

川西北甘孜—道孚地区岩浆岩体系的亲缘性研究

孟宪伟 毛华海

(中国科学院矿床地球化学开放研究实验室, 贵阳 550022)

任永云

(冶金部西南地质勘查局, 成都)

关键词 岩浆岩体系 成分数据 变异矩阵 子成分分析 主分量分析

摘要 不同时期、不同类型的岩浆岩, 尽管岩石化学成分的绝对含量不同, 但其数据集的内部结构常常存在着某种成因联系。本文应用成分数据统计分析中的变异矩阵分析、子成分分析和主分量分析研究川西北甘孜—道孚地区华力西期、印支期和燕山期不同类型岩浆岩的亲缘性, 进而探讨其成因联系。

1 研究区岩浆岩体系的基本特征

研究区岩浆活动可分为华力西期、印支期和燕山期。岩浆活动强烈, 分布较广泛, 活动方式有喷发也有侵入, 岩石类型从超基性→基性→中性→酸性岩均有发育, 组成了较完整的岩浆岩演化体系。就活动特点其基本特征可归纳如下(见表1):

表1 鲜水河断裂带甘孜—道孚地区岩浆岩基本特征

Table 1 Basic characteristics of magmatic rocks in Ganze-Daofu area of the Xianshuihe fault zone

活动期次	岩类	出露面积 (km ²)	岩体产状	主要岩石类型	含矿性
燕山期	侵入岩	0.1~36	岩株	角闪花岗岩、二长花岗岩、石英闪长岩、石英二长岩、闪长岩	铁、铜、金、钨、锡
印支期	侵入岩	几平方米~2.16	岩瘤岩脉	辉绿岩、辉长辉绿岩、含长辉橄岩、辉石橄橄岩(辉橄岩)、单斜橄橄岩、橄橄岩	钴、镍、铜、铅、锌、铋、金
	喷出岩		层状	玄武岩、粗玄武岩、橄玄武岩、玄武质凝灰岩、玄武质、火山角砾岩	铜、铋、金、汞
华力西期	喷出岩		层状	玄武岩、橄橄玄武岩、玄武质火山角砾岩	

资料来源于冶金部西南地质勘查局。

1. 华力西期主要为基性喷发活动；印支期岩浆活动以基性喷发为主，次为浅成侵入活动（或次火山活动）；燕山期则以酸性侵入活动为其主要特征。从表面看，岩浆活动趋势是由基性向酸性演化，从以喷发为主向侵入过渡。

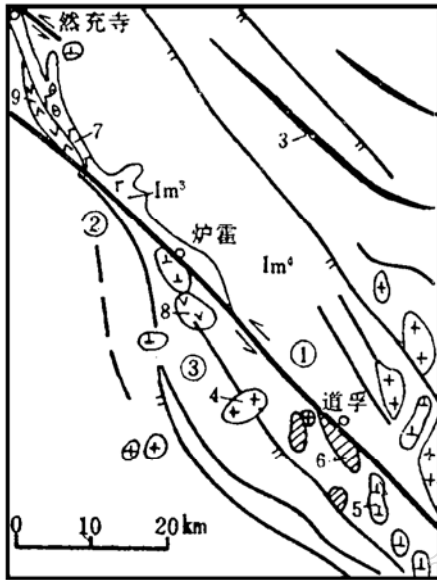


图1 甘孜一道孚地区构造—岩浆岩图
Fig. 1 Schematic tectonic map of Ganze-Daofu area showing distribution of magmatic rocks

Im^3 、 Im^4 —三叠系上统沉积建造；3—褶皱；
①鲜水河断裂，②丘洛断裂，③格底村断裂，
④然充寺断裂；4—燕山期酸性岩；5—燕山期中性岩；6—外来岩块；7—印支期基性侵入岩；
8—印支期中性岩；9—华力西期玄武岩

2. 华力西期基性喷发岩沿炉霍断裂带的丘洛断层南西盘分布于日拉沟尾至蕊达沟；印支期基性喷发岩则沿丘洛断层的北东盘和格底村断层（拉普断层）断续分布，长达160余公里；燕山期侵入岩主要分布在炉霍断裂褶皱带的南段（炉霍—道孚地段），并切割了印支期北北西向构造线。岩浆岩的空间分布明显地受北北西向炉霍构造带的控制，形成一个完整的构造岩浆岩带（如图1）。

不同时期的岩浆岩的含矿性并不相同，与燕山期中酸性岩有关的矿化为铁、铜、金、钨和锡；与印支期基性侵入岩有关的矿化为钴、镍、铜、铅、锌、铋和金，与该期玄武岩有关的矿化为铜、铋、金和汞；华力西期玄武岩与矿化没有明显的关系。很显然，在岩浆岩体系的控制下，各种矿化类型组成了完整的矿化系列。那么不同时期、不同类型的岩浆岩之间是否存在某种成因联系呢？特别燕山期中酸性岩是岩浆分异的产物，还是重熔的结果呢？前人曾进行了大量的岩石化学方面的研究，但仅局限于岩石类型的划分，比如，前人曾得出结论：中酸性岩多为铝过饱和岩类，基性岩多属正常岩类，超基性岩富镁等，但是，都没有进行不

同时期岩石类型之间联系的研究。本文利用成分数据统计分析中的变异矩阵、子成分分析和主分量分析方法探索不同时期岩浆岩的亲缘性。

2 成分数据统计分析方法简介

如果向量由代表某整体的各部分非负元素 x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_n 组成，它显然服从单位和约束条件，即：

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$$

由这样一些向量组成的数据集被称为成分数据。例如，岩石化学分析的各种氧化物组分，在理论上和值为100%，是典型的成分数据。

由于单位和约束条件，成分数据的统计分析方法与经典多元统计分析方法不同，英国统计学家艾奇逊在80年代初发展了一套适用成分数据的统计分析方法，本文只介绍子成分分析和主分量分析。

与经典多元统计分析相类似，成分数据的各种统计分析方法也是以数据的协方差矩阵结构为基础，称之为变异矩阵。因此，我们首先介绍成分变异矩阵。

2.1 成分变异矩阵

成分数据的协方差和均值定义如下：

$$\delta_{ljk} = \text{cov}\{\log(x_i/x_k), \log(x_i/x_l)\}, (i, j, k, l=1, 2, \dots, D)$$

$$\hat{\epsilon}_{ij} = E\{\log(x_i/x_j)\} (i=1, \dots, d, j=i+1, \dots, D, d=D-1)$$

其中， δ_{ljk} 为协方差， $\hat{\epsilon}_{ij}$ 为均值。 δ_{ljk} 又可以表示成对数比方差的代数和形式： $\delta_{ljk} =$

$$\frac{1}{2}(\tau_{li} + \tau_{jk} - \tau_{li} - \tau_{kj})$$

$$\tau_{ii} = \text{var}\{\log(x_i/x_i)\}$$

根据 τ_{ii} 的对称性，即： $\tau_{ii} = \tau_{ii}$ 和 $\tau_{ii} = 0$ ，成分变异矩阵可表示如下：

	1	2	3	d	D	
1	•	τ_{12}	τ_{13}	τ_{1d}	τ_{1D}	方差
2	ζ_{12}	•	τ_{23}	.....	τ_{2d}	τ_{2D}
3	ζ_{13}	ζ_{23}	•	.....	τ_{3d}	τ_{3D}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
d	ζ_{1d}	ζ_{2d}	ζ_{3d}	.....	•	τ_{dD}
D	ζ_{1D}	ζ_{2D}	ζ_{3D}	.....	ζ_{dD}	•
							均值

矩阵中 $\hat{\epsilon}_{ij}$ 和 τ_{ii} 的估计量 $\hat{\epsilon}_{ij}$ 和 $\hat{\tau}_{ii}$ 可由下式计算：

$$N \hat{\epsilon}_{ij} = \sum_{r=1}^N \log(x_{ri}/x_{rj})$$

$$(N-1) \hat{\tau}_{ii} = \sum_{r=1}^N \{\log(x_{ri}/x_{ri})\}^2 - N \hat{\epsilon}_{ii}^2$$

成分变异矩阵具有重要应用价值，首先根据矩阵中 τ_{ii} 的大小，可以在诸组分中确定哪一个组分变异性最大，进而说明样品成分中的特征成分；其次，通过两个成分变异矩阵中对应 τ_{ii} 和 $\hat{\epsilon}_{ij}$ 的对比，可以了解成分变异矩阵的相似性，进而判断它们的亲缘关系。此外，全部 $\frac{1}{2}dD$ 个对数比方差的总和必定提供了成分总体变异性的某种测度，不仅如此，成分变异矩阵又是子成分分析和主分量分析的工具。

2.2 子成分分析

子成分分析是在变异矩阵的基础上，找出最大可能保留成分数据变异性的少数几种组分 ($\ll D$)，因此求子成分的实质就是一种降维标度。

例如在由 A、B、C、D、E、F、G、H、I 组分组成的成分数据中，假定以三元组分做为子成分，那么，只需计算所有 $\tau_{ijk} = \tau_{ij} + \tau_{ik} + \tau_{jk}$ ，从中找出最大的 τ_{ijk} 所对应的组分，即为所求子成分。如果最大的 τ_{ijk} 仍不能代表总体的变异性（考虑 τ_{ijk} 占总体变异测度的比率），尚需计算四元或更多元子成分，但当子成分的组分数接近D时，子成分分析就失去了意义，

此时应该用主分量分析。

2.3 主分量分析

主分量分析与多元统计中的主成分分析的原理和方法完全一致，只是初始矩阵为中心化对数比协方差矩阵 I' ：

$$I' = [\gamma_{ij}] = [(\text{ov}[\log\{x_i/g(x)\}, \log\{x_j/g(x)\}], i, j=1, \dots, D)]$$

$$g(x) = (x_1 \cdot \dots \cdot x_D)^{1/D}$$

求解 I' 特征值和特征向量的过程就称为主分量分析。

3 研究区岩浆岩亲缘性研究

样品取自甘孜一道孚断裂带的华力西期玄武岩、印支期基性侵入岩和玄武岩、燕山期中酸性侵入岩，分析测试由冶金部西南地质勘查局完成（原始数据略）。

理论上，岩石化学数据都应满足单位和条件，但是由于分析灵敏度所限，以及不同岩石烧失量的变化，实际分析数据中，有些组报出率极低，各组分之并不为1，因此，我们选择了九种氧化物组分（ SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O ），并根据单位和约束条件对原始数据进行预处理，即单位化：

$$x'_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^9 x_i} \times 100\%$$

式中 x_i 和 x'_i 分别代表组分 i 单位化前后的含量。

根据前面介绍的方法，分别计算出四种岩石的变异矩阵（见表2，3，4，5）

表2 华力西期玄武岩成分数据变异矩阵

Table 2 Variation matrix of compositional data of Variscan basalt

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
SiO_2	•	0.113	0.054	0.058	0.057	0.237	0.444	0.268	0.230
TiO_2	1.75	•	0.077	0.069	0.084	0.291	0.382	0.057	0.255
Al_2O_3	0.53	-1.23	•	0.024	0.045	0.221	0.438	0.251	0.294
TFe	0.63	-1.12	0.10	•	0.024	0.224	0.437	0.227	0.300
MnO	2.54	0.79	2.02	1.91	•	0.250	0.417	0.222	0.282
MgO	0.82	-0.94	0.21	0.19	-1.72	•	0.653	0.342	0.508
CaO	0.60	-1.16	0.07	-0.033	-1.95	-0.23	•	0.460	0.236
Na_2O	1.25	-0.49	0.74	0.63	-1.28	0.41	0.670	•	0.430
K_2O	1.82	0.07	1.30	1.19	0.72	1.00	0.97	0.56	•

均值

方差

对比四个表中对应元素对的均值和方差，我们可以看出以下几点特征：

- ① 印支期超基性（或基性）侵入体与同期玄武岩的成分数据结构相同，表现在三个方面：a. 对应均值相近；b. 对应方差相近；c. 总变异测度也大致相等，前者14.122，后者为12.011。
- ② 印支期岩浆岩（侵入或喷出）与华力西期同成分玄武岩相比较，二者数据结构的对应值相等，但对应方差不等，前者大于后者。

表 3 印支期超碱性-基性侵入岩成分数据变异矩阵

Table 3 Variation matrix of compositional data of Indosinian ultrabasic-basic intrusive rocks

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
SiO ₂	•	0.381	0.151	0.129	0.126	0.324	0.215	0.681	0.449	方差
TiO ₂	1.67	•	0.245	0.305	0.371	0.750	0.552	0.373	0.303	
Al ₂ O ₃	0.61	-1.06	•	0.136	0.175	0.526	0.306	0.544	0.358	
TFe	0.56	-1.11	-0.05	•	0.133	0.471	0.426	0.617	0.396	
MnO	2.45	0.80	1.85	1.90	•	0.394	0.239	0.690	0.406	
MgO	0.58	-1.09	-0.03	0.02	-1.88	•	0.317	1.018	0.754	
CaO	0.83	-0.84	0.22	0.31	-1.63	0.25	•	0.812	0.521	
Na ₂ O	1.68	0.02	1.08	1.13	-0.78	1.05	0.85	•	0.472	
K ₂ O	2.27	0.61	1.66	1.72	-0.19	1.70	1.44	0.59	•	

均值

表 4 印支期玄武岩成分数据变异数组

Table 4 Variation mathematical array of compositional data of Indosinian basalt

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
SiO ₂	•	0.233	0.078	0.075	0.105	0.304	0.119	0.288	0.599	方差
TiO ₂	1.78	•	0.228	0.180	0.219	0.469	0.301	0.313	0.631	
Al ₂ O ₃	0.56	-1.23	•	0.084	0.167	0.332	0.177	0.281	0.553	
TFe	0.63	-1.15	0.07	•	0.110	0.327	0.183	0.307	0.582	
MnO	2.48	0.70	1.94	1.85	•	0.301	0.141	0.382	0.428	
MgO	0.72	-1.06	0.17	0.10	-1.76	•	0.283	0.566	0.735	
CaO	0.67	-1.11	0.12	0.03	-1.81	-0.05	•	0.411	0.676	
Na ₂ O	1.37	-0.416	0.81	0.74	-1.12	0.61	0.69	•	0.546	
K ₂ O	2.13	0.353	1.58	1.50	-0.39	1.41	0.46	0.77	•	

均值

表 5 燕山期中酸性岩成分数据变异数组

Table 5 Variation mathematical array of compositional data of Yanshanian intermediate-acid rocks

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
SiO ₂	•	0.137	0.057	0.216	0.201	0.174	0.225	0.085	0.167	方差
TiO ₂	2.02	•	0.120	0.154	0.123	0.090	0.139	0.196	0.268	
Al ₂ O ₃	0.61	-1.41	•	0.214	0.188	0.152	0.236	0.291	0.204	
TFe	1.02	-0.97	0.42	•	0.088	0.096	0.095	0.293	0.349	
MnO	2.77	0.75	2.16	1.74	•	0.069	0.070	0.226	0.348	
MgO	1.24	-0.76	0.65	1.23	-1.51	•	0.094	0.236	0.312	
CaO	1.05	-0.97	0.47	0.016	-1.72	-0.21	•	0.288	0.375	
Na ₂ O	1.48	-0.54	0.94	0.44	-1.29	0.22	0.43	•	0.154	
K ₂ O	1.21	-0.81	0.60	0.18	-1.56	-0.05	0.16	-0.26	•	

均值

③ 燕山期中酸性岩的成分数据均值与印支期和华力西期的数据中的对应均值均不相同,其方差与印支期也不相近,但却与华力西期相近。

根据以上几点,我们初步得出结论:

- ① 印支期两种基性岩(侵入和喷出),成分相同、变异性相同,具有同源和相同的演化历史。
- ② 印支期基性岩与华力西期玄武岩,成分相近,说明了具有同源性;变异性不同,说明演化史不同,前者受到热事件的改造,而使变异性增大。
- ③ 燕山期中酸性岩与印支期基性岩成分不同、变异性不同,说明二者没有亲缘性,但与华力西期的变异性相当,说明它们的演化历史是相近的,都没有受到热事件的影响,因此我们说燕山期中酸性岩并非岩浆演化分异的结果,可能是深部地壳的重熔,许志琴(1992)证实了这一点。

为了进一步考察不同时期岩浆岩之间的相互联系,我们用常规的三角图法来考察样品点之间的位置关系,但三个端员组分是用子成分分析方法确定的。

表6是上述三个时期岩浆岩的整体成分变异数组。根据前面介绍的算法,求出五元子成分为MgO、Na₂O、K₂O、TFe和TiO₂,其变异性测度为3.884,占总变异性测度的25.5%(总测度为15.122)。与AFM相比,该子成分强调了TiO₂的作用。由于TiO₂含量较少,所以与TFe组成端员组分TFe·TiO₂,另外二个端员组分为Na₂O+K₂O和MgO。如图2,在(K₂O+Na₂O)—MgO—TFe·TiO₂三角图中,可以看出如下几点特征:

表5 甘孜—道孚地区岩浆岩成分变异矩阵

Table 6 Compositional variation matrix of magmatic rocks in Ganze-Daofu area

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
SiO ₂	•	0.283	0.099	0.249	0.197	0.396	0.276	0.420	0.615	方差
TiO ₂	1.82	•	0.232	0.212	0.237	0.490	0.358	0.365	0.722	
Al ₂ O ₃	0.58	-1.21	•	0.241	0.206	0.439	0.302	0.379	0.601	
TFe	0.74	-1.08	0.15	•	0.125	0.321	0.326	0.477	0.787	
MnO	2.57	0.75	1.99	1.83	•	0.307	0.208	0.485	0.747	
MgO	0.85	-0.97	0.27	0.12	-1.71	•	0.342	0.706	0.952	
CaO	0.82	-1.00	0.25	0.12	-1.75	-0.03	•	0.540	0.784	
Na ₂ O	1.48	-0.34	0.92	0.74	-1.09	0.61	0.66	•	0.601	
K ₂ O	1.85	0.03	1.27	1.12	-0.72	1.00	1.03	0.37	•	

均值

① 燕山期中酸性岩、印支期基性岩自成一集合(其中印支期又分成两个子集合),华力西期与燕山期和印支期样品的一部分混成一群。

② 混合群恰好位于三个独立群的核心部位。

从以上样品点的分布规律,我们可以得出结论:三个时期的岩浆岩彼此分离(自成群体),又彼此联系(群体之间有交集),而交集恰为华力西期玄武岩分布域,可见华力西期玄武岩对后期的印支期和燕山期岩浆的形成都有影响,这与前面的变异数组分析结论相一致。

但是,子成分MgO、TFe、K₂O、Na₂O和TiO₂所保留的变异程度较小(25.5%),损失

的信息较多，尚需用主分量分析对上述结论进一步验证。

主分量分析的目的也是为了降维，但是，与子成分分析相比，前者常常以更少的因子、却更大程度地反映原始数据结构的变异性。根据中心化对数比公式，计算出研究区三个时期岩浆岩成分数据中心化对数比协方差矩阵 F' （如表 7）。

表 7 岩浆岩成分数据中心化协方差矩阵

Table 7 Covariance matrix of centralized compositional data of magmatic rocks

γ_{ij}	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
SiO ₂	0.097	-0.025	0.045	-0.017	-0.004	-0.023	-0.009	-0.034	-0.030
TiO ₂	-0.025	0.137	-0.047	0.022	-0.004	-0.050	-0.030	0.014	-0.063
Al ₂ O ₃	0.045	-0.047	0.093	-0.015	-0.010	-0.047	-0.024	-0.016	-0.025
TFe	-0.017	0.022	-0.015	0.119	0.044	0.026	-0.023	-0.052	-0.105
MnO	-0.004	-0.004	-0.010	0.044	0.094	0.020	0.024	0.068	-0.097
MgO	-0.023	-0.050	-0.047	0.026	0.020	0.254	0.037	-0.099	-0.120
CaO	-0.009	-0.030	-0.024	-0.023	0.024	0.037	0.163	-0.061	-0.081
Na ₂ O	-0.034	0.014	-0.016	-0.052	0.068	-0.099	-0.061	0.256	0.057
K ₂ O	-0.030	-0.063	-0.025	-0.105	-0.097	-0.120	-0.081	0.057	0.460

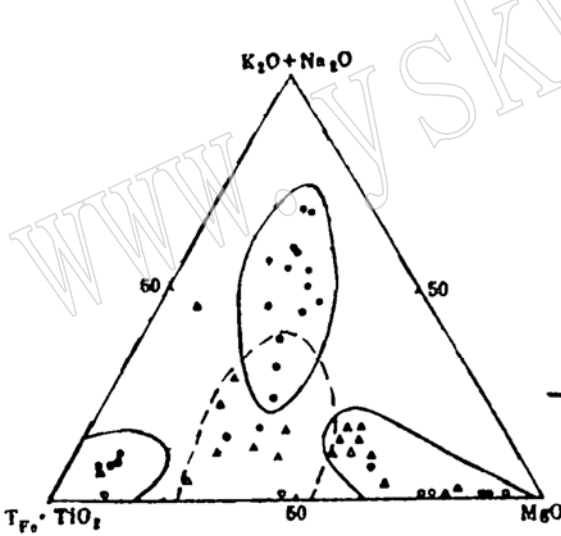


图 2 (K₂O + Na₂O) - TFe·TiO₂ - MgO三元图

Fig. 2 (K₂O + Na₂O) - TFe·TiO₂ - MgO ternary diagram

- ▲—华力西期玄武岩；△—印支期基性侵入岩；
- 印支期玄武岩；●—燕山期中酸性岩

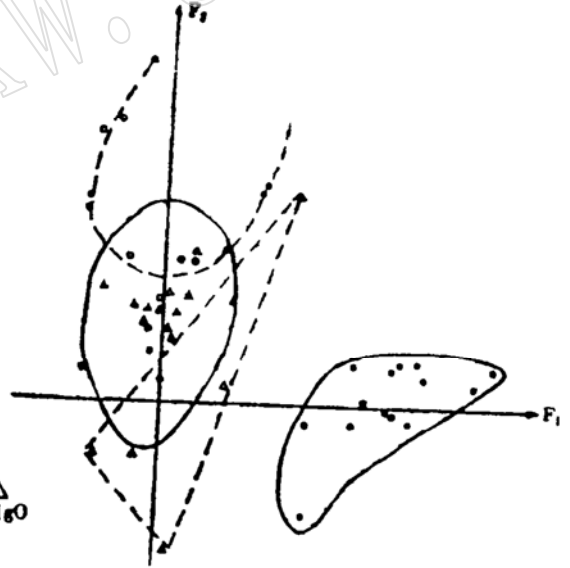


图 3 华力西、印支、燕山三个时期岩浆岩样品主要分析F₁-F₂得分图

Fig. 3 F₁-F₂ score diagram of principal component analysis for magmatic rocks of Variscan, Indosinian and Yanshanian periods

图例同图 2

求解该对称矩阵前两个最大特征值所占的变异性测度百分比为63.3%，因此，可用它们对应的特征向量做为主分量F₁和F₂：

$$F_1 = 0.434K_2O + 0.380Na_2O - 0.298CaO + 0.191MgO - 0.126MnO + 0.198TFe + 0.159Al_2O_3 - 0.165TiO_2 + 0.126SiO_2$$

$$F_2 = 0.543TFe + 0.494MgO + 0.375TiO_2 - 0.287K_2O - 0.298Na_2O + 0.176CaO + 0.059MnO + 0.114Al_2O_3 + 0.108SiO_2$$

把 F_1 、 F_2 因子在各样品上的得分落在 F_1 - F_2 坐标图中(图3),便可以根据样品点的分布规律考察不同时期岩浆岩的相互关系。

从图3中可以看出,在 F_1 轴上,燕山期样品集成椭圆状群;在 F_2 轴上印支期玄武岩和侵入岩大部分样品也形成椭圆状群,但较少部分玄武岩样品却呈抛物状分布。以上两点说明印支期和燕山期群体是正交的,表示了二者没有成因联系,玄武岩样品是二次函数形式演化的。华力西期样品却分散于两个群体之间,说明华力西期岩浆活动对印支期和燕山期岩浆活动都有影响,这与前述两种方法得出的结论完全吻合。

成分数据统计分析结果表明,华力西期岩浆岩尽管分布较少,但它却是后期派生印支期岩浆岩之源,同时也是燕山期中酸性岩形成的重熔之源。矿化系列的形成本质上也与华力西期岩浆岩密不可分。

参 考 文 献

- 1 周蒂等译,成分数据的统计分析,武汉:中国地质大学出版社,1989.
- 2 许志琴等著,中国松潘-甘孜造山带的造山过程,北京:地质出版社,1992.
- 3 四川省地质矿产局,四川省区域地质志,北京:地质出版社,1991.

A Study on the Affinity of the Magmatite System in Ganze-Daofu Area, Northwestern Sichuan

Meng Xianwei, Mao Huahai

(Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Academia Sinica, Guiyang 550002)

Ren Yongyun

(Yunnan Bureau of Geological Exploration, Ministry of Metallurgical Industry, Chengdu)

Key words: magmatite system, compositional data, variation matrix, subcomposition analysis, principal component analysis

Abstract

Magmatic rocks of various periods and types, though different in absolute contents of chemical components, exhibit certain genetic connections in their inner structures of data set. Using variation matrix analysis, subcomposition analysis and principal component analysis which all belong to the statistical analytic methods of compositional data, the present paper has studied the affinity of different types of magmatic rocks formed in Variscan, Indosinian and Yanshanian periods in Ganze-Daofu area and, furthermore, dealt tentatively with their genetic connections.