类型在Q'-ANOR图上的投影提供了有关岩浆演化的重要成因信息。

4 大地构造背景判别与解读

4.1 不同构造背景深成岩套在Q'-ANOR图上的分布形式

本文将大地构造背景明确的11组典型花岗岩套的成分数据(表6)与Frost等(2001)定义的钙质、钙碱质、碱钙质、碱质演化趋势线一并投影在Q'-ANOR图中(图5、6),并据Frost等(2001)的Fe*指标采用空心(铁质)和实心(镁质)符号区别样品的铁镁相对比例。

表6和图5的俯冲背景的幼年洋内弧、陆缘弧外带、陆缘弧分别对应了2套花岗质岩石组合,其目的在于展示相同大地构造背景下不同构造域的花岗质岩石组合的相似性和差异性。相似性源于其形成于相同的地球动力学环境,而差异性取决于各构造域的地质演

表 6 已知明确大地构造背景的若干典型花岗岩套及文献来源

Table 6 Typical granitoid suites with well-known tectonic settings and their literature sources

	大地构造背景	岩套	文献来源
俯冲带	幼年洋内弧(图5a)	巴布亚新几内亚新不列颠岛Uasilau-Yau Yau岩套	Whalen,1985
	幼年洋内弧(图5b)	Trans-Hudson造山带Flin Flon带深成岩	Whalen et al.,2016
	陆缘弧外带(图5c)	纽芬兰寒武-奥陶纪Notre Dame岩套	Whalen et al.,1997
	陆缘弧外带(图5d)	魁北克Cape Smith带Ungava花岗岩套	Whalen and Wodicka,2006
	陆缘弧(图5e)	智利沿岸前更新世深成岩套	Oliveros et al.,2020
	陆缘弧(图5f)	外喜马拉雅带中生代深成岩	Cao et al.,2022
	陆缘弧内带(图5g)	北美科迪勒拉深熔带深成岩	Chapman et al.,2021
非俯冲带	大陆碰撞带(图6a)	喜马拉雅带新生代淡色花岗岩	Cao et al.,2022
	后碰撞岩石圈拆沉(图6b)	Trans-Hudson造山带Cumberland岩基	Whalen et al.,2010
	后碰撞走滑挤压环境(图6c)	新不伦瑞克和魁北克Appalachian花岗岩	Whalen,1993
	非造山成因(图6d)	美国中元古代1.4 Ga A型花岗岩	du Bray et al.,2015
	非造山成因(图6e)	攀西地区二叠纪A型花岗岩	Shellnutt and Zhou,2007

化历史、地壳成熟度、源岩性质等影响岩浆演化过程的诸要素。这种细节展示有助于读者深入了解相同大地构造背景下岩浆组合的多样性。

从图5可以看出,幼年洋内弧的深成岩套(新不列颠岛Uasilau-YauYau杂岩)比Frost等(2001)厘定的钙质趋势(South California岩基)更富钙(图5a)。陆缘弧外带的深成岩套主要分布在钙质和钙碱质趋势线之间(图5c、5d)。陆缘弧的深成岩套分布在钙质趋势到碱钙质趋势线之间,少部分表现为碱质趋势(图5e~5g)。对比幼年洋内弧、陆缘弧外带(图5a~5d)与陆缘弧(图5e~5f)的投影点分布可以看出,属于狭义花岗岩的成分点数量前者少而后者多,表明岩浆在具有较厚地壳的陆缘弧内经历了同化混染与分离结晶演化过程。陆缘弧内带数量最多的岩性为狭义花岗岩(图5g),这与岩浆经历熔融-混染-储存-均一化演化过程或更厚陆壳的部分熔融有关。幼年洋内弧、陆缘弧外带深成岩套相对富镁,属于铁质的样品很少(图5a~5d)。成熟的陆缘弧深成岩套中属于铁质的样品数量增多(图5e、5f),这表明幼年洋弧岩浆演化过程的氧化/还原环境属于相对氧化的状态,而陆缘弧属于相对还原的状态(Frost et al.,2001;Frost and Frost,2008)。

形成于非俯冲构造背景的深成岩套中的富钾质岩类(即花岗岩、石英正长岩、石英二长岩、正长岩和二长岩)的比例远高于大多数俯冲构造背景的深成岩套(对比图5a~5f与图6a~6c),同时非俯冲环境中属于铁质类型的样品数量相当多,沿钙质趋势线分布的样品也有属于铁质者(图6a、6b)。这些特征表明,大陆碰撞带和后碰撞阶段的花岗质熔体源于陆壳部分熔融作用或者是幔源岩浆经历了陆壳物质的同化作用;而成分相对富钙、钠的幔源岩浆及其派生熔体在俯冲背景花岗岩类的形成、演化过程中扮演了重要角色(Castro,2020;Moyen et

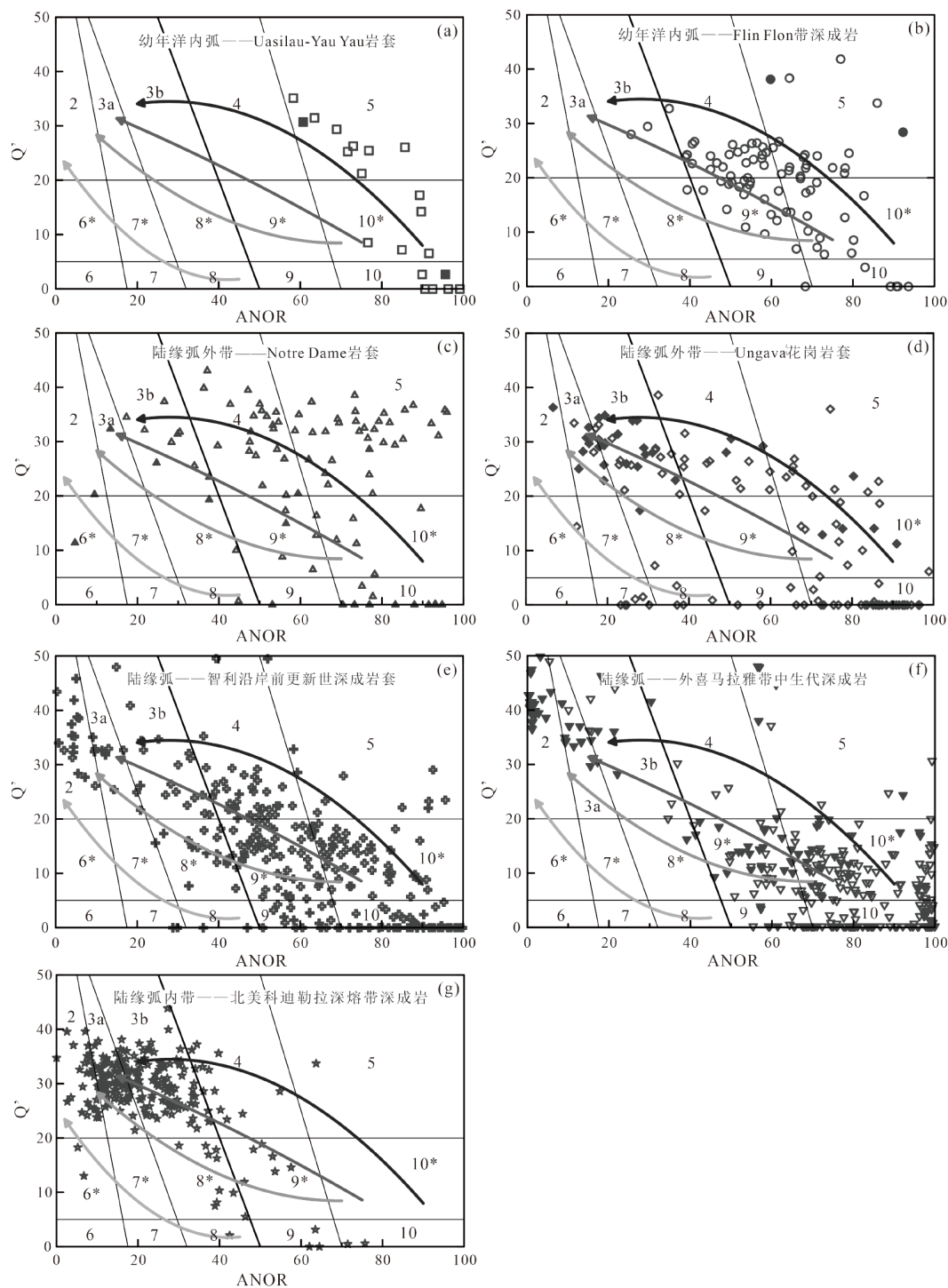
al.,2021)。因此,通过观察花岗质岩套成分点在Q'-ANOR图的分布密度有助于估计岩套中源自陆壳熔融或幔源岩浆分异的熔体的占比(Jacob et al.,2021)。

典型的非造山成因花岗岩类在Q'-ANOR图的投影见图6d、6e。美国大陆中元古代1.4 Ga前后形成的横贯美洲大陆A型花岗岩套在Q'-ANOR图的投影点绝大多数集中在碱性长石花岗岩和狭义花岗岩区域(包括正长花岗岩和二长花岗岩),属于富斜长石长英质侵入岩的样品比例很低,且绝大多数样品属于铁质类型(图6d)。攀西地区二叠纪A型花岗岩(峨眉山大火成岩省岩浆作用的酸性端元)(Shellnutt and Zhou,2007)的65个样品分布在碱性趋势线左侧且几乎全部为铁质,其中大部分成分点投影于Q'=0的横坐标轴或ANOR=0的纵坐标及其附近,这些样品属于硅饱和(Q'=0)的长英质岩石(正长岩、碱性长石正长岩)或钙长石含量极低(ANOR=0)的硅过饱和(Q'>0)高演化长英质岩石(碱性长石花岗岩、碱性长石石英正长岩),是岩浆高度分异演化的产物(图6e)。非造山花岗岩套以铁质类型富碱性长石长英质岩石占绝对优势而与其他非俯冲环境的岩套区分开。

综上所述,花岗岩套在Q'-ANOR图的投影样式与其成岩过程密切相关,可以反映其产出的大地构造背景。

4.2 实例

Whalen和Hildebrand(2019)定义了形成于(广义)俯冲背景的板片破坏(slab-failure)花岗岩类,并根据铝饱和指数将其分为偏铝质与过铝质两个亚类。在Q'-ANOR图中的投影显示,偏铝质板片破坏花岗岩类样品主要分布于钙质和钙碱质趋势线之间,在岩性上多数属于富斜长石的长英质侵入岩,狭义花岗岩样品的数量比例不大(图7a),类似于陆缘弧深成岩套的分



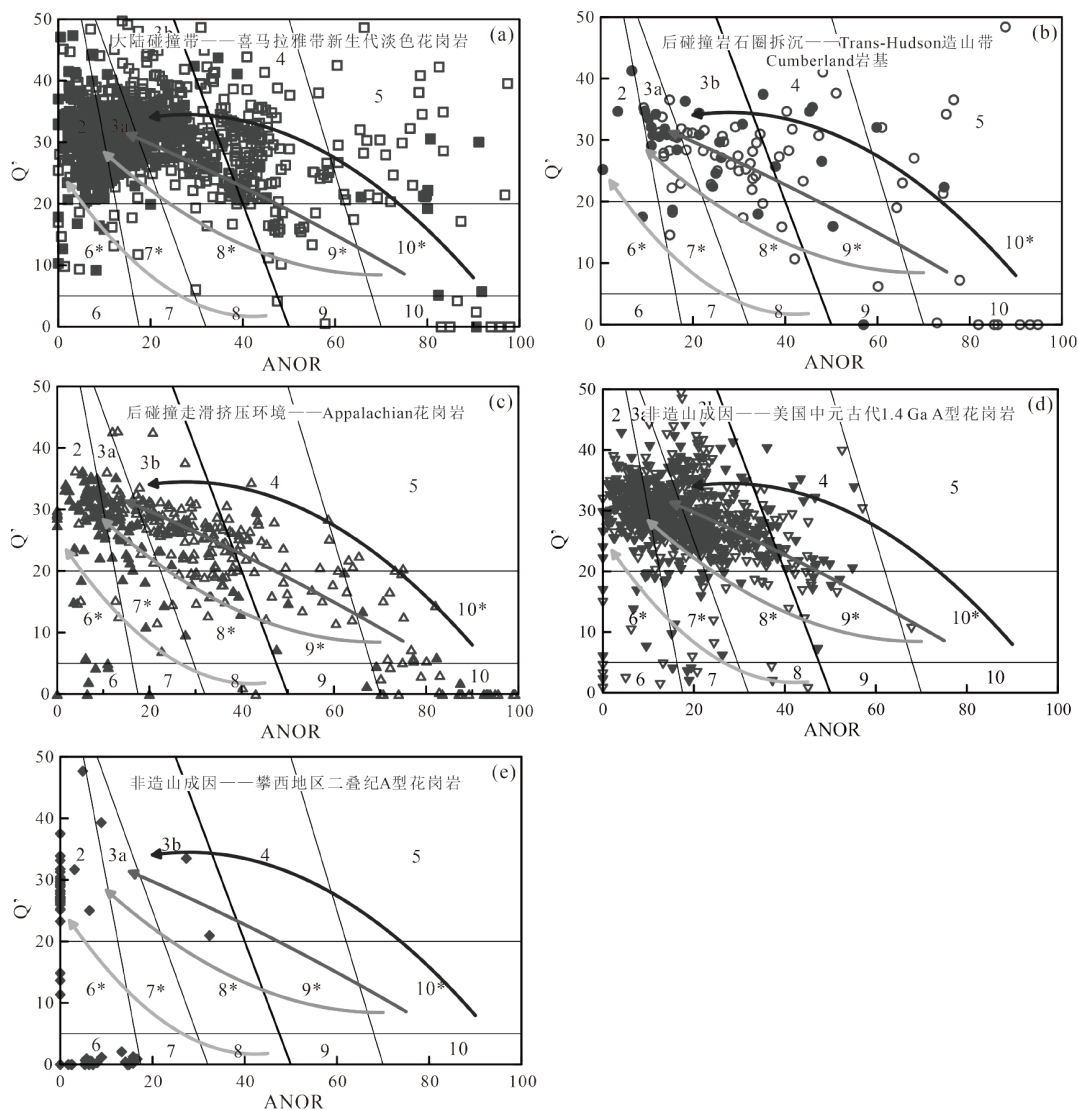
数据来源见表6

图5 形成于俯冲环境的典型花岗岩类的Q'-ANOR投图(底图据Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig. 5 The projections of granitoid suites occurred in the subduction environments in the Q'-ANOR diagrams (base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

布形式;过铝质板片破坏花岗岩类样品则相对富钾,主要分布于钙质、钙碱质和碱钙质趋势线之间,少数散布在碱质趋势线两侧,在岩性上多数属于富碱性长石的长英质侵入岩,狭义花岗岩样品的数量比例大(图7b),类似于后碰撞走滑挤压背景深成岩套的分布形式。因

此,Whalen和Hildebrand(2019)定义的板片破坏花岗岩类并非形成于统一的大地构造背景,偏铝质的板片破坏花岗岩类形成于陆缘弧环境,而过铝质的板片破坏花岗岩类形成于造山带后碰撞阶段。对于特定地域,其地质构造演化在时间上具有连续性,不同构造阶



数据来源见表6

图6 形成于非俯冲环境的典型花岗岩类的Q'-ANOR投图(底图据Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig. 6 The projections of granitoid suites occurred in the non-subduction environments in the Q'-ANOR diagrams (base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

段之间的构造-岩浆活动渐变过渡(Şengör et al., 1993),对应于火成岩组合在岩石学、地球化学性质上的连续渐变特征。所以,偏铝质与过铝质板片破坏花岗岩在岩石组合上既有相似性又有差异性,它们的样品点在Q'-ANOR图中的投影有重叠。

福建长乐-南澳构造带早白垩世(131~115 Ma)花岗岩类在Q'-ANOR图中多沿着钙质趋势线展布,有一定比例的样品属于狭义花岗岩(图7c),分布模式类似于Bonin等(2020)定义的ACG和ATG花岗岩类(图4a),以及图5a、5c、5d所示的陆缘弧外带深成岩套,而非TTG岩系。长乐-南澳早白垩世花岗岩套的岩性组合是辉长岩/闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩,而不是冯艳芳(2011)、邓晋福等(2015a,

2017)所认为的TTG组合,形成于早白垩世时期中国东南沿海发育的陆缘弧背景,与前人研究结果一致(Lan et al., 1996; Chen et al., 2004; 张金朋和汪洋, 2024)。

在Q'-ANOR图上,华北克拉通侏罗-白垩纪“埃达克岩”的绝大部分样品投点都散布在钙碱质、碱钙质和碱质趋势线之间,狭义花岗岩样品的数量比例达三分之一(图7d),分布模式类似于Bonin等(2020)定义的KCG花岗岩类(图4c),或后碰撞走滑挤压环境的Appalachian花岗岩类(图6c)。依据主量元素特征,华北克拉通侏罗-白垩纪“埃达克岩”属于富钾钙碱性花岗岩类(KCG),而不同于俯冲环境富钙钠贫钾的典型埃达克岩(Martin et al., 2005),与前人的认识一致(张旗等, 2008; Wang and Cheng, 2012)。

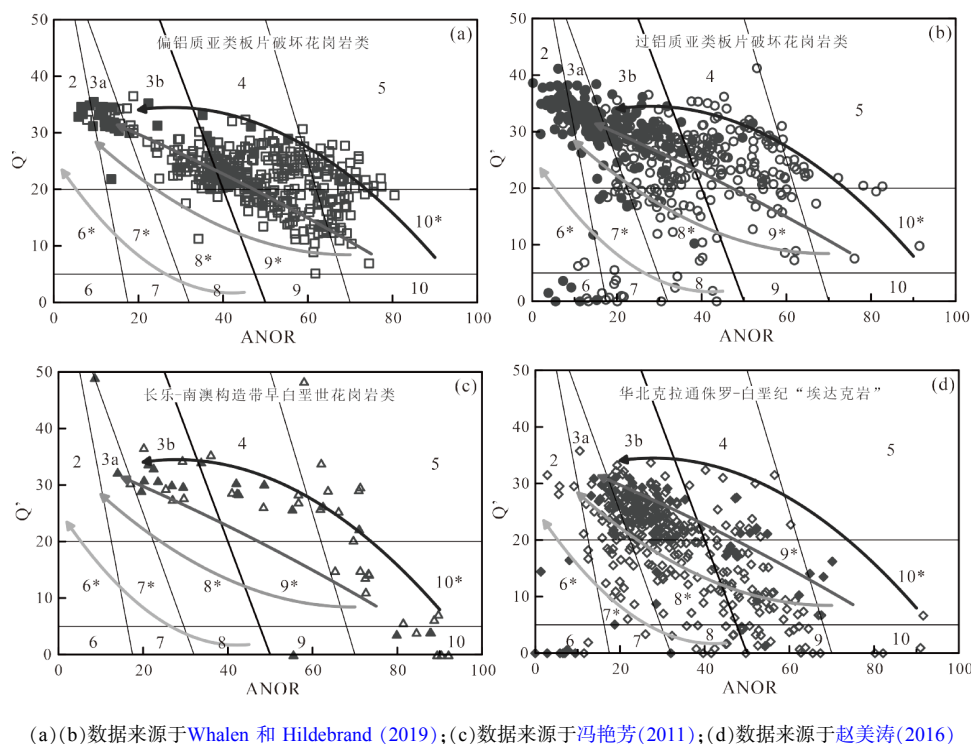


图7 偏铝质亚类板片破坏花岗岩类(a),过铝质亚类板片破坏花岗岩类(b),长乐-南澳构造带早白垩世花岗岩类(c),华北克拉通侏罗-白垩纪(d)“埃达克岩”的 Q' -ANOR投图(底图据Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig.7 The projections in the Q' -ANOR diagrams for the metaluminous subgroup of slab failure granitoids (a), the peraluminous subgroup of slab failure granitoids (b), the Early Cretaceous granitoids of the Changle-Nan'ao Tectonic Belt (c), SE China, and the Jura-Cretaceous “adakites” of the North China Craton (d)(base plot after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

5 结论与认识

基于1952组侵入岩主量元素和造岩矿物含量定量分析数据对的投图,发现 Q' -ANOR图解正确复现实际矿物含量QAP定名的比率约为55%,对严格依据QAP方案定义的正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩的识别正确率为40%~60%。如果采用O'Connor(1965)的石英相对含量标准(>10%),则 Q' -ANOR图解对狭义花岗岩(正长花岗岩和二长花岗岩)、英云闪长岩和碱长花岗岩的识别正确率提升至70%以上。 Q' -ANOR图解可以很好地区分富斜长石长英质侵入岩(即英云闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩等)与富碱性长石长英质侵入岩(即狭义花岗岩、碱长花岗岩、石英正长岩、石英二长岩等)。

Frost等(2001)厘定的典型碱质、碱钙质、钙碱质、钙质岩套在 Q' -ANOR图上呈现出很好的空间展布趋势,有助于区分不同花岗岩类型的岩石成因差异。钙质和钙碱质花岗岩类在 Q' -ANOR图解中的变化趋势指示其演化受石英-长石共结制约,而碱钙质和碱质花岗岩类表现为前期受斜长石—碱性长石共结制约、后期受石英-长石共结制约的演化趋势。 Q' -ANOR图解投影能够揭示大部分花岗质岩浆的演化趋势,有助于

分析花岗质岩套/组合的成因。

具有明确大地构造背景的花岗岩套样品在 Q' -ANOR图解中的分布图像的经验性对比为判别未知侵入岩套的大地构造背景提供了一种新方法。如果采用机器学习的方法对已知构造背景的花岗岩 Q' -ANOR投影图像进行训练,有可能实现未知侵入岩套大地构造背景判别的自动化与客观化(谢玉芝和汪洋,2023)。

用于常见长英质侵入岩分类定名的阳离子P-Q图解(Debon and Le Fort, 1988),其本质与 Q' -ANOR图解类似,是基于石英相对含量和斜长石/碱性长石比例的替代性指标构建的二维平面图。由于绝大多数长英质侵入岩的长石组分包含了钾长石、钠长石和钙长石三个端元,二维平面图所表示的长石成分变化是从钠长石向钾长石-钙长石-石英平面的投影,由此导致的信息损失不可避免。可以合理地推断,阳离子P-Q图解复现实际矿物QAP定名的正确率不会明显优于 Q' -ANOR图解。目前国际地质科学联合会(IUGS)的火成岩工作组正致力于构建适用于常见侵入岩的全碱-硅(TAS)分类命名图解(Lustrino and TGIR members, 2022)。由于TAS图解不包含CaO,其能否实现与实际矿物QAP定名准确对应的目标值得怀疑。对于长英质

侵入岩的岩性识别和命名而言, 岩石化学二维图解不能替代实际矿物含量QAP方案。然而, 岩石化学图解可以很好地刻画花岗质岩套/组合的整体演化趋势, 对其成因及其形成的大地构造环境大有裨益。

附表1见<https://doi.org/10.3724/j.issn.1007-2802.20240138>

作者贡献声明: 孙明明, 数据处理、制作图件、文章撰写; 汪洋, 文章构思、数据收集与整理、指导、审阅并修改文章。

利益冲突声明: 作者保证本文无利益冲突。

致谢: 感谢评审专家提出的修改意见。

参考文献 (References):

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626
- Bateman P C, Chappell B W, Kistler R W, Peck D L, Busacca A. 1988. Tuolumne meadows quadrangle, California analytic data. *USGS Bulletin*, 1819: 1–43
- Bonin B, Janoušek V, Moyen J F. 2020. Chemical variation, modal composition and classification of granitoids. *Geological Society of London Special Publications*, 49(1): 9–51
- Buckle T, Williams M, Nathwani C L, Hughes H S R. 2023. WebNORM: A web application for calculating normative mineralogy. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1232256
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, Li G M, Zhang L K, Zhang X F, Zhang Y H, Zou H, Dai Z W, Lin B, Tang L, Yu X. 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization. *Earth-Science Reviews*, 234: 104229
- Castro A. 2020. The dual origin of I-type granites: The contribution from experiments. *Geological Society of London Special Publications*, 491(1): 101–145
- Chapman J B, Runyon S E, Shields J E, Lawler B L, Pridmore C J, Scoggin S H, Swaim N T, Trzinski A E, Wiley H N, Barth A P, Haxel G B. 2021. The North American cordilleran anatectic belt. *Earth-Science Reviews*, 215: 103576
- Chen C H, Lin W, Lan C Y, Lee C Y. 2004. Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) orogeny, SE China. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1–2): 237–248
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. Netherlands: Dordrecht Springer, 80–85
- Cross W, Cross J P, Pirsson L V, Washington H S. 1902. A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks. *Journal of Geology*, 10(6): 555–690
- Debon F, Le Fort P. 1983. A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 73(3): 135–149
- Debon F, Le Fort P. 1988. A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: Principles, method, applications. *Bulletin de Minéralogie*, 111(5): 493–510
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 苏尚国, 肖庆辉, 伍光英. 2017. 中国侵入岩大地构造. 北京: 地质出版社, 10–15 [Deng J F, Feng Y F, Di Y J, Su S G, Xiao Q H, Wu G Y. 2017. *Tectonics of Intrusive Rocks in China*. Beijing: Geological Publishing House, 10–15 (in Chinese)]
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 苏尚国, 肖庆辉, 伍光英. 2015a. 中国侵入岩大地构造图(1:250万)及说明书. 北京: 地质出版社, 63–70 [Deng J F, Feng Y F, Di Y J, Su S G, Xiao Q H, Wu G Y. 2015a. *Geotectonic Map of Intrusive Rocks in China (1:2,500,000) with Explanations*. Beijing: Geological Publishing House, 63–70(in Chinese)]
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015b. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. *地质论评*, 61(4): 717–734 [Deng J F, Liu C, Feng Y F, Xiao Q H, Di Y J, Su S G, Zhao G C, Duan P X, Dai M. 2015. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4): 717–734 (in Chinese with English abstract)]
- 邓晋福, 刘翠, 狄永军, 冯艳芳, 肖庆辉, 刘勇, 丁孝忠, 孟贵祥, 黄凡, 赵国春, 吴宗絮. 2018. 英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩石构造组合及其亚类划分. *地学前缘*, 25(6): 42–50 [Deng J F, Liu C, Di Y J, Feng Y F, Xiao Q H, Liu Y, Ding X Z, Meng G X, Huang F, Zhao G C, Wu Z X. 2018. Discussion on the tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) petrologic assemblage and its subtypes. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 42–50 (in Chinese with English abstract)]
- du Bray E A, Holm-Denoma C, San Juan C A, Lund K, Premo W R, DeWitt E. 2015. Geochemical, modal, and geochronologic data for 1.4 Ga A-type granitoid intrusions of the conterminous United States. *U.S. Geological Survey Data Series 942*, 1–19
- Duchesne J C, Wilmart E. 1997. Igneous charnockites and related rocks from the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion (Southwest Norway): A jotunite (hypersthene monzodiorite)-derived A-type granitoid suite. *Journal of Petrology*, 38(3): 337–369
- Enrique P, Esteve S. 2019. A chemical approximation to the modal QAPF and normative Q'(F')-ANOR classification of the igneous rocks based on their SiO₂-CaO-K₂O content. *Geogaceta*, 66: 91–94
- Enrique P. 2018. Clasificación normativa de las rocas plutónicas saturadas y sobresaturadas en sílice basada en la clasificación modal QAP: El diagrama 2Q-(Or+Ab)-4An. *Geogaceta*, 63: 95–98
- 冯艳芳. 2011. 长乐-南澳构造带花岗岩类年代学、岩石组合与构造演化(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京), 29–36 [Feng Y F. 2011. *Chronology, rock assemblage and tectonic evolution of granitoids in the Changle-Nan'ao tectonic belt (Dissertation)*. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 29–36 (in Chinese with English abstract)]
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048
- Frost B R, Frost C D. 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49(11): 1955–1969
- Frost B R, Frost C D. 2014. *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 145–146
- Frost B R, Frost C D, Anderson J, Barnes C, Wilson M. 2019. A more informative way to Name plutonic rocks—Comment by Frost B et al. *GSA Today*, 29(2): 38–39
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivite-type anorogenic granite. *Journal of Petrology*, 40(12): 1771–1802
- Glazner A, Bartley J, Coleman D. 2019. A more informative way to Name

- plutonic rocks. *GSA Today*, 29(2): 4–10
- Hogan J P. 2019. A more informative way to Name plutonic rocks—Comment by Hogan J P. *GSA Today*, 29 (6): 40–41
- Jacob J B, Moyen J F, Fiannacca P, Laurent O, Bachmann O, Janoušek V, Farina F, Villaros A. 2021. Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 2, attempting to quantify mantle and crustal contributions in granitoids. *Lithos*, 402: 106292
- Janoušek V, Moyen J F. 2020. Whole-rock geochemical modelling of granite genesis: The current state of play. Geological Society, London, Special Publications, 491(1): 267–291
- Johannsen A. 1939. A Descriptive Petrography of the Igneous Rocks, vol.1 (2nd Edition). Chicago: Chicago University Press, 129–140
- Lan C Y, Jahn B M, Mertzman S A, Wu T W. 1996. Subduction-related granitic rocks of Taiwan. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14 (1–2): 11–28
- Larsen E S. 1948. Batholith and associated rocks of corona, Elsinore, and San Luis Rey quadrangles, southern California. *GSA Memoir*, 29: 1–175
- Le Bas M. 2006. Igneous rock classification revisited: Simplicity won the day. *Geology Today*, 22: 53–55
- Le Maitre R W. 2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (2nd Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 25–40
- Lustrino M, 16 TGIR members. 2022. IUGS Task Group on Igneous Rocks. https://www.iugs.org/_files/ugd/f1fc07_cefb1e00fc1f4a9d83019958867039.pdf?index=true (2022–07–07)[2024–01–16]
- Luth W C. 1976. Granitic rocks. In: Bailey, D K, MacDonald, R A (eds.). *The Evolution of the Crystalline Rocks*. Oxford: Oxford University Press, 335–416
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- Middlemost E A K. 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77(1): 19–26
- Morse S A. 2024. Basalts and Phase Diagrams: An Introduction to the Quantitative Use of Phase Diagrams in Igneous Petrology (2nd Edition). Cham: Springer Nature, 8–11
- Moyen J F, Janoušek V, Laurent O, Bachmann O, Jacob J B, Farina F, Fiannacca P, Villaros A. 2021. Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 1, granites and paradigms. *Lithos*, 402: 106291
- Nédélec A, Bouchez J L. 2015. Granites: Petrology, Structure, Geological Setting, and Metallogeny. Oxford: Oxford University Press, 280–307
- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. US Geological Survey Professional Paper 525B: B79–B84
- Oliveros V, Moreno-Yaeger P, Flores L. 2020. Igneous rock associations 25. Pre-Pliocene Andean magmatism in Chile. *Geoscience Canada*, 47(1): 65–82
- Philpotts A R, Ague J J. 2022. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology (3rd Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 423–478
- Philpotts A R, Ague J J. 2009. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology (2nd Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 134
- 邱家骥, 林景任. 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 8–10 [Qiu J X, Lin J Q. 1991. Petrochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 8–10 (in Chinese)]
- Rollinson H. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. London: Longman Group U K Ltd, 52–60
- Rollinson H, Pease V. 2021. Using Geochemical Data: To Understanding Geological Processes (2nd Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 50–87
- Şengör A M C, Cin A, Rowley D B, Nie S Y. 1993. Space-time patterns of magmatism along the Tethysides: A preliminary study. *The Journal of Geology*, 101(1): 51–84
- Shellnutt J G, Zhou M F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume. *Chemical Geology*, 243(3–4): 286–316
- Streckeisen A. 1976. To each plutonic rock its proper Name. *Earth-Science Reviews*, 12(1): 1–33
- Streckeisen A, Le Maitre R W. 1979. Chemical approximation to modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 136: 169–206
- Sun M M, Wang Y. 2024. The 2Q-(Or+Ab)-4An (QUORAA) diagram: Poor for classification but good at deciphering the evolution of granitoids. *Journal of Geosciences*, 69(1): 65–75
- Tuttle O F, Bowen N L. 1958. Origin of Granite in the Light of Experimental Studies in the System NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *McLean: Geological Society of America Memoir*, 74: 1–146
- Verma S P. 2020a. Comprehensive multidimensional tectonomagmatic discrimination from log-ratio transformed major and trace elements. *Lithos*, 362: 105476
- Verma S P. 2020b. Road from Geochemistry to Geochemometrics. Singapore: Springer
- 王名越, 狄永军, 张春禹. 2024. 花岗岩矿物正交偏光镜下图像人工智能识别研究. *矿物学报*, 44(1): 11–23 [Wang M Y, Di Y J, Zhang C Y. 2024. A study on identification of minerals in crossed polarizer images of granites using the artificial intelligence. *Acta Mineralogica Sinica*, 44(1): 11–23 (in Chinese with English abstract)]
- Verma S P, Torres-Alvarado I S, Sotelo-Rodriguez Z T. 2002. SINCLAS: Standard igneous norm and volcanic rock classification system. *Computers & Geosciences*, 28(5): 711–715
- Wang Y, Cheng S H. 2012. Field relation, geochemistry and origin of the Xinglonggou volcanic rocks in Beipiao area, Liaoning Province (China): Reappraisal on the foundering of lower continental crust of North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 35–50
- 汪洋. 2007. 从教材看当前我国火成岩石学教学的某些不足. *中国地质教育*, 16(4): 150–153 [Wang Y. 2007. Problems of the igneous petrology education in Chinese universities: An insight from some recent petrology textbooks by foreign authors. *Chinese Geological Education*, 16(4): 150–153 (in Chinese with English abstract)]
- Whalen J B. 1985. Geochemistry of an island-arc plutonic suite: The Uasilau-Yau Yau intrusive complex, New Britain, P.N.G. *Journal of Petrology*, 26 (3): 603–632
- Whalen J. 1993. Geology, petrography, and geochemistry of Appalachian granites in New Brunswick and Gaspésie, Quebec. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 436: 1–124
- Whalen J B, Hildebrand R S. 2019. Trace element discrimination of arc, slab failure, and A-type granitic rocks. *Lithos*, 348: 105179
- Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, Garipey C, Fryer B J. 1997.

- Implications of granitoid geochemical and isotopic (Nd, O, Pb) data from the Cambrian-Ordovician Notre Dame Arc for the evolution of the Central Mobile belt, Newfoundland Appalachians. In: Sinha A K, Whalen J B, Hogan J P (eds.) *The Nature of Magmatism in the Appalachian Orogen*. McLean: Geological Society of America Memoir, 191: 367–395
- Whalen J B, Pehrsson S J, Rayner N M. 2016. Significance of pre-1860 Ma granitoid magmatism for crustal evolution and exploration targeting in the Flin Flon assemblage, Trans-Hudson orogen, Canada. *Economic Geology*, 111(4): 1021–1039
- Whalen J B, Wodicka N. 2006. Ungava granitoid geochemical compilation. In: St-Onge M R, Lamothe D, Henderson I, Ford A (eds.). *Digital Geoscience Atlas of the Cape Smith Belt and adjacent domains, Ungava Peninsula, Quebec and Nunavut*. Ottawa: Geological Survey of Canada, 5117
- Whalen J B, Wodicka N, Taylor B E, Jackson G D. 2010. Cumberland batholith, Trans-Hudson Orogen, Canada: Petrogenesis and implications for Paleoproterozoic crustal and orogenic processes. *Lithos*, 117(1–4): 99–118
- Williams H, Turner F J, Gilbert C M. 1954. *Petrography*. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 25–37
- 谢玉芝, 汪洋. 2023. 机器学习在岩矿地球化学研究中的应用: 综述与思考. *地质论评*, 69(4): 1465–1474 [Xie Y Z, Wang Y. 2023. A review on the machine learning approach to rock and mineral geochemistry research. *Geological Review*, 69(4): 1465–1474 (in Chinese with English abstract)]
- Young D A. 2003. *Mind over Magma: The Story of Igneous Petrology*. Princeton: Princeton University Press, 389–407
- Young D A. 2008. Origin of the American quantitative igneous rock classification: Part 1. *Journal of the History of the Earth Sciences Society*, 27: 188–219
- 张金朋, 汪洋. 2024. 识别富斜长石花岗岩类的岩石化学图解: 评价与辨析. *地质论评*, 70(5): 1963–1980 [Zhang J P, Wang Y. 2024. An evaluation on the petrochemical diagrams for discriminating plagioclase-rich granitoids. *Geological Review*, 70(5): 1963–1980 (in Chinese with English abstract)]
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 95–130 [Zhang Q, Wang Y, Xiong X L, Li C D. 2008. *Adakite and Granite: Challenges and Opportunities*. Beijing: China Land Press, 95–130 (in Chinese)]
- 张旗, 原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. *地质论评*, 70(5): 1907–1926 [Zhang Q, Yuan J. 2024. The crisis and opportunity of geochemical research. *Geological Review*, 70(5): 1907–1926 (in Chinese with English abstract)]
- 赵美涛. 2016. 华北克拉通中生代埃达克质岩成因探讨: 理论考量与实例研究 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京), 9–53 [Zhao M T. 2016. *The formation of Mesozoic adakitic rocks in North China Craton: Theoretical discussions and case studies (Dissertation)*. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 9–53 (in Chinese with English abstract)]

(本文责任编辑: 谭亲平; 英文审校: 张兴春)

·亮点速读·

熔体包裹体形成过程中的化学和同位素分馏

熔体包裹体是研究岩浆起源和演化的重要工具,但其是否代表平衡熔体成分一直存在争议。熔体包裹体的形成条件复杂,尤其是在快速晶体生长过程中,可能会因扩散限制而形成边界层,导致熔体包裹体中相容元素贫化和不相容元素富集。尽管这一现象已被广泛认识,但在自然样品中识别边界层效应仍然具有挑战性。

针对这个问题,加拿大多伦多大学的da Silva Ricardo B.及其合作者以夏威夷基拉韦厄火山喷发的玄武质火山灰为研究对象,分析了橄榄石中的熔体包裹体。通过电子探针、激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)和飞秒激光剥蚀-多接收器-电感耦合等离子体质谱(fs-LA-MC-ICP-MS)技术,研究人员发现熔体包裹体中的镁同位素分馏高达0.49‰($\delta^{26}\text{Mg}$),远高于

高温下矿物-熔体平衡同位素分馏的预期值。他们认为,熔体包裹体中重镁同位素的富集是由于橄榄石生长过程中轻同位素(^{24}Mg)优先扩散进入晶体,而重同位素(^{26}Mg)则留在熔体中所造成的。不仅如此,当边界层效应显著时,其他不相容元素(如Ca、Ti、K)也会表现出类似的同位素分馏。由此可见,稳定同位素客作为识别熔体包裹体中非平衡成分的有力工具。与化学分析相比,同位素分馏能够更灵敏地反映边界层效应。通过建立模型,研究人员预测了K、Ca和Ti同位素在边界层中的分馏行为,发现当晶体生长速率与扩散速率的比值(R/D)较高时,同位素分馏和元素富集效应尤其显著。

边界层形成可以使元素和同位素发生显著分馏,但仅通过化学分析难以识别这些非平衡现象。相比之下,稳定同位素分馏能够提供更明确的判别依据。这一同位

素方法可以应用到低温的长英质岩浆岩和矿床研究中,但是在低于1000 °C时,矿物与熔体之间的平衡同位素分馏可能较大,在这种情况下应首先明确其平衡分馏因子。这项研究不仅揭示了熔体包裹体形成过程中同位素分馏的动力学机制,还为利用稳定同位素识别熔体包裹体的非平衡组份提供了新的思路,这对于理解岩浆演化、火山喷发过程以及地球深部物质循环具有重要意义。

[以上成果发表在国际著名科学期刊 *Geology* 上; da Silva Ricardo B, Martin O, Lynn K J, Bennett N R, Chu X, Henderson G, Liu Y N, Weyer S, Sio C K, 2025. Chemical and isotopic fractionation during melt inclusion formation. *Geology*, <https://doi.org/10.1130/G52248.1>]

(袁超 编译)