

从岛弧向裂谷的变迁——来自 阿吾拉勒地区火山岩的证据

姜常义 吴文奎 张学仁 崔尚森
(西安地质学院, 西安 710054)

关键词 火山岩 地球化学 岛弧 裂谷

摘要 阿吾拉勒地区早、中石炭世火山岩以碱性系列为主, 少部分属钙碱性系列; 稀土元素具有岛弧和活动陆缘区橄榄安粗岩和高钾安山岩的特征; 微量元素具有大陆型岛弧火山岩的特征。由此而证明本区在早、中石炭世处于内弧环境。二叠纪火山岩属碱性系列; 稀土元素和微量元素明显有板内碱性玄武岩的特征。其岩石组合与肯尼亚裂谷相似, 处于裂谷演化的早期阶段。晚石炭世的博格达运动导致本区从岛弧向裂谷变迁。

在塔里木和准噶尔微板块之间, 曾经存在过北天山晚古生代洋盆^[1]。北天山现存绵延达250km长的蛇绿岩带, 是其最有力的证据^[2]。受此洋盆闭合过程的影响, 天山山脉以石炭纪火山岩分布最广、厚度最大。当该洋盆于石炭纪晚期闭合之后, 塔里木、哈萨克斯坦和准噶尔微板块联为一体, 天山山脉进入了板内体制发展阶段^[3]。在这种构造背景下, 在西天山广阔的地域中, 唯独在阿吾拉勒地区发生了强烈的火山活动。因此, 将该区分别形成于板块体制和板内体制下的石炭纪和二叠纪火山岩加以对比研究, 分析其岩浆动力学过程, 具有独特的地质学和岩石学意义。

1 地质概况与岩相学

阿吾拉勒山体横亘于伊犁地块的北半部(图1), 东西长约200km, 南北宽10—30km。南邻伊什基里克石炭纪碱性火山岩带, 北连中天山北缘活动带。本区出露的主要地层为中下石炭统和二叠系。中、下石炭统厚度均达数千米, 是以火山岩为主体的火山沉积岩系, 以酸性和中性火山岩为主, 火山碎屑岩发育, 并夹有数层强熔结凝灰岩, 基性火山岩较少。喷发环境主要为滨—浅海相。下二叠统基本上由火山岩组成, 厚度达4000m, 属陆相地层, 以角度不整合覆盖于石炭纪地层之上。下部主要是中性和酸性火山岩; 上部则以基性火山岩为主体。上二叠统属磨拉石建造, 夹有少量火山岩, 以玄武岩为主, 尚有一些酸性火山岩, 属典型的双峰式组合。

海西期区域变质仅达葡萄石—浊沸石相, 变形亦很微弱。岩石新鲜, 原生组构清楚。大多数火山岩的气孔和杏仁体发育, 表明其挥发分含量丰富。基性火山岩多呈间粒和间隐

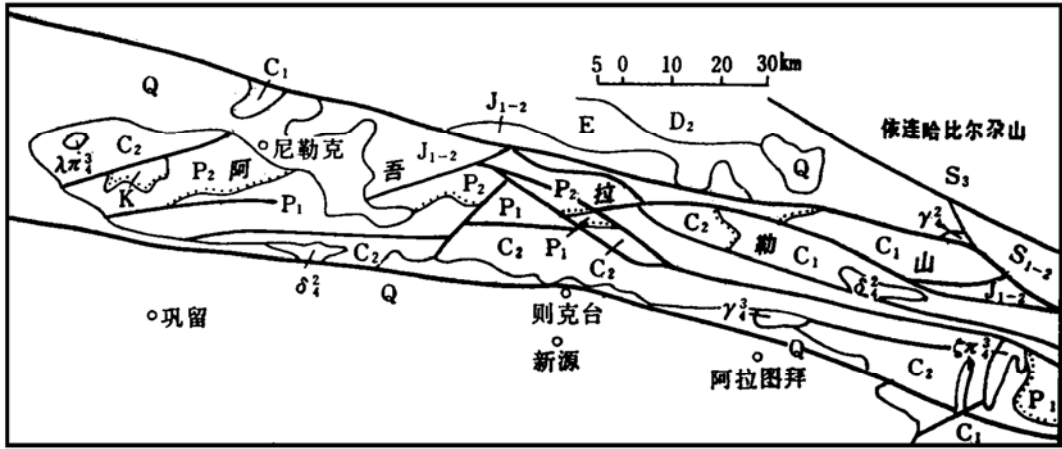


图 1 阿吾拉勒地区地质略图

Fig. 1 Sketch geological map of Awulale area

Q—第四系；E—下第三系；J₁₋₂—下—中侏罗统；P₂—上二叠统；P₁—下二叠统；C₂—中石炭统；C₁—下石炭统；D₂—中泥盆统；S₃—上志留统；S₁₋₂—下—中志留统； γ_1^s —黑云母花岗岩、斜长花岗岩、二长花岗岩； $\xi\pi_1^s$ —正长斑岩； $\lambda\pi_1^s$ —石英斑岩； γ_1^s —花岗岩； δ_1^s —闪长岩

结构，主要由单斜辉石和斜长石组成。富镁辉石和橄榄石少见，说明本区缺乏高镁火山岩和基性程度很高的火山岩。中性火山岩多呈斑状结构，基质呈玻晶交织结构，斑晶主要是斜长石和单斜辉石。中酸性和酸性火山岩均呈斑状结构，基质为霏细结构，斑晶主要是黑云母、斜长石、钾长石和石英。此外，在石炭纪火山岩中尚见有粗面结构。在大量的岩石薄片未见碱性暗色矿物和副长石矿物，可证明本区缺乏过碱性火山岩。在部分岩石薄片，斜长石排号与岩石酸度相对应。如中性岩中出现中长石，说明本区存在亚碱性系列火山岩。可是，在大量的基性和中性火山岩中斜长石排号明显偏低，出现中长石、更长石甚至钠长石，证明本区存在数量较多的碱性系列火山岩⁽⁴⁾。大部分中性和中酸性火山岩中少见钙质角闪石，亦可为之佐证。

2 岩石化学与岩石组合

共分析和收集了169件岩石化学数据，为节省篇幅起见，将各类岩石的平均值列于表1。将这些岩石化学数据投影在图2和图3上，以确定岩石名称和岩石化学系列。此外，将所有的亚碱性火山岩划分为低钾、中钾和高钾三种类型（图4）。还将所有的碱性火山岩划分为钾质类型和钠质类型；若 $\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \geq \text{K}_2\text{O}$ ，为钠质类型，若 $\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \leq \text{K}_2\text{O}$ ，则为钾质类型。与岩相学相对应，岩石化学亦未显示有高镁火山岩和过碱性火山岩。

在下石炭统30件岩石化学数据中，有16件属亚碱性系列，全部为英安岩、流纹岩和熔结凝灰岩。除个别数据属低钾类型外，大部分属高钾和中钾型。属碱性系列的14件样品中，有碱玄岩、橄榄粗安岩、夏威夷岩、安粗岩、歪长粗面岩、粗面岩、粗面英安岩和碱性流纹岩，以基性和中性岩石为主，酸性次之。4件属钠质类型，10件属钾质类型。所以，下石炭统存在三种岩石组合；属钙碱性系列的酸性火山岩套，岩石组合为英安岩—流纹岩；碱

表1 火山岩岩石化学数据表
Table 1 Petrochemical data of volcanic rocks

| 序号 | 岩性 | 样品数 | 时代 | 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 | 灼失 | 总量 |
|----|---------|-----|----------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|
| 1 | 碱玄岩 | 1 | C ₁ | 45.78 | 0.83 | 17.83 | 4.39 | 7.08 | 0.44 | 7.84 | 2.48 | 3.67 | 3.18 | 0.29 | 5.29 | 99.10 |
| 2 | 橄粗安岩 | 1 | C ₁ | 49.80 | 0.92 | 17.75 | 3.27 | 6.96 | 0.19 | 7.90 | 2.69 | 4.28 | 0.70 | 0.14 | 4.90 | 99.56 |
| 3 | 夏威夷岩 | 1 | C ₁ | 49.60 | 1.98 | 15.91 | 1.27 | 7.45 | 0.12 | 4.68 | 8.85 | 3.51 | 1.38 | 0.57 | 3.64 | 98.96 |
| 4 | 歪长粗面岩 | 1 | C ₁ | 55.85 | 0.90 | 16.75 | 6.13 | 3.76 | 0.08 | 3.60 | 1.67 | 7.64 | 1.25 | 0.20 | 2.08 | 99.83 |
| 5 | 粗面岩 | 1 | C ₁ | 58.59 | 1.00 | 15.16 | 4.26 | 2.40 | 0.08 | 3.97 | 0.56 | 4.02 | 6.54 | 0.17 | 3.07 | 99.75 |
| 6 | 安粗岩 | 2 | C ₁ | 57.61 | 0.80 | 15.05 | 3.57 | 3.09 | 0.17 | 4.15 | 4.48 | 3.99 | 4.22 | 0.20 | 2.04 | 99.32 |
| 7 | 粗面英安岩 | 5 | C ₁ | 63.86 | 0.53 | 14.47 | 2.11 | 2.31 | 0.23 | 2.47 | 2.93 | 5.35 | 3.59 | 0.10 | 1.64 | 99.32 |
| 8 | 英安岩 | 4 | C ₁ | 66.31 | 0.72 | 14.03 | 4.05 | 1.26 | 0.07 | 1.32 | 1.99 | 3.12 | 3.31 | 0.18 | 2.24 | 99.34 |
| 9 | 碱性流纹岩 | 2 | C ₁ | 69.01 | 0.57 | 13.40 | 3.13 | 2.42 | 0.08 | 1.82 | 0.72 | 4.74 | 3.36 | 0.15 | 0.72 | 100.10 |
| 10 | 流纹岩 | 12 | C ₁ | 73.18 | 0.33 | 13.31 | 1.50 | 0.73 | 0.07 | 0.50 | 1.21 | 4.13 | 2.70 | 0.14 | 1.88 | 99.56 |
| 11 | 碱性玄武岩 | 6 | C ₂ | 49.18 | 0.94 | 15.52 | 6.89 | 6.93 | 0.29 | 6.66 | 7.96 | 2.89 | 1.54 | 0.19 | 2.52 | 100.33 |
| 12 | 夏威夷岩 | 2 | C ₂ | 48.44 | 0.80 | 18.26 | 4.30 | 6.88 | 0.12 | 7.04 | 2.9 | 4.63 | 0.52 | 0.21 | 4.67 | 99.50 |
| 13 | 钾质粗面玄武岩 | 2 | C ₂ | 46.98 | 1.20 | 14.56 | 7.41 | 5.77 | 0.25 | 8.67 | 5.00 | 3.39 | 1.89 | 0.26 | 3.90 | 99.26 |
| 14 | 响岩质碱玄岩 | 1 | C ₂ | 47.06 | 0.70 | 16.51 | 15.07 | 1.29 | 0.13 | 2.00 | 2.85 | 6.28 | 2.44 | 0.06 | 5.36 | 99.75 |
| 15 | 橄粗玄武粗安岩 | 6 | C ₂ | 49.30 | 0.88 | 17.68 | 6.09 | 5.93 | 0.26 | 5.77 | 2.99 | 3.42 | 3.32 | 0.29 | 5.72 | 99.87 |
| 16 | 橄粗安岩 | 6 | C ₂ | 50.30 | 0.90 | 15.83 | 5.99 | 5.88 | 0.42 | 5.95 | 4.07 | 4.93 | 1.53 | 0.31 | 3.60 | 100.04 |
| 17 | 玄武安山岩 | 2 | C ₂ | 53.64 | 0.94 | 16.15 | 4.72 | 4.48 | 0.27 | 4.6 | 7.37 | 3.41 | 0.93 | 0.16 | 2.54 | 99.18 |
| 18 | 安山岩 | 4 | C ₂ | 57.45 | 0.73 | 15.95 | 2.55 | 5.76 | 0.13 | 6.19 | 1.84 | 4.18 | 0.91 | 0.16 | 4.09 | 99.94 |
| 19 | 安粗岩 | 5 | C ₂ | 57.65 | 0.78 | 16.47 | 4.34 | 2.69 | 0.34 | 3.08 | 4.02 | 3.82 | 3.90 | 0.24 | 1.89 | 99.21 |
| 20 | 粗面岩 | 7 | C ₂ | 62.92 | 0.53 | 15.09 | 2.96 | 2.06 | 0.17 | 1.80 | 1.15 | 4.10 | 5.64 | 0.16 | 2.13 | 99.54 |
| 21 | 英安岩 | 8 | C ₂ | 65.10 | 0.56 | 16.08 | 4.72 | 1.62 | 0.37 | 1.78 | 2.11 | 2.88 | 2.41 | 0.10 | 3.56 | 99.41 |
| 22 | 粗面英安岩 | 8 | C ₂ | 65.30 | 0.59 | 15.14 | 2.59 | 2.52 | 0.11 | 1.76 | 1.19 | 4.88 | 2.84 | 0.20 | 1.98 | 99.58 |
| 23 | 碱性流纹岩 | 21 | C ₂ | 72.05 | 0.29 | 13.24 | 2.30 | 0.74 | 0.07 | 0.58 | 0.62 | 3.69 | 5.22 | 0.09 | 1.10 | 99.95 |
| 24 | 流纹岩 | 20 | C ₂ | 72.47 | 0.30 | 13.26 | 1.85 | 0.98 | 0.06 | 0.91 | 0.92 | 3.67 | 3.38 | 0.09 | 1.89 | 99.68 |
| 25 | 响岩质碱玄岩 | 1 | P ₁ | 47.30 | 1.52 | 15.86 | 7.77 | 1.68 | 0.42 | 4.64 | 5.57 | 2.06 | 6.56 | 0.93 | 4.80 | 99.07 |
| 26 | 夏威夷岩 | 3 | P ₁ | 48.63 | 1.17 | 17.31 | 8.05 | 2.82 | 0.22 | 5.08 | 7.51 | 3.85 | 1.46 | 0.37 | 2.60 | 99.11 |
| 27 | 钾质粗面玄武岩 | 2 | P ₁ | 47.88 | 1.73 | 16.35 | 6.67 | 4.9 | 0.22 | 5.55 | 7.55 | 3.75 | 1.81 | 0.46 | 2.20 | 99.04 |
| 28 | 橄粗玄武粗安岩 | 5 | P ₁ | 50.76 | 1.16 | 16.22 | 6.08 | 3.04 | 0.41 | 5.12 | 5.47 | 3.63 | 3.47 | 0.46 | 4.32 | 99.38 |

续表 1 火山岩岩石化学数据表

Table 1 Petrochemical data of volcanic rocks

| 序号 | 岩性 | 样品数 | 时代 | 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 | 灼失 | 总量 |
|----|---------|-----|----------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|
| 29 | 橄榄粗安岩 | 4 | P ₁ | 50.57 | 1.59 | 15.99 | 9.14 | 1.78 | 0.18 | 2.83 | 6.66 | 5.01 | 2.08 | 0.66 | 3.03 | 99.51 |
| 30 | 安粗岩 | 7 | P ₁ | 54.25 | 0.99 | 16.09 | 5.29 | 2.81 | 0.29 | 3.57 | 4.69 | 3.93 | 4.25 | 0.44 | 2.93 | 99.11 |
| 31 | 歪长粗面岩 | 2 | P ₁ | 55.72 | 1.02 | 15.46 | 6.95 | 2.49 | 0.18 | 2.63 | 3.50 | 6.05 | 2.14 | 0.21 | 2.83 | 99.14 |
| 32 | 粗面岩 | 5 | P ₁ | 63.72 | 0.83 | 15.59 | 3.75 | 1.18 | 0.09 | 1.44 | 2.43 | 5.09 | 4.08 | 0.20 | 2.02 | 99.61 |
| 33 | 粗面英安岩 | 2 | P ₁ | 65.03 | 0.67 | 14.92 | 2.75 | 2.35 | 0.14 | 1.37 | 1.90 | 4.64 | 3.76 | 0.19 | 1.83 | 99.42 |
| 34 | 碱性流纹岩 | 8 | P ₁ | 73.02 | 0.33 | 13.41 | 1.77 | 0.67 | 0.03 | 0.39 | 0.69 | 4.30 | 4.53 | 0.05 | 0.45 | 99.72 |
| 35 | 橄榄玄武粗安岩 | 1 | P ₂ | 47.69 | 1.15 | 13.71 | 5.98 | 2.00 | 0.20 | 4.84 | 12.76 | 3.13 | 2.38 | 0.55 | 4.98 | 99.39 |
| 36 | 橄榄粗安岩 | 2 | P ₂ | 49.60 | 1.42 | 15.51 | 6.67 | 1.62 | 0.13 | 5.21 | 6.92 | 5.59 | 1.99 | 0.48 | 3.82 | 99.33 |
| 37 | 玄武安山岩 | 1 | P ₂ | 51.56 | 1.40 | 16.23 | 7.34 | 2.45 | 0.16 | 4.01 | 9.14 | 2.63 | 1.50 | 0.65 | 2.87 | 99.94 |
| 38 | 安粗岩 | 1 | P ₂ | 52.08 | 2.04 | 15.71 | 7.31 | 1.62 | 0.10 | 4.01 | 5.92 | 4.70 | 3.85 | 0.41 | 1.40 | 99.15 |
| 39 | 钠质粗面岩 | 1 | P ₂ | 65.40 | 0.48 | 16.71 | 1.89 | 1.32 | 0.02 | 1.09 | 3.89 | 5.10 | 2.23 | 0.13 | 1.48 | 100.11 |

性系列钠质类型的岩石组合为夏威夷岩—橄榄粗安岩—歪长粗面岩—粗面英安岩；钾质类型的岩石组合为碱玄岩—安粗岩—粗面岩—粗面英安岩—碱性流纹岩。

在中石炭统92件岩石化学数据中，有32件为亚碱性系列。其中绝大多数为流纹岩、英安岩和相应的火山碎屑岩，仅有2件玄武安山岩和4件安山岩。除个别数据属低钾类型外，绝大多数为高钾和中钾型。在AFM图上，它们呈现出典型的钙碱性岩浆演化趋势。中石炭统的全部基性火山岩、大部分中性火山岩和约占一半的酸性火山岩属碱性系列。主要岩石类型为碱性玄武岩、钾质粗面玄武岩、夏威夷岩、橄榄粗安岩、橄榄玄武粗安岩、安粗岩、粗面岩、粗面英安岩和碱性流纹岩，其中有17件属钠质类型，43件属钾质类型。据此，将中石炭统火山岩划分为三种岩石组合：典型的钙碱性岩套，岩石组合为玄武安山岩—安山岩—英安岩—流纹岩；碱性系列钠质类型火山岩的岩石组合为钠质碱性玄武岩—夏威夷岩—橄榄粗安岩—歪长粗面岩—钠质粗面岩—碱性流纹岩；钾质类型的岩石组合为钾质碱性玄武岩—钾质粗面玄武岩—橄榄玄武粗安岩—安粗岩—粗面岩—粗面英安岩—碱性流纹岩。

在总数为48件的二叠纪火山岩化学分析数据中，只有3件投影到亚碱性区。因此，二叠纪火山岩基本上属碱性玄武岩系列。下二叠统的42件样品中有12件属钠质类型，30件属钾质类型。钠质类型的岩石组合为夏威夷岩—橄榄粗安岩—歪长粗面岩—钠质粗面岩—碱性流纹岩。钾质类型的岩石组合为钾质粗面玄武岩—橄榄玄武粗安岩—安粗岩—粗面岩—粗面英安岩—碱性流纹岩。上二叠统火山岩的分析数据中有3件属钠质类型，2件属钾质类型。钠质类型的岩石组合为橄榄粗安岩—钠质粗面岩；钾质类型的岩石组合为橄榄玄武粗安岩—安粗岩。

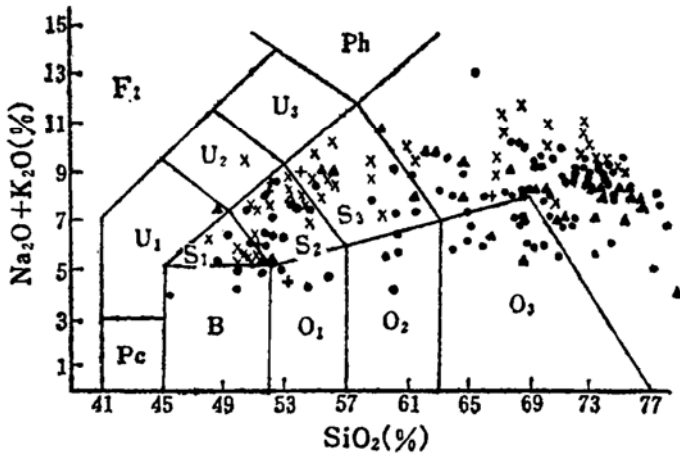


图2 火山岩TAS分类图解⁽⁶⁾

Fig. 2 Diagram showing TAS classification of volcanic rocks

F₁—副长岩, Pc—苦橄岩; U₁—碱玄岩、碧玄岩; U₂—响岩质碱玄岩; U₃—碱玄质响岩; Ph—响岩; S₁—粗面玄武岩; S₂—玄武粗安岩; S₃—粗安岩; T—粗面岩、粗面英安岩; B—玄武岩; O₁—玄武安山岩; O₂—安山岩; O₃—英安岩; R—流纹岩; ▲—下石炭统岩; ●—中石炭统; ×—下二叠统; +—上二叠统

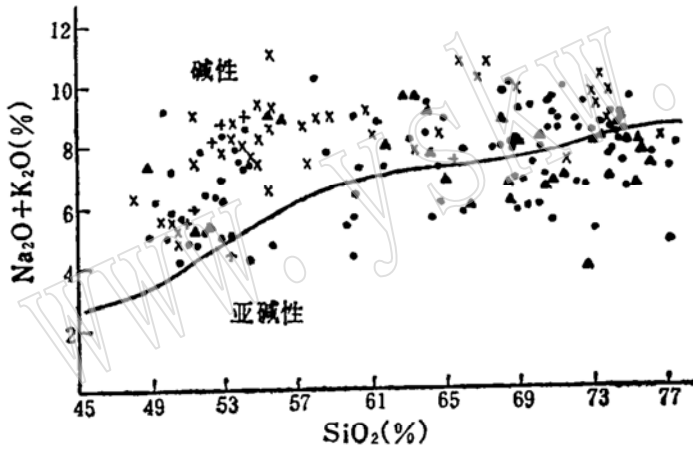


图3 划分火山岩系列的(K₂O + Na₂O)—SiO₂图解⁽⁶⁾ (图中符号含意同图2)

Fig. 3 (K₂O + Na₂O) — SiO₂ diagram for classification of volcanic series

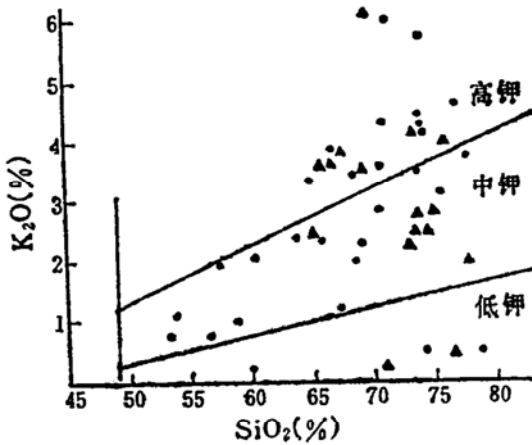


图4 划分亚碱性火山岩钾质类型的钾—硅图解⁽⁷⁾

Fig. 4 K₂O—SiO₂ diagram for classification of potassic types of subalkaline volcanic rock

▲—下石炭统; ●—中石炭统

石炭纪与二叠纪火山岩除了在岩石组合与岩石化学系列方面存在明显的差异之外, 某些元素含量也存在系统的差别。将全部基性和中性火山岩投影到图5和图6上, 尽管有少数点是重叠的, 但依然清楚地表明二叠纪火山岩以相对高钛、高钙和高磷为特征, 其碱金属含量总体上亦相对高一些。相应地, 石炭纪火山岩的 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量则相对低一些。

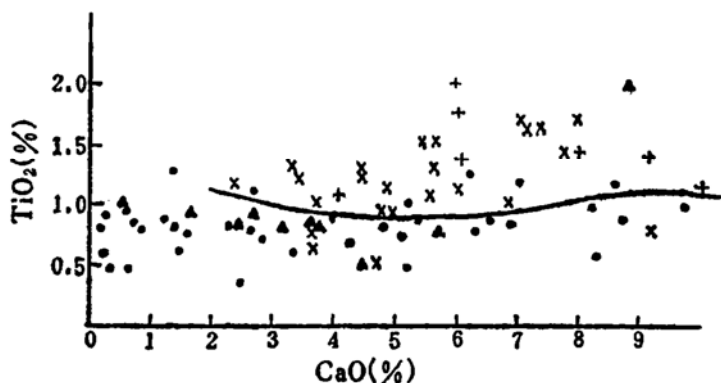


图5 火山岩的 TiO_2 - CaO 图

Fig. 5 TiO_2 - CaO diagram of volcanic rocks

▲—下石炭统; ●—中石炭统; ×—下二叠统; +—上二叠统

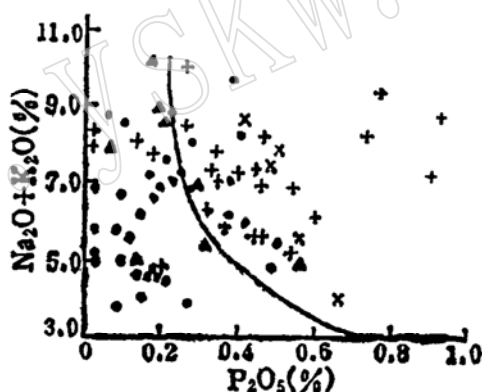


图6 火山岩的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{P}_2\text{O}_5$ 图

Fig. 6 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{P}_2\text{O}_5$ diagram of volcanic rocks

▲—下石炭统; ●—中石炭统; ×—下二叠统; +—上二叠统

3 稀土元素与微量元素地球化学

图7为石炭系钙碱性系列安山岩和流纹岩的稀土元素配分曲线, 总的看来, 它们具有某些明显的共同特征。首先, 它们的配分曲线均为向右倾斜的轻稀土富集型, $(\text{La}/\text{Lu})_n = 5.2-11.0$, 表明它们起源于富集型源区。它们的共同特征是轻稀土相对陡倾, $(\text{La}/\text{Sm})_n = 2.5-3.1$; 而重稀土则相对平坦, $(\text{Ho}/\text{Lu}) = 1.0-1.9$ 。此种曲线特征属典型

的岛弧区或活动大陆边缘区高钾安山岩的特征之一，其含量范围亦与之相符⁽⁸⁾。其次，有弱或微弱的负铕异常，证明它们是经过少量分离结晶作用的演化的岩浆。

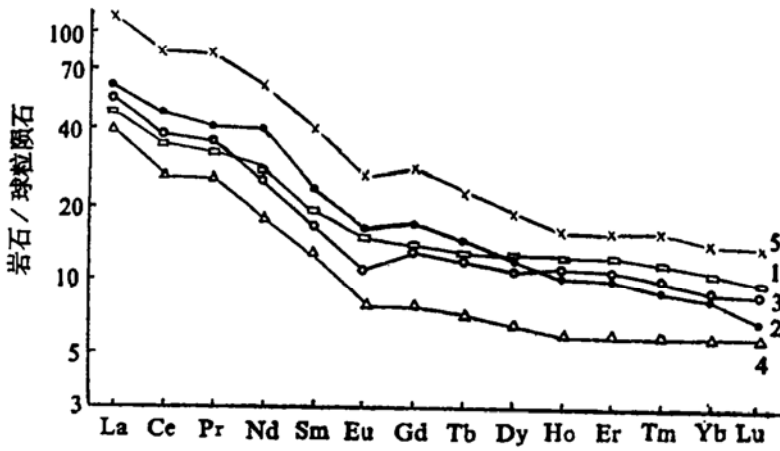


图 2 石炭纪钙碱性系列火山岩稀土元素配分曲线图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of Carboniferous volcanic rocks of calc-alkaline series
曲线右端的数字为表2中的序号

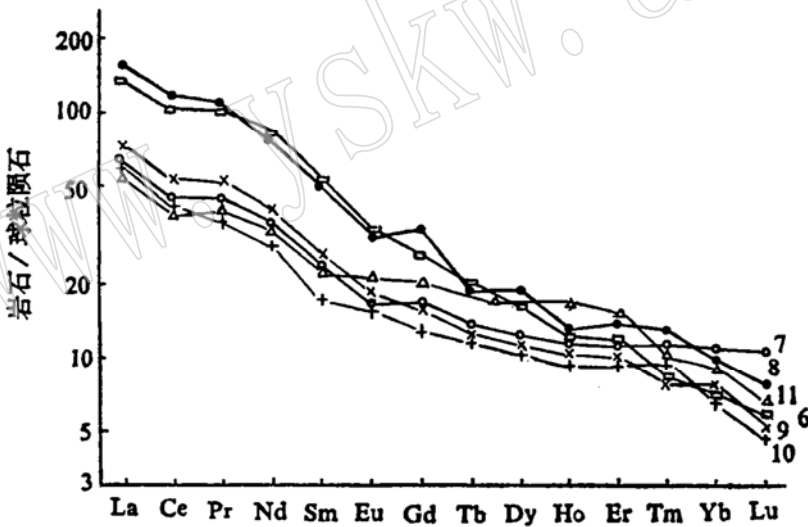


图 8 石炭纪碱质系列火山岩稀土元素配分曲线图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of Carboniferous volcanic rocks of alkaline series.
曲线右端的数字为表2中的序号

图8为石炭纪碱性火山岩的稀土元素配分曲线。其岩石类型分别是安粗岩、橄榄粗安岩、粗面岩和碱性玄武岩。配分曲线均为向右陡倾的轻稀土富集型， $(La/Lu)_n = 5.9 - 22.4$ ，表明其起源于富集型源区。部分样品有弱负铕异常，证明它们是经过少量分离结晶作用的演化的岩浆。碱性玄武岩系列与橄榄粗安岩系列火山岩的稀土元素丰度有较大的重

表2 火山岩稀土元素丰度($\times 10^{-6}$)

Table 2 REE abundances of volcanic rocks

| 序号 | 样号 | 岩性 | 时代 | Ca | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Σ REE | δ Eu |
|----|---------|---------|----------------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|-------------|
| 1 | II-1-7 | 安山岩 | C ₁ | 16.0 | 32.0 | 4.0 | 18.0 | 3.6 | 1.1 | 3.4 | 0.59 | 4.5 | 0.9 | 2.7 | 0.38 | 2.5 | 0.31 | 116.48 | 0.96 |
| 2 | III-1-3 | 安山玢岩 | C ₂ | 22.0 | 43.0 | 5.0 | 27.0 | 4.8 | 1.1 | 4.5 | 0.68 | 5.0 | 0.84 | 2.5 | 0.89 | 2.1 | 0.2 | 140.51 | 0.72 |
| 3 | III-2-1 | 流纹岩 | C ₂ | 17.98 | 34.13 | 4.4 | 15.82 | 3.51 | 0.83 | 3.32 | 0.55 | 3.4 | 0.78 | 2.17 | 0.34 | 1.89 | 0.31 | 109.87 | 0.71 |
| 4 | III-3-1 | 流纹岩 | C ₂ | 13.13 | 23.96 | 3.3 | 11.68 | 2.43 | 0.58 | 2.21 | 0.33 | 1.97 | 0.46 | 1.28 | 0.2 | 1.26 | 0.2 | 76.12 | 0.73 |
| 5 | III-4-1 | 流纹岩 | C ₂ | 40.06 | 73.27 | 9.84 | 37.64 | 8.03 | 1.9 | 7.3 | 1.07 | 5.73 | 1.23 | 3.21 | 0.51 | 2.92 | 0.49 | 223.29 | 0.75 |
| 6 | II-2-3 | 安粗岩 | C ₁ | 45.0 | 93.0 | 12.0 | 51.0 | 9.8 | 2.2 | 6.6 | 0.89 | 5.3 | 0.87 | 2.4 | 0.27 | 1.7 | 0.2 | 259.23 | 0.80 |
| 7 | III-7-2 | 橄揽粗安岩 | C ₂ | 21.31 | 38.88 | 5.24 | 22.42 | 4.61 | 1.19 | 4.39 | 0.62 | 3.55 | 0.81 | 2.3 | 0.37 | 2.16 | 0.36 | 129.14 | 0.78 |
| 8 | III-8-3 | 粗面岩 | C ₂ | 53.0 | 108.0 | 13.0 | 50.0 | 9.5 | 2.15 | 8.4 | 0.88 | 5.5 | 0.94 | 2.8 | 0.42 | 2.1 | 0.25 | 284.54 | 0.79 |
| 9 | III-8-4 | 安粗岩 | C ₂ | 24.0 | 47.0 | 6.1 | 25.0 | 5.1 | 1.3 | 4.0 | 0.57 | 4.1 | 0.75 | 2.2 | 0.25 | 1.7 | 0.17 | 140.64 | 0.73 |
| 10 | III-9-1 | 安粗岩 | C ₂ | 20.0 | 37.0 | 4.2 | 18.0 | 3.3 | 1.3 | 3.3 | 0.55 | 3.6 | 0.65 | 1.9 | 0.29 | 1.4 | 0.16 | 119.65 | 1.2 |
| 11 | III-9-3 | 碱性玄武岩 | C ₂ | 18.5 | 38.0 | 4.8 | 23.0 | 4.6 | 1.6 | 5.2 | 0.79 | 5.1 | 0.95 | 2.8 | 0.33 | 2.1 | 0.22 | 140.99 | 1.01 |
| 12 | I-1-5 | 碱性玄武岩 | P ₁ | 27.0 | 52.0 | 6.0 | 27.0 | 5.0 | 1.4 | 4.0 | 0.58 | 4.1 | 0.78 | 2.1 | 0.25 | 1.7 | 0.18 | 163.09 | 0.93 |
| 13 | I-2-3 | 橄揽粗安岩 | P ₁ | 32.91 | 57.33 | 8.32 | 33.67 | 7.12 | 1.86 | 7.47 | 1.14 | 6.67 | 1.51 | 4.1 | 0.64 | 3.72 | 0.59 | 205.65 | 0.76 |
| 14 | I-4-1 | 碱性流纹岩 | P ₁ | 24.0 | 43.0 | 4.8 | 21.0 | 3.7 | 0.99 | 3.1 | 0.45 | 3.0 | 0.51 | 1.5 | 0.23 | 1.4 | 0.16 | 122.24 | 0.88 |
| 15 | I-5-1 | 碱性流纹岩 | P ₁ | 33.0 | 57.0 | 5.6 | 22.0 | 4.0 | 0.67 | 3.5 | 0.59 | 8.2 | 1.7 | 5.6 | 0.69 | 4.4 | 0.56 | 183.48 | 0.54 |
| 16 | B-14-1 | 橄揽玄武粗安岩 | P ₂ | 45.81 | 104.7 | 13.7 | 53.0 | 9.36 | 2.33 | 6.18 | 0.76 | 3.93 | 0.83 | 2.09 | 0.32 | 1.81 | 0.29 | 265.18 | 0.89 |
| 17 | I-15-1 | 玄武安山岩 | P ₂ | 36.38 | 71.34 | 9.99 | 40.83 | 7.42 | 1.94 | 6.55 | 0.9 | 4.72 | 1.06 | 2.71 | 0.42 | 2.33 | 0.39 | 211.36 | 0.86 |

叠范围，且某些特征相近，有时较难区分。最主要的鉴别标志是前者的重稀土元素丰度较高，且Tb、Dy、Ho、Er、Tm的球粒陨石标准化上限值超过20⁽⁶⁾。石炭纪碱性火山岩的重稀土元素丰度相对较低，其球粒陨石标准化值均低于20，且轻稀土元素丰度及配分曲线特征均与橄榄安粗岩系列特征相符。

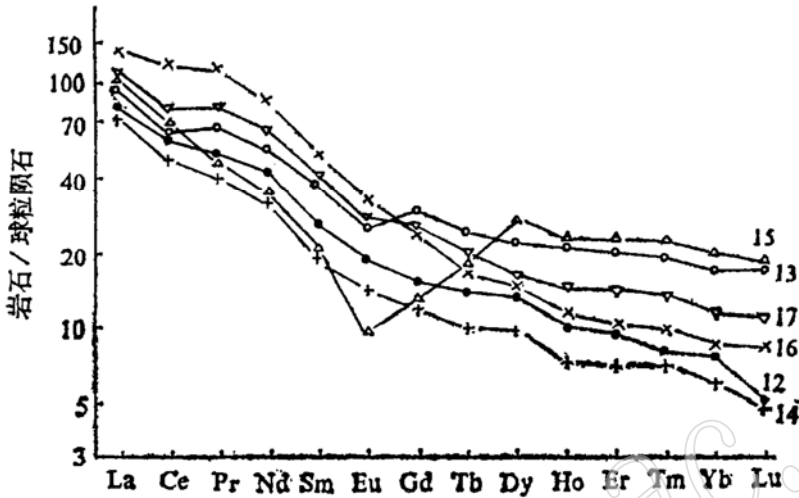


图9 二叠纪火山岩稀土元素配分曲线图

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of Permian volcanic rocks
曲线右端的数字为表2中的序号

图9为二叠纪火山岩的稀土元素配分曲线。其中一件碱性流纹岩的配分曲线呈明显的“V”字形，负锕异常显著。证明二叠纪酸性火山岩中有一部分是经过显著分离结晶作用的高度演化的残余岩浆。其余样品的负锕异常弱，证明其分离结晶作用不明显。配分曲线呈右倾的轻稀土富集型，其 $(La/Lu)_N = 5.7-15.8$ 。二叠纪火山岩稀土元素与石炭纪火山岩稀土元素的最大差异是前者的 ΣREE 总体上偏高(图10)，而且，部分样品的重稀土元素球粒陨石标准化值超过20。因此，它们的稀土元素具有碱性玄武岩系列火山岩的特征。

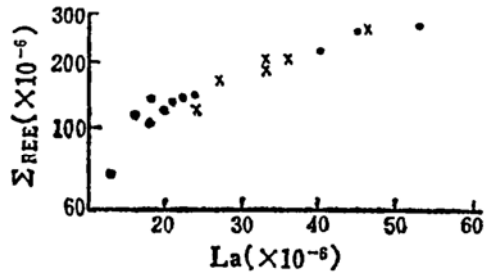


图10 火山岩的 ΣREE —La图解

Fig. 10 ΣREE —La diagram of volcanic rocks

●—石炭系；×—二叠系

图11为石炭纪和二叠纪火山岩具代表性的微量元素配分曲线。石炭纪火山岩的配分曲线表现为从Sr到Th的不断升高和从Th到Zr的持续降低，而Hf又略有富集。从Ti到Cr均为贫化，尤以Ti的贫化为最。除Nb、Ta未贫化外，其余特征均与大洋型岛弧火山岩的特征相同⁽¹⁰⁾。在大陆型岛弧和活动陆缘区，由于岩浆活动受陆壳的影响，一般不显示Nb、Ta的贫化，本区的情况亦复如是。二叠纪火山岩的配分曲线具有典型的板内碱性玄武岩配分曲线的双隆起特征，除Y、Yb贫化，Ti、Cr标准化值为1外，其余元素均不同程度地富集。

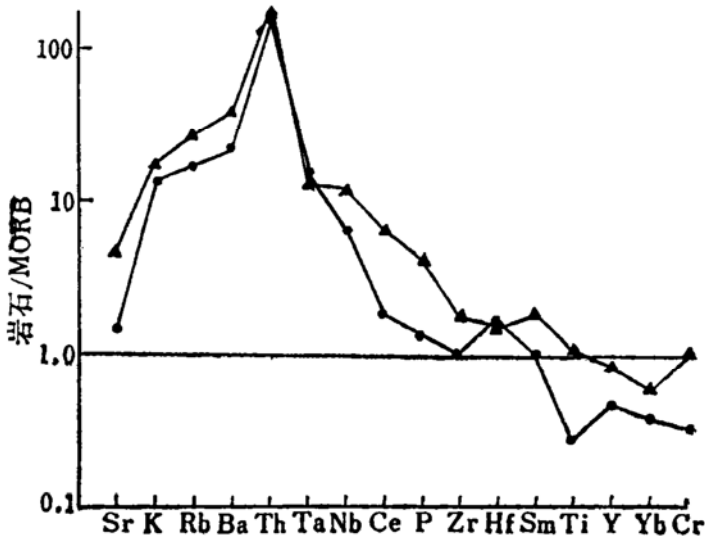


图 11 火山岩的微量元素配分曲线图

Fig. 11 Trace element partitioning curve of volcanic rocks

●—石炭系；▲—二叠系

4 岩浆演化的构造环境

如前所述，本区中、下石炭统既有钙碱性系列火山岩又有大量的碱性火山岩，大多数基性和中性火山岩的 $TiO_2 < 1\%$ 。稀土元素既有造山带中高钾安山岩的特征又有橄榄安粗岩系的特征，微量元素则具有岛弧和活动陆缘区火山岩的特征。所有这些特征和谐而有力地证实了本区在早、中石炭世应处于靠近弧后盆地一侧的内弧（或称后弧）环境。中、下石炭世火山岩特征的同一性，证实了在该时限内构造环境的稳定性和连续性。其火山主弧应位于本区与北天山蛇绿岩带之间的中天山北缘活动带。早、中石炭世火山岩的最主要差别是橄榄安粗岩系列与钙碱性系列的比例。在下石炭统，橄榄安粗岩系列火山岩与钙碱性系列火山岩大体上各居其半。而在中石炭统，则以橄榄安粗岩系列为主，钙碱性火山岩处于从属地位。这清楚地反映了橄榄安粗岩系列主要分布于火山岩地层柱的上部层序，或曰主要处于会聚型板块边缘火山活动的晚期阶段。此为该类环境下火山活动的普遍规律。橄榄安粗岩系列中以钾质类型为主，钙碱性系列中以高钾和中钾型为主，微量元素铷和钽的富集，均证明陆壳对岩浆活动的影响。大离子亲石元素和轻稀土元素的富集至少部分地起源于俯冲板块的脱水作用和部分熔融作用。而碱金属的富集则与海沟带距离的增加、岩浆源区的加深相关联。在图12上，石炭纪火山岩既有投影到岛弧区的，又有投影到板内区的。而在图13上，则全部投影到岛弧区，为上述认识提供了进一步的佐证。

二叠纪火山岩基本上属碱性玄武岩系列，稀土元素与微量元素具有板内碱性玄武岩的特征。晚二叠世火山岩属典型的双峰式组合。由此而证明本区在早、晚二叠世经历过两度拉张。从更广阔的区域看问题，这种拉张作用处于席卷整个天山的晚石炭世博格达运动之

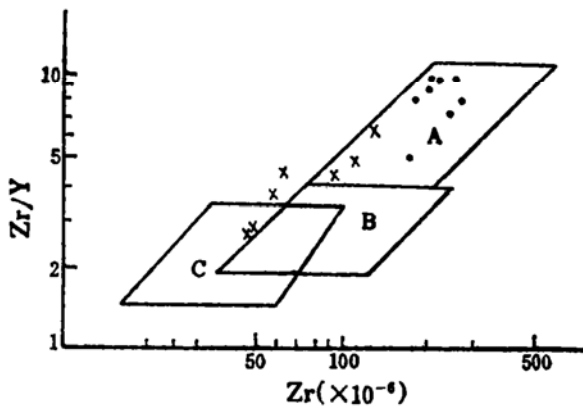
图 12 Zr/Y—Zr图解⁽¹¹⁾

Fig. 12 Zr/Y—Zr diagram

A—板内熔岩; B—洋中脊玄武岩; C—岛弧熔岩; o—石炭系; x—二叠系

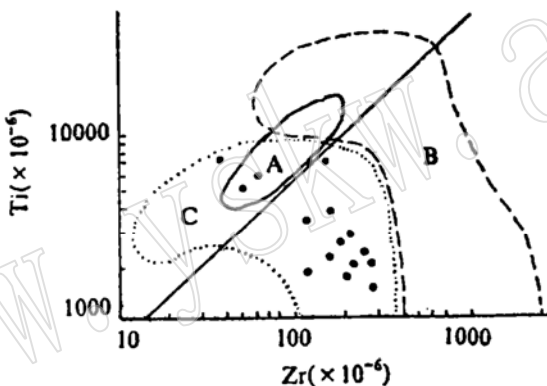
图 13 石炭纪火山岩Ti—Zr新图解⁽¹²⁾

Fig. 13 New Ti-Zr diagram of Carboniferous volcanic rocks

A—洋中脊玄武岩; B—板内熔岩; C—火山弧熔岩

后的应力松弛阶段，是构造体制转换的一种佐证。火山岩中钾质类型的优势地位反映了陆壳基底在这种岩浆活动过程中发挥了重要作用。众所周知，东非裂谷不同地段的岩浆岩组合代表了裂谷演化的不同阶段。肯尼亚以中酸性为主的碱性火山岩组合代表裂谷演化的早期阶段，而埃塞俄比亚的碱性玄武岩—拉斑玄武岩组合代表裂谷演化的中期阶段。本区下二叠统火山岩组合与肯尼亚裂谷相近，证明其处于裂谷演化的早期阶段。中酸性火山岩在下、基性火山岩在上的层序清晰地反映了断裂带和岩浆源区不断向下延伸的演化过程。从早二叠世末期至晚二叠世初期，由于新源运动的影响，拉张型环境转化为挤压型环境，终止了这种火山活动。在晚二叠世中期，又一次出现过短暂的拉张型环境，产生了为数有限的火山岩，断裂带又一度演化为岩石圈断裂。随即又由于尼勒克运动的影响而终止了这种构造岩浆活动。

参 考 文 献

- 1 王作勋, 鄂继易等. 天山多旋回构造演化及成矿. 科学出版社, 1990. 85—99.
- 2 张良臣, 吴乃元. 天山地质构造及演化史. 新疆地质, 1985, 3(3): 1—14.
- 3 陈哲夫, 梁云海. 新疆天山地质构造几个问题的探讨. 新疆地质, 1985, 3(2): 1—13.
- 4 查瓦里茨基 A. H. 蔡毅等译. 火成岩. 地质出版社, 1958. 485—508.
- 5 Le Bas M J, Le Maitre R W, Srecekisen A, Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 745—750.
- 6 Kuno H. Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. *Bull. volcanol.*, 1966, 29: 195—222.
- 7 Le Maitre R W. 王碧香等译. 火成岩分类及术语辞典. 地质出版社, 1991. 40—46.
- 8 Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 1981. 126—132.
- 9 Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 1984. 237—267.
- 10 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 变质岩原岩图解判别法. 地质出版社, 1987. 54—58.
- 11 Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 69: 33—47.
- 12 Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. in: *Andesites* (R. S Thorpe, ed.) 525—547 (J. Wiley and Sons, Chichester), 1982.

The Change from Island Arc to Rift Valley—Evidence from volcanic Rocks in Awulale Area

Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, Cui Shangsen
(Xian College of Geology, Xian 710054)

Key words: Volcanic rock; geochemistry; island arc rift valley

Abstract

The Early and Middle Carboniferous volcanic rocks in Awulale area are mainly of alkaline series, with a small part belonging to calc-alkaline series; rare earth elements show characteristics of kohalaite and K-high andesite in the island arc and active epicontinental region; trace elements exhibit features of continental island arc volcanic rocks. It is thus proved that this area was in an intra-arc environment in Early and Middle Carboniferous. Permian volcanic rocks are of alkaline series; rare earth elements and trace elements manifest features of intra-plate alkaline basalt. The rock assemblage resembles that of Kenya rift valley, being at the early stage in valley evolution. The Late Carboniferous Begeđa tectonic movement led to the change of this area from island arc to rift valley and also to the transformation of Tianshan Mountains from plate framework to intraplate framework.