

从简化的拓扑学处理方法(simplified topological treatment) 看我国滨太平洋区中生代火山岩系与其大地构造的联系

(提 纲)

用于中国火山作用与资源学术讨论会

董 申 保

1999.8

I. 岩浆岩研究的现状

与其它地质学科的发展相似,岩浆岩的研究正处于一个转型的阶段,表现为:1.由定性化的描述转向为以定量化的测视及实验数据的模拟(modeling);2.由经验式的等同性的推理(empirical equivalence)包括定性和量化数据转向为受一定的地质作用控制为前提的物化作用为理论基础;3.由一个以静止或稳定状态(steady state)为理论基础转向以时间为状态函数的动力学方向,后者在转型中具有更本质的意义。这一方向的进行往往是通过地质观察的反演模式(inverse modelling)形成某些理论模拟(theoretical modeling.),并经过不断的反馈和修正以达到最终目的。

自Hutton的‘Theory of the earth with proof and illustrations,1795’问世以来,岩浆作用的两个对立体,即以地幔岩浆结晶为主的火山岩和以地壳重熔(anatexis)为主的花岗质岩石的成因初步在它们的时空分布,演化过程和它们之间的互相联系上达成了若干共识。认为二者在岩浆作用的热体制(thermal regime)上,包括它们的起始状态(initial state)—源岩状态及其组分—和其演化过程中的各种作用如结晶(fractionation)、混杂(contamination)、残留体熔融(restite melting)、交代作用(replacement)等都有所不同,但它们之间又存在着密切联系,在各个地壳演化阶段表现不同,是地壳演化过程中地壳与地幔相互作用的结果,其根本原因在于岩石圈内深部热流体制的变化,既包括地幔岩浆和重熔岩浆上升时所形成的对流(convection)和传导(conduction)的影响,也包含地壳内部的底垫(underplating)、折沉(delamination)和地壳中各种地质作用的能量互变以及由后期上升(exhumation)所产生的某些对流(advection)等的热流变化,这些岩浆作用形成时的热流扰动(thermal perturbation)及其随后的重趋平衡以及地表所呈现的大地构造环境的变化有着一定的依存和因果关系。通过岩浆岩研究的发展趋势上看,以热流传递为理论基础的区域岩石成因中的某些关键所在与其大地构造环境的联系的研究,形成若干反演模式,成为岩浆学科发展的转型阶段中的一个重要方向,它们将为转型阶段中的动力学的理论方面提供必不可少的资料。

用拓扑学处理方法(topological treatment)来研究岩浆岩的区域成因及其大地构造的联系,是近代研究岩浆岩,特别是花岗岩的一个重要方向。从字义上看,拓扑学是一种区域分类学,是实体的某些内在特征(natural features)和其结构的关系。这里,定义为‘在大地构造的框架下,以岩石学特别是显微结构和包体为前提,在岩石、矿物、地球化学元素共生组合的基础上,研究岩浆岩系中某些特征的地球化学元素组合和它们的大地构造环境中的特定阶段的联系,为热流体制的研究提供实际材料。’

在考虑特征的地球化学元素组合时,一定要注意自然界中热力学体系(natural system)的特征,既包括起始状态的源区和源岩组分又有在演化过程中受元素的地球化学性质支配而变化的影响,使二者成为一个有机联系的整体,用以共同反映区域成因中的某些特征。

II. 滨太平洋区中生代火山岩系的某些简化的拓扑学处理

1. 滨太平洋区 (Marginal Pacific Domain) 的基本地质特征

滨太平洋的构造区一词始见于黄汲清 (Huang, 1978), 它的界线一般认为大兴安岭—太行—武陵断裂以东至中国东南沿海一带的地区, 其基本地质特征为:

- a. 与中部地区相比, 属地壳减薄带, 一般小于 38km.
- b. 多期深断裂带大量出现, 一般为 NNE 向, 它们往往切隔下部的大陆地体, 自早前寒纪结晶基底至三迭纪的各种陆台及变质地层。
- c. 在基底之上出现大小不等的以陆相沉积为主的沉积, 火山沉积和火山盆地, 为古陆或地塊 (massif) 所间隔。
- d. 火山岩系形成旋回, 自早侏罗始至中白垩世, 以侏罗—白垩世的喷发为最强。各期之间, 包括各地层之间, 从区域上看无明显的不整合 (浙闽东南海滨带除外)。新生代以后, 仅有少量的受断裂控制的玄武岩流, 属地幔上涌产物。
- e. 本区中生代花岗质岩石广泛发育, 它们与火山岩系存在着不同的联系, 可从不同类型的深成—火山杂岩体, 包括 S 型和碱性深成—火山杂岩体及各种环带状杂岩体, 至虽与火山岩形成密切相关, 但它们的相互作用仍需进一步确证的花岗岩直至与火山岩在时、空上无明确联系的大量出现的花岗岩体如南岭 (狭义) 等, 它们的类型, 与火山岩系的关系及其相互作用的研究, 总体上看, 仍需进一步深入研究。

本世纪 20 年代以来, 燕山运动就为国人所瞩目, 并认为是中国东部一个重要的运动期, 有中国特色。从记载上看, 大部分认为这一运动强烈表现为以深断裂的不断活动和继之而来的强烈的岩浆活动为特点。80 年代以来, 人们对燕山运动的大地构造型式提出了各种不同的观点, 包括有俯冲排列、伸展构造、板内碰撞带以及先挤后张等。这些论点大都停留在经验性的叙述阶段, 需要进一步从不同的地质作用的角度加以定量化和理论整理, 并反馈于自然, 加以提炼。从目前大量区域性实际资料看, 燕山运动大体上是以伸展为主引起的地壳拉张、减薄和地幔上涌的大地构造环境, 在长期的拉伸和局部回返过程中可以出现某些旁侧的应力作用 (deviatoric stress) 形成挤压构造, 属于局部范围。明显的造山带仅在广东南澳及福建长乐沿海地区, 有着侏罗世后的低压变质相系的变质地区, 其原始环境可能仍与裂谷环境 (rift setting) 所引起地幔上涌的高温热流有关。总体上看, 本区燕山运动的特色可认为属于伸展构造型 (extension tectonics)。这一推理仍然需要进一步确证, 而岩浆岩的拓扑处理可作为一个方面的论证。

2. 本区中生代火山岩系的简化的拓扑学处理

火山岩系的自然体系是一类多种作用影响的体制, 在其进入地壳的过程中, 除其具备的热力学体系外, 地壳的厚度和组分可改变其进程, 或使其滞留成为一个次一级的储存库 (reservoir)。它的构造形态可以确定其 P—T 变化的轨迹, 如断裂控制可以产生等温降压过程 (isothermal decompression) 等。它们都应看成是自然体系的基本参数, 在进行标识岩浆岩系中的特征地球化学元素组合的同时, 应考虑它们所起的作用。

特征的地球化学元素组合的选择既包括源区状态也包括继后的演化过程, 二者不能偏废。由于资料收集的限制, 这里只简化为常量化学元素中的某些方面, 从中获得部分信息。同时, 更多地侧重于与花岗岩的拓扑处理结合。主要有:

- a. Rittman 指数 (TAS), 以 σ 为代表 表示岩浆岩的同源性 (consanguinity), 分为三级:

碱性系列 (alkalic series)

TAS-1, $\sigma > 4$

中碱性系列 (medium alkalic series) TAS-2, $4 > \sigma > 2.5$

次碱性系列 (subalkalic series) TAS-3, $2.5 > \sigma > 1.8$

相应的界线大致采用了 Irvine 及 Baragar 和 Kuno 的资料, 二者之间为中碱性岩系。

b. KS K_2O 与 SiO_2 之比, 是一个在 SiO_2 变化中 K_2O 增加的指数, 用于指示源岩含 K 的程度, 同时有时也把它在演化过程与大地构造联系, 称为 K-深度 (K-depth), 可分为:

杆栏粗玄岩系 (shoshonite series) KS-1, $KS > 0.07$

高钾钙碱性岩系 (high-K calc-alkaline series) KS-2, $0.07 > KS > 0.05$

低钾钙碱性岩系 (low-K calc-alkaline series) KS-3, $0.5 > KS > 0.02$

c. K 相当于 K_2O/Na_2O , 用义大致与 White 和 Chappell 相当。

d. A 相当于 A/CNK, 用义大致相当于 White 和 Chappell。

3. 滨太平洋区中生代火山岩系的某些拓扑处理

滨太平洋区中生代火山岩的分布见图 1. 及图 2., 它们的分区基本以断裂为界, 进一步再按照当时的地形特征划分。概略地可分为:

a. 兴安—太行区 介于大兴安岭—太行断裂带与伊兰—郯庐断裂之间, 包括兴安、燕辽、太行等地, 属兴安—太行亚区。

b. 吉黑—扬子中下游区 介于兴安—太行断裂带与伊兰—郯断裂带之间, 包括吉黑、胶辽、鲁西、扬子中下游等地, 属伊兰—郯庐亚区。

c. 东南内陆及隆起区 介于常州—岳阳断裂带与邵武—河源断裂带之间, 包括江南古陆、南岭、云开—武夷隆起等地。

d. 东南沿海区 河源—邵武断裂带以东, 包括南平—建瓯, 浙、闽、粤沿海等地。

c 及 d 属东南亚区。

火山喷发始于 J_1 至 J_3-K_1 达高峰, 弱于 K_2 。 J_1 时中基性喷发明显, J_3-K_1 时以中酸性为主, 后期全区有向碱性发展趋势。各期可出现旋回性, 但中酸性喷发占有绝对优势, 熔结凝灰岩在浙闽沿海地区较发育。潜火山—杂岩体中有时伴有 S 型火山杂岩体。

以区域地质环境为前提, 通过对本区各省区域地质志及一些专题所载的岩石化学资料的处理 (约 400 个左右), 统计所得结果初步如下:

(1) 本区各期火山岩系的 TAS 基本可分为两个大类, 相当于碱性岩系 (alkali rock series) TAS-1 和亚碱性岩系 (sulalkali rock series) TAS-3。TAS-1 中又可分为强碱性火山岩系 (TAS-1a) 以杆栏粗玄岩系 (shoshonite series) 为代表, 一般 $\sigma = 4.2 - 10.6$, 经常在 6 左右, 如扬子中、下游区、沂沭和太行断裂带附近, 另一为弱碱性火山岩系 (TAS-1b) 以一般碱性玄武岩系 (alkali basalt series) 为代表, 一般 $\sigma = 3.8 - 5.4$, 以辽西为代表。另一类为亚碱性火山岩系 (sulalkalic series), 为钙碱性火山岩系 (TAS-3), 如东南沿海地区, 中碱性火山岩系 (TAS-2) 似不发育, 它们可形成某些局部岩系, 如兴安地区, 但更多地是附属于 TAS-1 或 TAS-3 中, 成为某些过渡型类型。

在一个具有多期旋回的碱性火山岩系中往往其早期演化为 TAS-1, 而晚期演化特别是中酸性岩石则为 TAS-3, σ 值相差高可达 2 以上 (见图 3), 其中出现的空档 (hiatus) 是明显的, 它也可能是进入地壳时, 受地壳厚度影响产生临时储存库 (reservoir), 并受外来 K 的加入而形成的。某些地区, 白垩纪较后期可出现局部的潜火山杂岩体, 它的 σ 值可高于前期, 可达到 TAS-1 范围, 它们似与后期的碱性岩浆作用有关 (alkaline magmatism), 如雾灵山深成—火山杂岩体, 紫金山杂岩体晚期 σ 值甚至可达 17.6—27.6, 它们似代表一种较显著的中生代晚期存在的碱性岩浆活动。

(2) 总体上看, 本区的大部分的火山岩系的 KS 值大于 0.05, 代表着一类高 K 钙碱性岩系列。其中一部分 $TAS-1$ 属于杆栏粗玄岩系列的, $KS=0.08-0.12$ 或更大, 如扬子中下游区及沂沭断裂带附近等。 $TAS-3$ 的 KS 值一般亦大于 0.05, 仅少数的中基性岩系为低 K 钙碱性岩系。 KS 值的较普遍的增大仍与本区下伏的基底地壳有关, 高 $KS>0.08$ 的值来源与深部的杆栏粗玄武岩系直接相联系。

(3) K 值的变化在火山岩系是一个值得注意的问题。一般情况下, K 值与 SiO_2 值成正相关。在 SiO_2 值大于 70% 时, K 值可从 1.1—1.9, 但在不同的 TAS 岩系中常有变化。在高碱性岩系中 ($TAS-1a$), 玄武岩、粗玄岩, 粗安岩等 ($SiO_2:50-60\%$), K 一般为 0.8—1.4, 含似长石类岩石可达 1.9—2.2。 $TAS-1b$ 中, 中基性岩 (55—65% SiO_2) 的 K 值由低界—高界一般为 0.4—1.1 (或较大), 其中若 K 为 0.8—1.1 (或 >1.1) 时, 可称为 K 型, 若 K 为 0.4—0.8 时, 可称为 Na 型。亚碱性岩系中, 玄武岩的 $K=0.2-0.4$, 安山岩的 $K=0.5-0.8$, 酸性岩 ($SiO_2>70\%$) 的 $K=1.1-1.6$, $TAS-2$ 大致类似, 但玄武岩的 K 值可达 0.7 (见表 1)。此外, 本区还有一些与 S 型花岗岩有关的堇青石、石榴石火山岩体如江西等地 K 可达 2.0—2.8, 可能为特殊型, 看来, K 值主要由幔源岩浆的含碱性所定, 同时在形成不同岩系的过程中, 又有地壳组分的影响, 同时, 在某些情况下, 岩浆结晶阶段, 特别在晚期或浅深条件下, K_2O 也较易集中, 不同于 S 型花岗岩, K 很少超过 1.5。 K 是一个重要的特征值, 但必须和地质演化情况结合, 进行确定。

(4) 确定火山岩 Al 饱和度的 A 值在火山岩系中, 可随 SiO_2 而有所变化, 一般来说, $TAS-3$ 的玄武岩, $A=0.5-0.7$, $TAS-2$ 及 $TAS-1$ 的玄武岩可依次提高为 0.8—1.0。一般的酸性岩石, A 为 1.0—1.2, 在某些与 S 型花岗岩的 S 型火山杂岩, A 可达 1.5—2.1。它往往被认为源岩组分有关, 此外, 在一定程度上也受岩浆的数量和 H_2O 的活度的影响。高饱和度的 A 值在火山岩系, 似不多见。

综合上述, 由于: 1. 兴安—太行断裂、郯庐断裂带和政和—大埔断裂体系影响所产生的碱性火山岩系列、包括高碱性杆栏粗玄岩系列和亚碱性火山岩系以及它们随断裂连续活动所出现的系列变化 (见表 2); 2. 各时期的火山旋回的, 中基性和中酸性火山岩系中, 同源组分的差异性的 σ 的变化; 3. 普遍出现的富钾钙碱性岩列以及太行、沂沭及扬子中下游的杆栏粗玄武岩系列的存在; 4. K 和 A 的数据说明有较明显的地壳的混合以及地壳重熔的痕迹等, 同时, 零碎的同位素地球化学资料一般也显示出不同程度的壳、幔混合。这些数据与本区的构造格架所表现的深部断裂在中王代各期的再反覆作用 (resurgent action) 及其与火山岩系的时、空分布、系列变化以及晚期转向裂谷型的火山作用; 普遍存在着的地壳基底, 为地球物理所证实, 此外, 除局部的受裂陷控制的狭长区域变质带外, 全区无明显的碰撞构造等组合。初步认为本区中生代的火山岩系是在区域性伸展构造的框架下, 地壳经过不断的拉伸、减薄而引起的地幔上涌所产生的岩浆作用, 火山岩受软流圈不同部位的地幔岩浆的上升, 地壳厚度和组分的控制以及构造特别是断层对上升热流进程的干扰而形成规律的共生组合, 并可用拓扑方法来处理。但这仅是开始, 仍须加以深化, 方能得出确切论断。

表 1: 滨太平洋区的不同岩系 K, A 和 SiO_2 的关系

TAS	50—55% SiO_2	55—60% SiO_2	60—65% SiO_2	65—70% SiO_2	>70% SiO_2
	玄武岩、粗面岩...	安山岩、粗面安山岩...	安山岩、粗面岩...	英安岩、碱流英安岩...	流纹岩、碱流岩...
TAS-1 _a	K=0.8-1.5 K=1.9-2.2 A=0.8-1.3	K=0.8-1.9 ----- A=0.7-1.0	K>1.1 ----- A=0.9-1.0	----- A=1.1	----- A=1.1
TAS-1 _b	K=0.4-0.6 (Na 型) K=0.8-1.0 (K 型) ----- A=0.8-1.0	K=0.5-0.7 (Na 型) K=0.9-1.1 (K 型) ----- A=0.7-1.0	K=0.5-0.7 (Na 型) K>1.0 (K 型) ----- A=0.9-1.0	K=0.9-1.7 ----- A=0.9-1.1	K=1.9 ----- A~1.1
TAS-2	K=0.4-0.7 ----- A=0.8-0.9	K=0.5-0.8 ----- A=0.8-1.1	K=0.6-0.9 ----- A=0.8-1.1	K=0.7-1.3 ----- A=1.0-1.2	K=1.1-1.6 ----- A>1.0
TAS-3	K=0.2-0.4 ----- A=0.7	K=0.5-1.0 ----- A~9	K=0.7-1.1 ----- A=1.0-1.2 (多数为 1.0)	K=0.9-1.1 ----- A=1.0-1.2 (多数为 1.2)	K=1.1-1.9 ----- A=1.0-1.2

表 2. 各火山岩区的 TAS 的大致分布

1. 兴安—太行亚区
兴安 TAS-2($\sigma=2.4-3.6$) → 燕辽 TAS-1_b($\sigma=3.3-5.0$) → 太行南端 TAS-1_b($\sigma=3.5-6.0$) → 太行断裂附近 TAS-1_a($\sigma=9.1-10.1$)。
2. 郅庐—伊兰亚区
吉黑 TAS-2—TAS-3($\sigma=2.0-3.1$) → 胶辽古陆 TAS-1_b($\sigma=3.5-6.1$) → 沂沭断裂 TAS-1_a($\sigma=4.2-8.6$) → 鲁西 TAS-1_b($\sigma=3.7-4.9$) → 扬子中下游 TAS-1_b($\sigma=5.3-10.5$)。
3. 东南亚区
江南古陆、云开—武夷隆起, 主要为 TAS-3($\sigma=1.8-2.3$), 局部有 TAS-2($\sigma=1.8-3.5$) → 南平建瓯 TAS-3($\sigma=1.8-2.6$) → 沿海区 TAS-3($\sigma=1.8-2.8$) → 海滨区 TAS-3($\sigma=1.6-1.8$)。

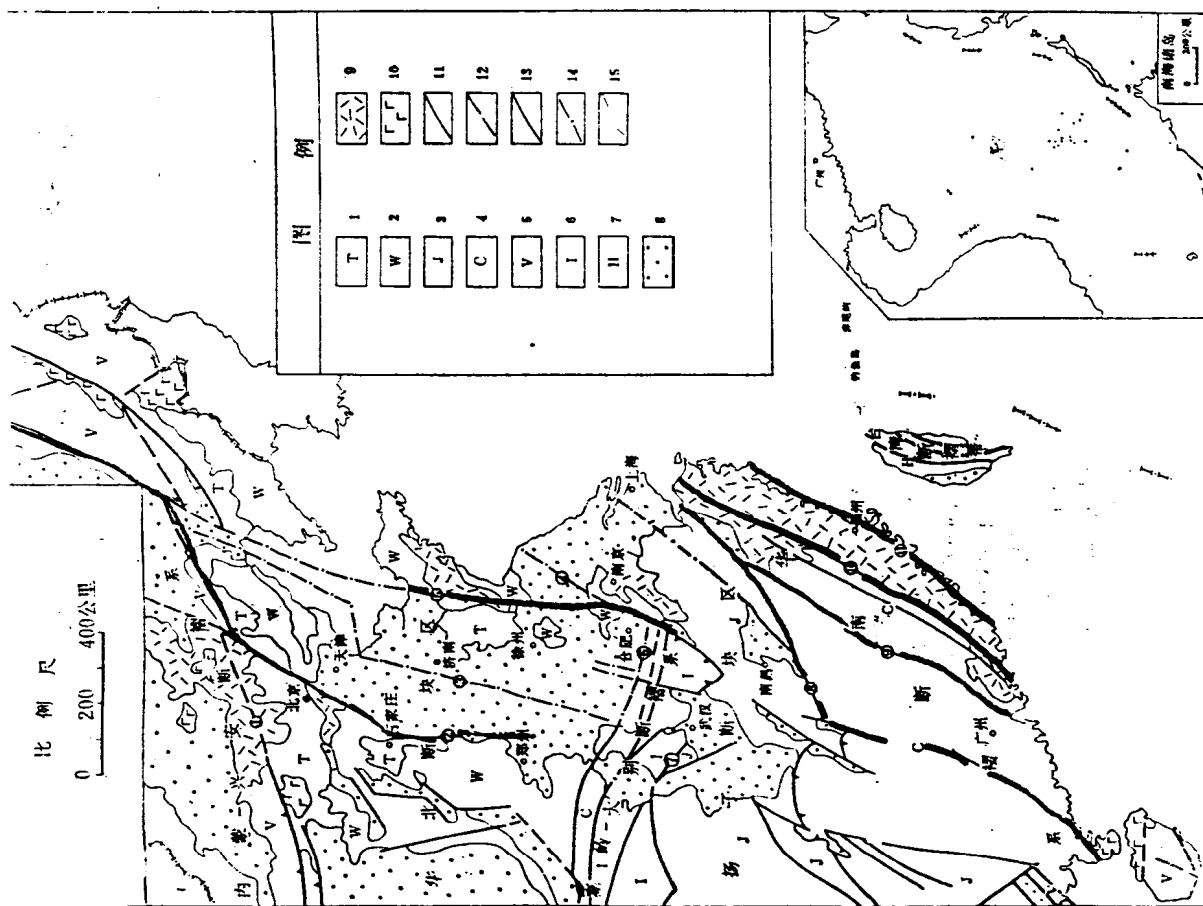


图1 中国东部地区大地构造分区图 (据吴利仁等, 1984)

1. 太行旋迴 (T) 褶皱 (725 亿年); 2. 五台旋迴 (W) 褶皱 (18-17.5 亿年); 3. 九岭旋迴 (J) 褶皱 (9-8 亿年) 4. 加里东旋迴 (C) 褶皱; 5. 华力西旋迴 (H) 褶皱; 6. 印支旋迴 (I) 褶皱; 7. 喜马拉雅旋迴 (X) 褶皱; 8. 中、新生代沉积盆地; 9. 燕山期火山岩; 10. 新生代玄武岩; 11. 断裂; 12. 推測断裂; 13. 逆断层; 14. 隐伏断裂; 15. 地底界线。
- ① 秦岭-北淮断裂; ② 太行山东缘断裂; ③ 天津-兰考断裂; ④ 泰山-响水口断裂; ⑤ 郯-庐断裂; ⑥ 肥东-临山断裂; ⑦ 襄樊-广济断裂; ⑧ 常州-岳阳断裂; ⑨ 鄂武-河源断裂; ⑩ 丽水-海丰断裂; ⑪ 长乐-南澳断裂。

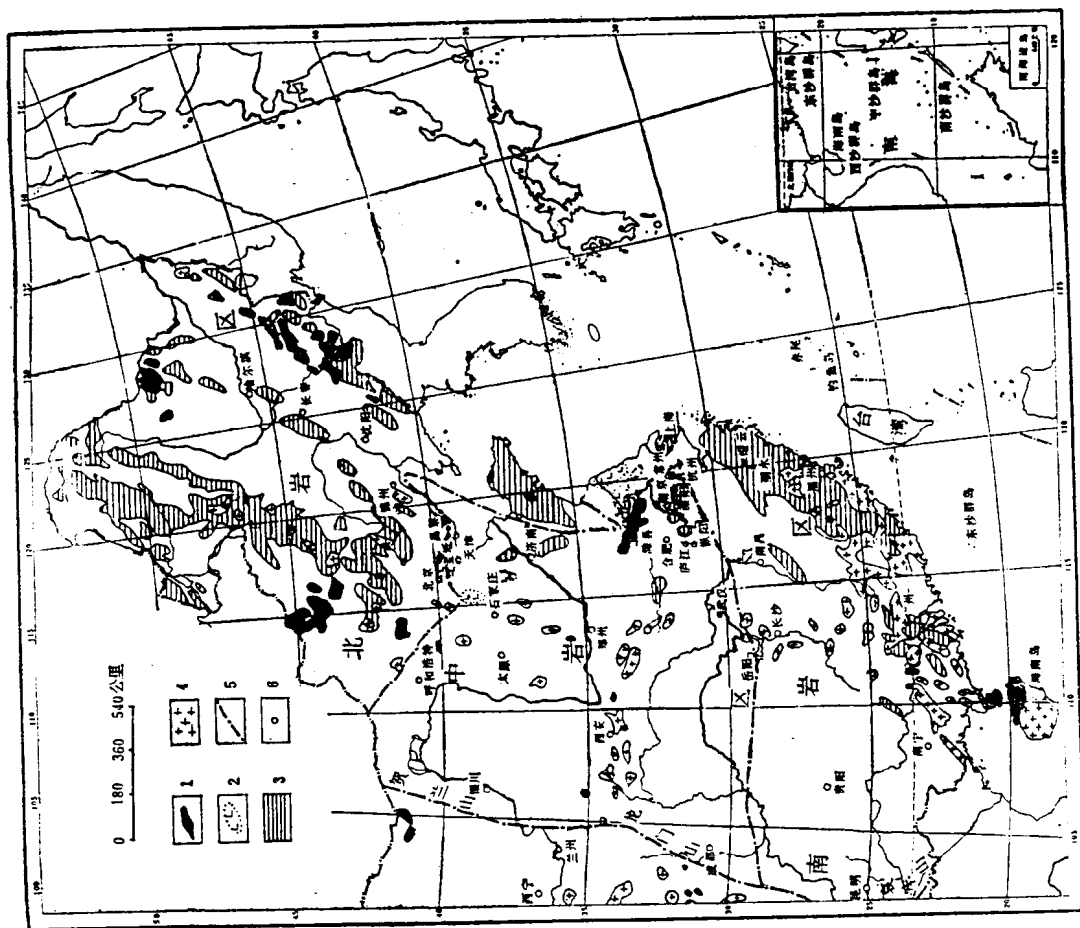


图2 中国东部中生代火山岩分布及岩区划分图 (据吴利仁等, 1984)

- (据中华人民共和国 1:1,000,000 地质图、各省区地质报告及作者的野外资料编制)
1. 出露的新生代火山岩; 2. 隐伏的新生代火山岩; 3. 中生代火山岩; 4. 中生代侵入岩; 5. 岩区界线; 6. 城镇。

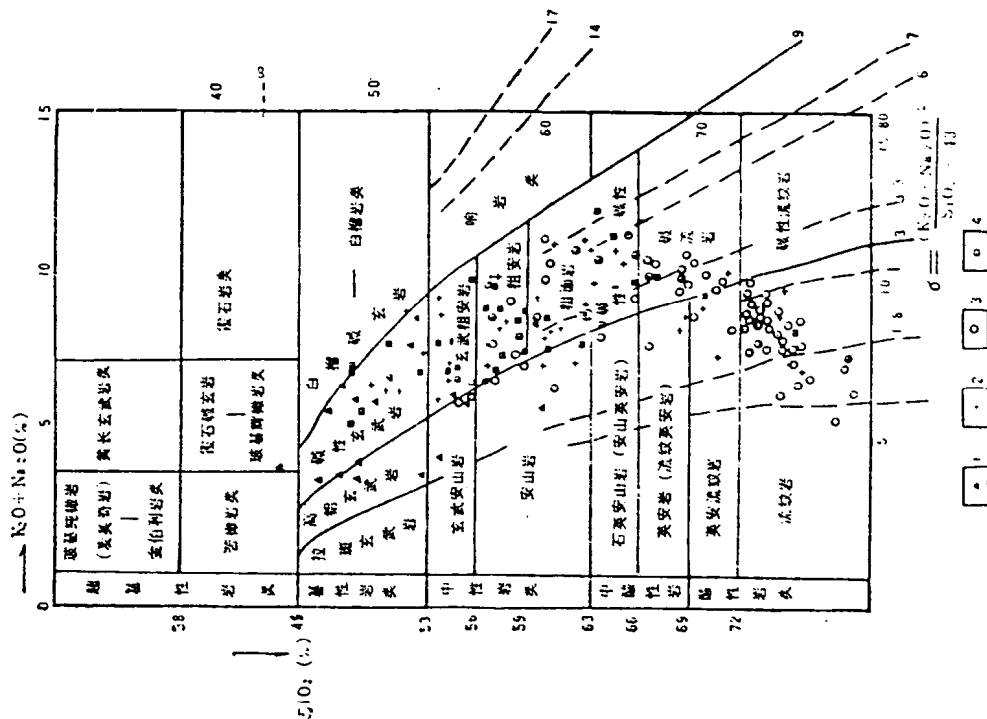


图 3-1 太行区 TAS 图解 (据河北地质志)

1-南大岭, 2-魏家山, 3-张家口, 4-大北沟

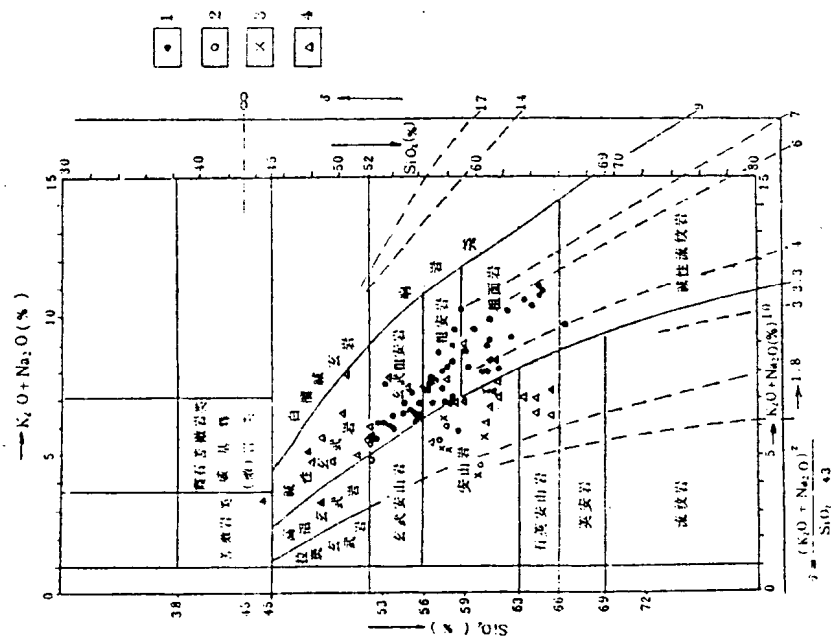


图 3-2 鲁西区 TAS 图解 (据山东地质志)

1-邹平盆地, 2-临朐盆地, 3-莱芜盆地, 4-莱阳盆地, 5-平邑-新县盆地

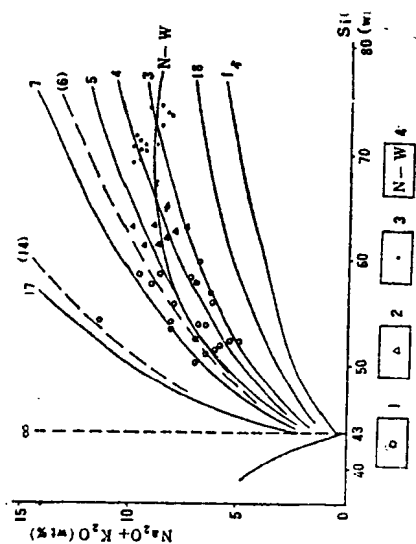


图 3-3 宁芜地区 TAS 图解 (据常印佛等, 1991)

1-闪长玢岩, 2-石英二长岩, 3-花岗岩, 4-N-W 趋向线

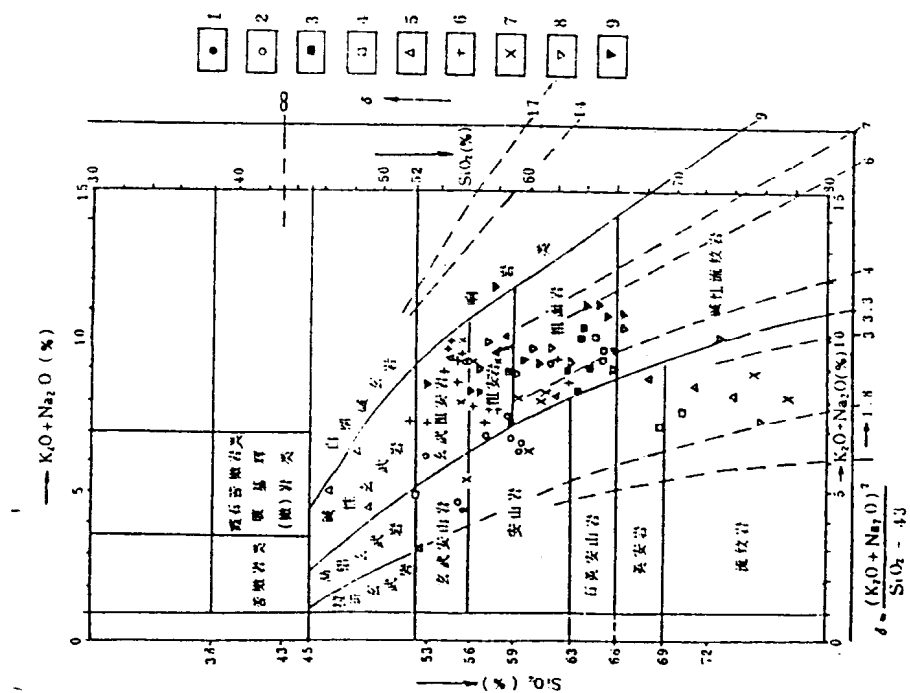


图 3-4 沂沭断裂带区 TAS 图解 (据山东区地质志)

1-濰县地区; 2-沂南地区; 3-郯城地区; 4-临沂地区; 5-郯城地区; 6-五莲地区; 7-莒县地区; 8-莒南地区; 9-临沭地区;

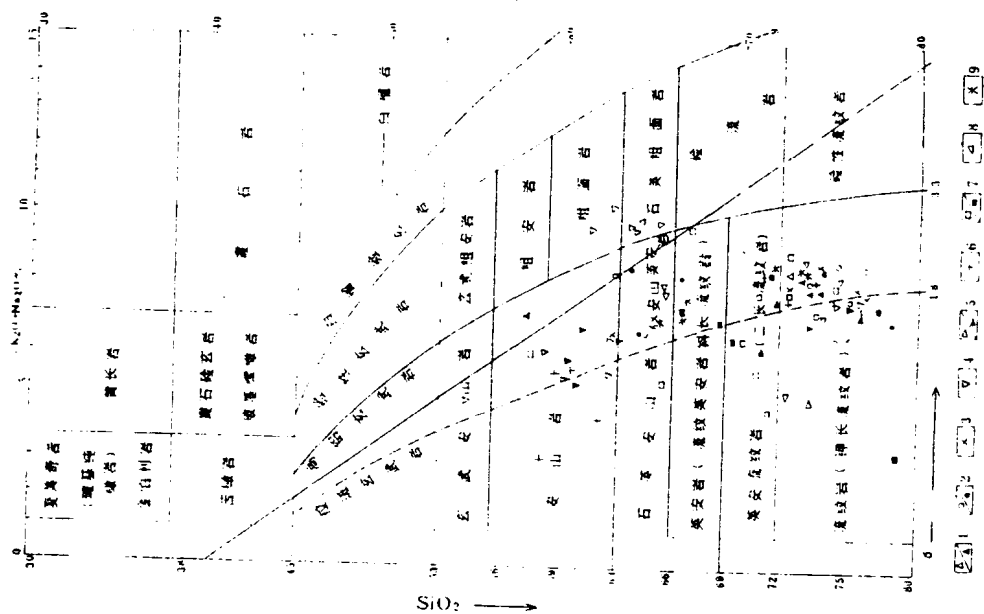


图 3-5 广东 TAS 图解 (据广东区地质志)

1-黄六峰火山岩; 2-义安火山岩/次火山岩; 3-丰稔火山岩; 4-信丰火山岩; 5-七峰山火山岩; 6-次火山岩; 7-新安火山岩; 8-普宁火山岩; 9-后门火山岩

中国滨太平洋区中生代火山岩区的化学成分及某些参数

(引自吴利仁等, 1984, 及福建省及山西省区域地质志)

区 域	岩石名称	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	n	KS	K	A
辽 西	玄武岩	2	51.03	1.50	16.96	3.18	0.07	3.35	7.27	3.98	1.93	0.38	4.4	0.03	0.5	0.8
	粗面玄武岩	2	50.27	1.98	17.33	3.79	0.15	3.38	5.76	4.05	2.53	0.97	6.0	0.05	0.6	0.9
	玢斑玄武岩	1	52.48	2.14	14.88	3.17	0.13	3.79	6.81	4.07	1.54	0.97	3.3	0.03	0.6	0.7
	石英粗面玄武岩	1	50.07	1.70	12.76	8.97	0.38	2.02	4.37	3.32	2.04	0.16	4.1	0.04	0.6	0.8
	安山岩	2	54.15	0.93	16.53	7.32	0.17	2.27	3.87	5.61	2.09	0.93	5.3	0.04	0.4	0.9
	粗安岩	2	55.30	1.44	16.35	5.72	0.17	2.29	4.73	4.58	2.94	0.36	4.6	0.05	0.6	0.9
	石英安山岩	3	56.83	1.40	16.26	6.10	0.25	2.04	3.51	5.12	2.46	0.86	4.2	0.04	0.5	0.9
	石英粗安岩	8	55.68	1.30	15.41	6.20	0.15	2.65	5.54	3.89	2.66	0.54	3.4	0.05	0.7	0.8
	石英安粗岩	14	58.48	1.15	15.76	5.39	0.13	2.25	3.54	4.08	3.57	0.51	3.8	0.06	0.9	0.9
	含似长石安粗岩	1	55.18	1.13	15.67	6.63	0.26	2.82	3.17	5.79	3.96	0.81	7.8	0.07	0.7	0.8
	石英粗面岩	5	64.50	0.76	15.44	3.14	0.08	1.13	1.88	4.66	4.97	0.38	4.3	0.08	1.1	0.9
	含似长石粗面岩	1	53.58	1.37	16.70	8.50	0.29	2.08	3.25	3.90	6.85	0.58	10.9		1.8	0.9
	碱长粗面岩	2	54.67	1.71	16.95	9.07	0.19	2.34	1.62	6.34	2.73	0.73	7.1	0.05	0.4	1.0
	石英碱长粗面岩	1	64.20	0.58	15.71	3.06	0.13	1.29	2.36	5.24	5.78	0.08	5.7	0.09	1.1	0.8
	碱长流纹岩	7	73.88	0.22	12.36	1.88	0.15	0.33	0.59	3.20	5.17	0.03	2.3	0.07	1.6	1.0
	流纹英安岩	3	66.11	0.92	13.13	3.56	0.21	1.00	2.90	3.48	3.02	0.46	1.8	0.05	0.9	0.9
二 燕 山	玄武岩	6	51.40	1.30	17.41	3.54	0.21	3.95	5.88	4.38	1.94	0.43	5.0	0.04	0.4	0.9
	粗面玄武岩	5	51.70	1.26	16.33	6.95	0.16	4.34	6.80	3.86	2.51	0.52	4.6	0.05	0.6	0.8
	安山岩	6	54.72	1.01	17.13	6.48	0.13	3.40	5.61	4.19	1.88	0.47	3.0	0.04	0.5	0.9
	粗安岩	2	55.60	0.09	16.34	5.03	0.14	4.60	5.19	4.68	2.74	0.43	4.4	0.05	0.6	0.8
	石英安山岩	15	57.08	0.99	16.93	5.03	0.12	2.97	5.62	4.27	2.29	0.36	3.1	0.04	0.5	0.9
	石英粗安岩	17	58.19	0.83	16.58	5.13	0.11	2.77	4.57	4.25	2.75	0.43	3.3	0.05	0.6	0.9
	安粗岩	2	56.27	1.07	16.65	5.06	0.12	3.13	4.41	4.85	3.14	0.43	5.0	0.06	0.6	0.9
	含似长石安粗岩	1	51.60	1.13	16.03	8.79	0.17	4.37	7.38	3.81	3.54	0.79	6.1	0.07	0.9	0.7
	石英安粗岩	16	61.97	0.81	16.33	4.00	0.10	1.87	3.18	4.51	3.62	0.27	3.5	0.06	0.8	1.0
	碱长粗面岩	1	63.42	0.68	15.88	2.37	0.06	0.67	1.41	6.20	4.92	0.39	6.2	0.08	0.8	0.9
	石英碱长粗面岩	2	69.61	0.41	14.90	1.69	0.08	0.72	0.77	4.80	5.38	0.09	3.9	0.08	1.1	1.0
	英安岩	1	64.44	0.63	16.95	3.66	0.09	1.93	2.95	4.69	2.46	0.31	2.4	0.04	0.5	1.1
	碱长流纹岩	6	71.66	0.33	13.51	2.41	0.05	0.63	0.62	4.15	4.34	0.09	2.0	0.06	1.0	1.1
	流纹英安岩	1	66.52	0.38	16.13	3.04	0.07	0.95	1.80	4.23	4.13	0.16	2.9	0.06	1.0	1.1

区 域	喷 发 期	岩 石 名 称	样 数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	KS	K	A
太行	王 家 铺	碱长流纹岩	1	75.12	0.08	12.55	1.33	0.42	0.04	0.19	0.45	4.20	5.16	0.04	2.8	0.07	1.23	0.9
		碱性玄武岩	1	50.91	1.88	18.63	3.70	5.19	0.40	2.32	6.96	4.06	1.56	0.44	3.9	0.03	0.38	0.9
	西瓜园	流 纹 岩	2	74.47	0.31	12.83	0.98	0.38	0.05	0.27	0.36	3.81	4.51	0.01	2.2	0.06	1.19	1.1
		粗 安 岩	5	59.28	0.88	16.99	2.88	3.76	0.10	1.24	3.85	4.46	3.89	0.56	4.3	0.07	0.87	0.9
	大 北 沟	安 山 岩	5	57.96	0.93	16.38	3.09	3.69	0.13	2.00	4.77	4.03	3.62	0.50	3.5	0.06	0.91	0.9
		玄武安山岩	11	52.85	1.36	17.09	3.31	4.45	0.59	3.38	5.88	3.63	2.90	0.68	4.4	0.05	0.78	0.9
		玄 武 岩	2	51.69	1.00	14.17	3.13	4.91	0.20	6.52	7.13	3.00	2.83	0.42	3.7	0.05	0.94	0.7
		碱性玄武岩	2	51.54	1.50	14.93	3.46	5.69	0.14	4.39	7.23	4.04	3.11	0.83	5.8	0.04	0.78	0.6
	张 家 口	碱长流纹岩	13	74.41	0.15	12.76	1.24	0.86	0.10	0.23	0.56	4.18	4.74	0.04	2.6	0.06	1.14	1.0
		英安流纹岩	5	71.59	0.16	13.71	1.39	0.79	0.09	0.17	0.86	4.43	4.96	0.04	3.1	0.07	1.12	1.0
		英 安 岩	5	67.92	0.17	13.93	1.44	0.57	0.10	0.80	1.29	3.50	4.04	0.04	3.3	0.06	1.20	1.1
	白 旗	英 安 岩	4	66.68	0.33	14.82	2.63	1.27	0.06	0.85	1.45	4.13	1.63	0.13	2.4	0.02	1.13	1.3
		粗 安 岩	1	55.42	1.25	17.61	3.30	4.18	0.07	1.83	4.30	4.43	3.76	0.69	6.1	0.07	0.85	0.9
		安 山 岩	1	55.18	1.14	16.61	3.23	4.56	0.12	3.42	4.38	4.10	2.29	0.51	3.4	0.04	0.56	1.0
	后 城	碱性玄武岩	1	51.84	1.25	14.79	3.30	5.15	0.14	3.30	5.23	3.50	4.00	0.58	6.3	0.08	1.14	0.8
		流纹质含角砾凝灰岩	1	67.15	0.10	11.46	1.50	0.20	0.04	1.45	4.39	0.14	3.28	0.00	0.8	0.05	4.43	1.0
		流纹质火山角砾岩	2	71.25	0.18	13.34	1.46	0.54	0.05	0.60	1.47	2.74	5.14	0.08	2.2	0.07	1.93	1.1
		英安流纹质角砾凝灰岩	2	67.26	0.13	11.90	1.51	0.36	0.06	1.25	4.01	1.02	3.90	0.01	1.7	0.06	4.21	0.9
		英安流纹质熔结凝灰岩	3	71.86	0.27	13.50	1.85	0.54	0.06	0.51	1.31	3.25	5.33	0.13	2.6	0.07	1.64	1.0
	野 僻 山	英安质熔结凝灰岩	3	67.42	0.35	15.10	1.88	0.52	0.06	0.76	1.93	2.82	6.36	0.09	3.5	0.09	2.66	1.0
		含副长石粗安岩	1	52.54	1.30	15.68	3.33	4.99	0.07	2.66	6.95	3.75	3.28	0.58	4.9	0.07	0.87	0.7
		碱性玄武岩	1	51.89	1.34	14.98	3.36	4.82	0.15	3.42	6.60	2.67	3.59	0.60	4.4	0.05	1.35	0.7
	野 僻 山	玄武安山岩	1	53.12	1.35	15.67	3.39	4.89	0.08	2.61	6.94	3.62	3.04	0.64	4.5	0.06	0.84	0.7

区 域	岩石名称	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	KS	K	Λ
四 鲁 西	玄武岩	2	46.36	1.53	11.47	4.50	0.12	12.53	10.10	2.40	0.95	1.15	3.9	0.02	0.4	0.5
	粗面玄武岩	6	50.89	1.13	14.67	5.22	0.12	6.40	8.94	2.96	2.36	0.57	4.0	0.05	0.8	0.6
	安山岩	3	56.05	0.77	14.94	8.55	0.11	4.74	5.08	4.62	2.31	0.28	3.7	0.04	0.5	0.8
	粗安岩	1	55.08	0.84	16.99	2.98	0.13	4.02	6.29	3.69	3.07	0.40	3.9	0.06	0.8	0.8
	石英安山岩	3	57.38	0.83	16.47	4.40	0.10	3.90	7.05	3.56	2.00	0.34	2.2	0.04	0.6	0.8
	石英粗安岩	4	57.53	0.73	15.79	4.76	0.10	4.55	4.94	3.37	2.69	0.33	2.5	0.05	0.8	0.9
	安粗岩	13	52.90	1.14	15.53	4.88	0.13	5.52	6.73	3.24	3.38	0.66	4.4	0.06	1.1	0.7
	石英安粗岩	8	56.56	0.85	14.86	5.17	0.09	4.05	5.59	3.37	3.78	0.52	3.7	0.07	1.1	0.8
	粗面岩	1	58.88	0.78	17.29	4.66	0.04	0.91	3.61	4.83	5.45	0.38	6.6	0.09	1.1	0.9
	石英粗面岩	4	59.47	0.53	14.43	4.42	0.11	2.37	5.46	3.24	4.93	0.37	4.0	0.08	1.5	0.7
五 沂 沐 断 裂	英安岩	4	61.40	0.74	13.97	4.94	0.07	4.20	5.58	3.12	2.09	0.29	1.5	0.03	0.7	1.0
	流纹英安岩	5	63.61	0.71	14.64	3.99	0.06	2.35	4.13	3.33	3.55	0.41	2.3	0.06	1.1	0.9
	玄武岩	4	49.88	1.37	15.14	5.81	0.25	6.78	7.09	2.87	1.64	0.39	2.9	0.03	0.6	0.8
	粗面玄武岩	1	47.97	1.53	17.23	9.50	0.08	5.71	5.69	3.55	2.97	0.58	6.5	0.06	0.8	0.9
	粗安岩	1	53.06	0.88	16.69	8.19	0.17	3.83	6.68	3.33	3.05	0.32	4.1	0.06	0.9	0.8
	安山岩	2	57.052	0.72	15.69	5.01	0.10	5.68	4.34	3.77	1.70	0.24	2.0	0.03	0.5	1.0
	石英粗安岩	1	55.98	0.99	14.69	3.67	0.10	6.58	6.51	2.74	2.65	0.50	6.7	0.05	1.0	0.8
	安粗岩	7	56.40	1.05	16.83	4.87	0.09	2.83	4.19	4.40	4.41	0.67	6.0	0.08	1.0	0.9
	石英安粗岩	7	58.04	0.85	16.37	4.13	0.11	2.75	4.43	4.05	3.66	0.53	4.0	0.06	0.9	0.9
	粗面岩	1	54.74	0.80	18.53	3.71	0.12	2.88	3.18	4.24	5.75	0.71	8.6	0.11	1.4	1.0
六 鲁 东	石英粗面岩	2	64.87	0.39	17.22	2.39	0.02	0.96	2.07	4.47	5.19	0.27	4.2	0.08	1.2	1.0
	碱长粗面岩	6	57.46	1.02	17.53	5.99	0.09	2.64	2.35	6.42	3.06	0.69	6.0	0.05	0.5	1.0
	石英碱长粗面岩	16	61.73	0.66	16.30	4.91	0.07	2.11	1.49	4.36	5.23	0.34	4.9	0.08	1.2	1.1
	英安岩	1	62.75	0.68	15.42	6.06	0.13	2.70	1.26	4.40	2.70	0.02	2.5	0.04	0.6	1.2
	碱长流纹岩	1	72.98	0.21	13.24	1.21	0.05	0.27	0.64	2.62	5.97	0.05	2.5	0.08	2.3	1.1
	玄武岩	4	50.21	1.34	17.46	7.47	0.09	4.94	7.49	3.50	2.08	0.98	4.5	0.04	0.6	0.8
	粗面玄武岩	2	46.07	1.01	14.99	3.75	0.06	6.02	10.82	2.61	2.11	0.52	7.4	0.05	0.8	0.6
	响英安岩	1	48.06	1.07	14.12	5.22	0.23	2.88	9.90	3.70	4.34	0.78	12.8	0.09	1.2	0.5
	拉斑玄武岩	1	51.07	1.07	15.77	4.78	-	4.01	8.27	2.98	2.10	0.65	3.3	0.04	0.7	0.7
	安山岩	5	55.51	0.67	16.76	5.39	0.13	3.82	5.63	4.45	2.15	0.35	3.4	0.04	0.5	0.8
鲁 东	粗安岩	1	55.62	1.19	17.16	6.33	0.08	2.85	5.10	4.35	3.13	0.33	4.3	0.06	0.7	0.9
	石英安山岩	1	59.07	0.78	17.50	5.68	0.07	2.14	3.61	5.67	2.53	0.34	3.2	0.01	0.4	0.9

区	域	岩石名称	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	KS	K	A
晚侏罗世火山岩及次火山岩平均成分	晚侏罗世火山岩及次火山岩平均成分	花岗岩长斑岩	1	68.09	0.40	14.39	0.46	2.85	0.04	0.86	1.86	3.13	4.84	0.08	2.53	0.07	1.55	1.05
		花岗岩	12	67.73	0.39	15.08	1.53	2.20	0.10	0.93	2.06	3.56	4.78	0.10	2.81	0.07	1.34	1.02
		二长花岗岩	4	68.12	0.43	14.75	1.28	2.36	0.06	1.01	2.30	3.59	4.26	0.10	2.45	0.06	1.19	1.00
		花岗岩	18	73.12	0.26	13.43	1.23	1.23	0.07	0.50	0.98	3.30	4.83	0.09	2.19	0.07	1.46	1.08
		流纹岩	3	76.12	0.18	13.10	0.62	1.09	0.04	0.31	0.47	1.93	4.43	0.04	1.22	0.06	2.30	1.48
		平均	52	65.22	0.58	15.24	1.91	2.95	0.08	1.60	3.26	3.22	4.25	0.17	2.51	0.07	1.32	0.96
		玄武岩	3	51.52	1.54	15.96	6.05	3.26	0.11	4.26	7.47	2.70	2.05	0.61	2.65	0.04	0.76	0.79
		安山岩	13	58.46	1.00	16.78	3.98	3.42	0.11	3.00	5.42	3.33	2.51	0.31	2.21	0.04	0.75	0.93
		英安岩	7	64.88	0.69	15.66	2.90	1.64	0.09	1.44	2.32	3.44	4.86	0.18	3.15	0.07	1.41	1.03
		流纹岩	50	75.07	0.23	12.65	1.33	0.77	0.05	0.25	0.41	3.07	5.24	0.03	2.15	0.07	1.71	1.10
早白垩世火山岩平均成分	早白垩世火山岩平均成分	英安质晶屑凝灰岩	7	65.97	0.52	15.52	1.52	2.46	0.07	1.34	3.10	3.84	3.20	0.13	2.16	0.05	0.83	1.01
		流纹质晶屑凝灰岩	19	73.41	0.29	13.30	1.39	1.11	0.05	0.49	0.85	3.34	4.53	0.04	2.04	0.06	1.36	1.11
		酸性粒状碎斑岩	4	75.36	0.32	12.35	1.18	1.17	0.05	0.20	0.36	2.65	5.08	0.03	1.85	0.07	1.92	1.17
		英安质晶屑凝灰岩	4	65.26	0.56	15.27	2.43	2.46	0.10	1.31	3.17	4.01	3.46	0.14	2.51	0.05	0.86	0.95
		流纹质晶屑凝灰岩	43	73.77	0.26	13.31	1.31	0.94	0.06	0.40	0.58	3.35	4.96	0.04	2.24	0.07	1.48	1.12
		英安质晶屑凝灰岩	3	66.00	0.51	15.45	2.37	1.51	0.07	1.35	2.27	3.53	4.61	0.13	2.88	0.07	1.31	1.04
		流纹质晶屑凝灰岩	13	74.54	0.25	13.16	1.05	1.20	0.05	0.43	0.66	2.98	4.56	0.03	1.80	0.06	1.53	1.19
		总成分平均值	166	67.66	0.56	14.49	2.32	1.81	0.07	1.32	2.42	3.26	4.10	0.15	2.20	0.06	1.26	1.02
		安山岩	1	53.75	0.65	17.49	1.42	5.47	0.09	5.03	5.21	2.14	2.10	0.20	1.67	0.04	0.98	1.15
		石英闪长岩	3	61.77	0.74	16.48	2.22	3.69	0.09	2.53	4.99	3.39	2.58	0.19	1.90	0.04	0.76	0.94
似斑状细粒花岗岩	似斑状细粒花岗岩	辉石石英二长岩	5	63.60	1.04	15.37	2.33	2.96	0.09	1.39	2.46	4.27	5.02	0.33	4.19	0.08	1.18	0.91
		角闪石英二长岩	5	62.80	1.01	15.99	2.24	2.70	0.09	1.42	2.36	4.53	5.34	0.32	4.92	0.09	1.18	0.91
		石英二长岩	3	64.69	0.85	15.93	1.97	2.16	0.06	1.21	2.01	4.93	4.80	0.25	4.36	0.07	0.97	0.94
		二长花岗岩	3	67.41	0.49	16.00	2.01	1.36	0.17	1.02	1.11	4.81	4.39	0.13	3.47	0.07	0.91	1.09
		花岗岩	8	71.50	0.44	13.48	1.67	1.44	0.09	0.46	0.70	3.61	5.42	0.08	2.86	0.08	1.50	1.03
		钾长花岗岩	4	72.56	0.40	13.27	1.83	1.38	0.09	0.38	0.60	3.09	5.32	0.07	2.39	0.07	1.72	1.11
		长石岩	3	75.17	0.15	13.44	1.08	0.36	0.04	0.16	0.45	3.91	4.78	0.05	2.35	0.06	1.22	1.08
		石英正长岩	10	65.57	0.75	15.78	2.11	1.76	0.09	0.92	1.59	4.78	5.59	0.17	4.76	0.09	1.17	0.94
		花岗岩	3	69.47	0.50	14.89	1.85	1.89	0.10	0.65	2.73	4.46	3.21	0.12	2.22	0.05	0.72	0.94
		似斑状细粒花岗岩	2	72.26	0.38	13.86	1.18	1.41	0.08	0.58	1.54	4.22	3.83	0.09	2.21	0.05	0.91	1.00
平均	平均	钾长流纹岩	1	73.22	0.30	13.53	1.42	0.40	0.08	0.52	0.02	3.36	5.90	0.02	2.84	0.08	1.76	1.13
		平均值	51	67.21	0.59	15.04	1.64	2.08	0.09	1.25	1.98	3.96	4.48	0.16	2.94	0.07	1.13	1.01

区 域	岩石名称	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	F _{co}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	KS	K	A
十 沿 海 其 他 地 区	玄武岩	3	49.11	1.80	17.69	7.42	4.04	0.19	3.80	7.87	3.19	1.89	0.41	4.3	0.04	0.6	0.8
	拉斑玄武岩	5	59.39	1.53	15.33	3.19	4.57	0.13	4.60	8.35	2.74	1.27	0.38	2.3	0.03	0.5	0.7
	粗安岩	1	57.30	1.13	16.49	7.21	0.24	0.15	2.88	3.53	5.53	2.43	0.41	4.6	0.04	0.4	0.9
	安山岩	5	56.72	1.53	15.21	4.30	4.70	0.07	3.42	5.26	4.30	0.96	0.09	2.0	0.02	0.2	0.9
	石英粗安岩	11	58.27	0.96	16.75	4.09	3.12	0.08	2.65	4.79	3.67	2.72	0.16	2.7	0.05	0.7	1.0
	石英粗安岩	9	60.28	0.69	15.95	3.13	3.45	0.09	2.28	4.26	3.30	3.95	0.17	3.0	0.07	1.2	0.9
	石英碱长粗面岩	3	60.63	0.77	17.08	4.36	2.38	0.08	1.90	3.90	4.61	2.65	0.08	3.0	0.04	0.6	1.0
	石英粗面岩	1	63.02	0.67	16.67	0.93	4.07	0.07	1.36	2.45	3.74	6.26	0.17	5.0	0.10	1.7	1.0
	英安岩	2	60.37	0.83	16.77	3.03	4.00	0.16	2.81	6.69	2.23	1.39	0.08	0.8	0.02	0.6	1.0
	碱长流纹岩	61	72.86	0.21	13.28	1.65	1.59	0.11	0.40	0.51	3.03	5.15	0.08	2.2	0.07	1.7	1.2
	流纹英安岩	2	67.28	0.40	14.53	1.29	2.94	0.09	0.95	2.52	3.04	4.39	0.13	2.9	0.07	1.5	1.0

