

北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系 岩浆性质的确定*

夏林圻 夏祖春 彭礼贵 任有祥
杨静华 张 诚 李智佩 王兴安

(中国地质科学院西安地质矿产研究所)

关键词: 古岛弧; 钙碱性玄武岩系; 拉斑玄武岩系; 橄辉玄武岩系; 岩浆包裹体

提 要: 北祁连山石灰沟地区发育一套完整的奥陶纪岛弧火山岩系。中奥陶世始岛弧形成, 初期为拉斑玄武质岩浆喷发, 尔后以钙碱性火山活动为主, 至中奥陶世末岛弧演化成熟, 产生橄辉玄武质火山作用。

一、前言

北祁连山早古生代海相火山岩分北、中、南三个构造-火山岩带, 主要岩石为细碧-角斑质火山岩系。唯有中带在甘肃省天祝县和永登县境内产出一套特征的细碧岩(含极少量角斑岩)碱性火山岩岩石组合, 出露范围西起马雅雪山的石门寺, 向东经石灰沟至火石洞沟一带, 断续延伸26km。其中碱性火山岩发现于本世纪七十年代末期^[1], 它们和中奥陶世细碧质火山岩密切共生, 在永登县中堡镇之北的石灰沟地区出露最为完整。若根据岩石化学成分在 Le Bas 等人^[2]“火山岩化学分类 TAS 图”中的位置, 该区碱性火山岩包括有粗面玄武岩、橄辉玄粗岩(Shoshonite)、粗面安山岩和响碱玄岩等, 统属于岛弧橄辉玄粗岩系, 是北祁连山早古生代古岛弧曾经历过完善发展、成熟演化的重要标志。本文拟从岩石学、矿物学、微量元素地球化学及岩浆包裹体化学特征等方面, 确定该区海相火山岩系的岩浆性质, 论述其对于北祁连山古岛弧体系演化的贡献。

二、岩石学简述

从石灰沟中奥陶世海相火山岩地质剖面(图1)可以看出, 该区共有四次喷发旋回: 第一旋回为细碧质火山爆发, 旋回末有少量熔岩喷溢; 第二旋回由细碧质火山爆发转变为细碧质(极少量角斑质)熔岩喷溢, 枕状构造发育, 显示了水下溢流的特点; 第三旋回以细碧质火山爆发为主, 间夹溢流活动。尔后, 火山活动相对宁静, 沉积近500m的碳酸盐岩, 间或有零星细碧质火山爆发活动。最后, 第四旋回以碱性火山爆发和喷溢告终。

按岩石化学和矿物成分, 本区海相火山熔岩可以分为细碧岩类和碱性火山岩类两大类;

* 国家自然科学基金资助项目。

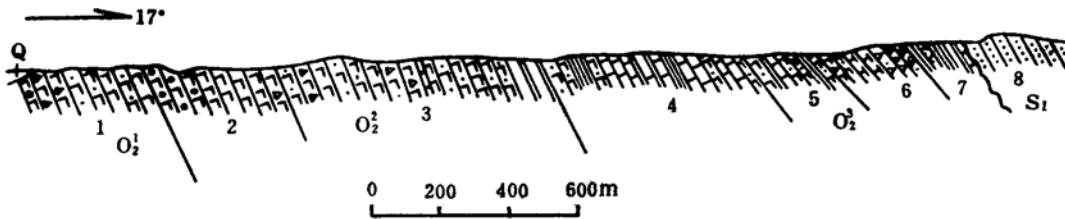


图 1 永登县石灰沟中奥陶世海相火山岩地质剖面

Fig. 1. Schematic geological section of middle Ordovician submarine volcanic rocks of Shihuigou area in Yongdeng county

Q—第四系；1—下部细碧岩质集块熔岩，中部细碧质凝灰岩，上部为辉石细碧岩夹凝灰岩（厚度：261 m，未见底）；2—下部细碧质角砾熔岩夹角砾岩，中部枕状辉石细碧岩、少量枕状辉石角砾岩，上部辉石细碧岩夹集块岩（厚度：333 m）；3—细碧质火山碎屑岩（凝灰岩、角砾集块岩），下部夹细碧岩，中部夹细碧岩，偶夹薄层灰岩，上部夹钠长粒玄武岩、硅质岩（厚度：672 m）；4—下部为细碧质凝灰岩夹薄层板岩及薄层结晶灰岩，中部为结晶灰岩、白云灰岩夹薄层硅质岩和板岩，上部为细碧质凝灰岩、凝灰质板岩夹结晶灰岩（厚度：485 m）；5—细碧岩质屑晶屑凝灰岩、沉凝灰岩，夹凝灰质板岩，偶夹薄层灰岩和钙质板岩（厚度：198 m）；6—下部为碱性粒玄武岩（厚度：21 m）、细碧岩和细碧质凝灰岩，中部为白榴碱玄武岩、粗面玄武岩、粗面玄武质集块角砾熔岩及碱性玄武质角砾凝灰岩，上部为石榴方沸岩、白榴粗面斑岩，逐渐过渡为粗面质角砾凝灰岩—角砾集块岩夹黑白云榴粗面斑岩（厚度：209 m）；7—下部为板岩夹层凝灰岩，上部为硅质板岩夹砂质板岩，顶部有一层薄层不纯灰岩（厚度：70 m）；8—志留系杂砂岩、砂岩（上覆地层）

(1) 细碧岩类中包括有细碧岩、细碧岩（含残留单斜辉石者称做辉石细碧岩）、钠长粒玄武岩及极少量角砾岩（含残留单斜辉石者称做辉石角砾岩）等。细碧岩与细碧岩的区别仅在于前者具斑状结构⁽³⁾。细碧质火山岩主要由钠质斜长石（ $An_{0.4-4.6}$ ）和绿泥石组成，单斜辉石含量变化大，以富钙普通辉石为主，少量顽透辉石和次透辉石（ $Wo_{39.5-50.0}$ $En_{33.0-50.3}$ $Fs_{8.5-19.7}$ ），有时全为其蚀变产物替代，未见橄榄石。(2) 碱性火山岩类包括有碱性粒玄武岩、粗面玄武岩、白榴碱玄武岩、白榴方沸岩、白榴粗面斑岩和黑白云榴粗面斑岩等。主要组成矿物为碱性长石，以透长石（ $An_{0-5.6}$ $Ab_{2.0-50.1}$ Or_{46-98} ）和歪长石（ $An_{0.8-9.4}$ $Ab_{59.6-71.7}$ $Or_{21.7-33.8}$ ）为主，正长石（ $An_{0-1.9}$ $Ab_{1.9-34.5}$ $Or_{65-97.9}$ ）次之，此外，单斜辉石和副长石类也很常见：单斜辉石以次透辉石为主，透辉石和普通辉石（ $Wo_{43.5-50.6}$ $En_{35.7-47.1}$ $Fs_{5.5-15.4}$ ）少量；副长石类为白榴石和方沸石，白榴石已被正长石、钠长石、绢云母、绿泥石、绿帘石有时还有碳酸盐的集合体所替代，为假白榴石。应当指出，本区海相碱性火山岩中未发现基性斜长石，仅见钠质斜长石，这可能与海底喷发环境有关，和细碧岩类中钠质斜长石的成因相仿，海底循环对流的富钠质热卤水对于上升至海底沉积盖层中的碱性火山岩浆产生混染作用，从而造成所析出的斜长石不是基性斜长石而是钠质斜长石^(3,4)。

石灰沟火山岩剖面中，碱性火山岩系的层位最高，形成最晚，在整个火山岩系中所占比例不到10%。就碱性火山岩类本身而言，以基性—中基性为主，中性岩类仅占1/5左右。根据 Barberi⁽⁵⁾ 和 Morrison⁽⁶⁾ 等人对于年轻岛弧火山岩的研究，橄欖玄粗岩组合（Shoshonite rock association）属碱性火山岩系，是岛弧三种火山岩组合（其余两种是拉斑玄武岩组合和钙碱性岩组合）的一种，与钙碱性火山岩密切共生，在整个岛弧火山岩总体积中所占比例很小，形成最晚，层位最高，为成熟岛弧火山作用的产物。其中，基性、中基性、中性岩类所占比例分别约为50%、40%和10%，白榴碱玄武岩、粗面玄武岩和粗面岩等为典型岩石组成单元。本区中奥陶世末产出的碱性火山岩系的岩石组合特点完全可以和年轻岛弧橄欖玄粗岩系的特点相比拟。

三、石灰沟岛弧火山岩系岩浆性质的确定

(一) 矿物化学

单斜辉石是本区中奥陶世海相火山岩的主要原生矿物之一。近三十年来的研究证明,单斜辉石在整个岩浆史中性质稳定,基性火山岩的“源”岩浆性质不同,所含单斜辉石的成分也不相同。将本区基性海相火山岩中单斜辉石的化学成分投影于 Leterrier 等人^[7]的 Ti—Ca+Na 图解(图2)之中,所得结果,除进一步肯定了本区碱性火山岩系的碱性属性之外,还明晰表示,本区细碧岩类的“源”岩浆类型应属于非碱性玄武岩系列。

(二) 微量元素地球化学

1. 微量元素相容程度

根据 Pearce^[6]的研究,将基性火山岩的微量元素丰度值用标准洋脊(N型洋脊)玄武岩成分标准化后,其相容程度分配型式可以灵敏地反映其“源”岩浆系列类型和形成的构造环境。用N型洋脊玄武岩标准化后的本区海相火山岩微量元素相容分配型式表示于图3,由该图可以看出:(1)位于石灰沟剖面最下部属第一喷发旋回的辉石细碧岩具有岛弧拉斑玄武岩的特点,其元素相容程度分配呈“先隆后凹”的型式,表现为 Sr、K、Rb、Ba、Th 的选择性富集,以及从 Nb 到 Yb 所有元素(Zr 除外)的亏损;(2)第二、三喷发旋回的细碧岩类总体与岛弧钙碱性玄武岩相似,元素相容程度分配呈不太明显的“三隆起”型式,表现为 K、Rb、Ba、Th 的明显富集及 Ce、P 和 Sm 的低度富集;(3)位于石灰沟剖面上部,形成于中奥陶世晚期第四喷发旋回的碱性火山岩与岛弧橄榄玄粗岩系相似,“三隆起”型式明显,表现为 Sr、K、Rb、Ba、Th、Ce 和 P 及 Hf 和 Sm 的强烈富集,间以 Ta、Nb 和 Zr 稍有富集及 Ti、Y、Yb、Sr、Cr 的明显亏损。

2. Ce、Yb、Ta 的判别意义

Pearce (1982)^[6]的研究证明岛弧与非岛弧火山岩具有不同的 Ce/Yb 和 Ta/Yb 比例关系,他所建立的 Ce/Yb—Ta/Yb 图解(图4)对于岛弧型火山岩中的拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩和橄榄玄粗岩有着明确的分区。根据微量元素成分在图4中的投点位置,同样证明,石灰沟细碧岩类的“源”岩型应属于岛弧钙碱性玄武岩系列,碱性火山岩类则属于岛弧橄榄玄粗岩系。

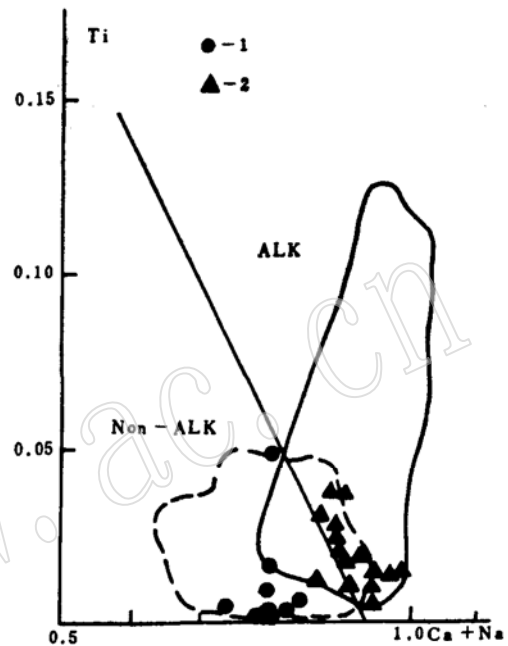


图2 石灰沟奥陶纪海相火山岩中单斜辉石Ti—Ca+Na图解

Fig. 2 Ti—Ca+Na diagram of clinopyroxenes in Ordovician submarine volcanic rocks from Shihuigou area

1—细碧岩类中单斜辉石成分点; 2—碱性火山岩类中单斜辉石成分点; ALK—碱性玄武岩; Non-ALK—非碱性玄武岩; 图中火山岩系界线据 Leterrier 等^[7]

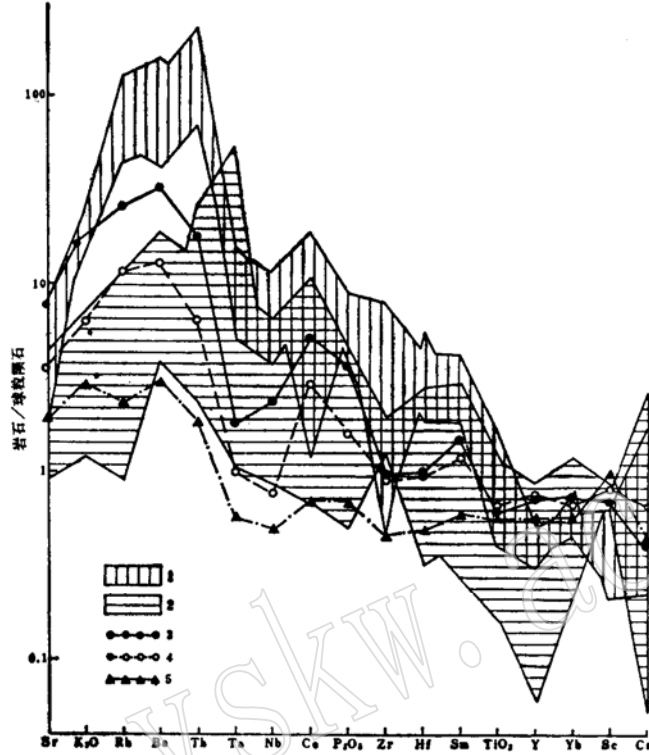


图 3 石灰沟奥陶纪海相火山岩元素相容程度分配型式
元素值用标准洋脊玄武岩成分(据Pearce, 1982⁽⁶⁾)标准化

Fig. 3 The distribution patterns of compatible degree of elements
in Ordovician submarine volcanic rocks from Shihuigou area

1—碱性火山岩类分配型式范围; 2—细碧岩类分配型式范围; 3—岛弧橄榄玄粗岩系分配型式(据Pearce, 1982⁽⁶⁾); 4—岛弧钙碱性火山岩系分配型式(据Pearce, 1982); 5—岛弧拉斑玄武岩系分配型式(据Pearce, 1982)

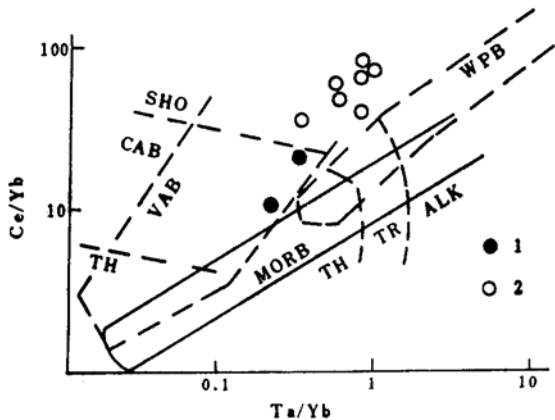


图 4 石灰沟奥陶纪海相火山岩 Ce/Yb—
Ta/Yb 图解(据Pearce, 1982⁽⁶⁾)

Fig. 4 [Ce/Yb—Ta/Yb diagram of
Ordovician submarine volcanic rocks
from Shihuigou area

VAB—岛弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩;
WPB—板块内部玄武岩; TH—拉斑玄武岩系列;
CAB—钙碱性玄武岩系列; SHO—橄榄玄粗岩系列;
TR—过渡性玄武岩系列; ALK—碱性玄武岩系列;
1—细碧岩类; 2—碱性火山岩类

3. 过渡元素Cr、Ni、Ti、Co的启示

低丰度的Ti、Ni和Cr是消减带之上的地幔楔部分熔融衍生的钙碱性岩浆之共性⁽⁶⁾。与北祁连山南火山岩带玉石沟、川刺沟等地的早奥陶世洋脊、洋岛拉斑玄武岩(现为细碧岩类)和

北火山岩带苏伏河、老虎山等地的中一晚奥陶世弧后盆地拉斑玄武岩（现亦为细碧岩类）相比（夏林圻、夏祖春等[●]，1990），石灰沟地区中奥陶世细碧岩类有很低的Ni丰度（23.6—145ppm），较低的Cr（13.2—135ppm）和Ti（TiO₂：0.28—1.75%）丰度，以及较高的Co丰度（31.3—45.5ppm），它们应该是由消减带之上的地幔楔部分熔融衍生的钙碱性岩浆结晶分离的产物。其原始岩浆的分离结晶相应该是既能容纳Ni又能容纳Ti的矿物相。这类矿物相最可能是磁铁矿。此种推测在某种程度上支持了Osborn⁽⁴⁾有关岛弧钙碱性火山岩系成因的观点。Cr的低丰度，表明单斜辉石也是其原始岩浆的重要结晶分离相之一。

(三) 岩浆包裹体

岩浆包裹体是火山岩矿物结晶生长时捕获的岩浆珠滴，它们能够准确地代表其主矿物结晶时周围岩浆的化学成分⁽¹⁰⁻¹²⁾。作者（夏林圻、夏祖春⁽⁴⁾，1989）最近于石灰沟第二喷发旋回辉石细碧玢岩的单斜辉石斑晶中发现了大量原生岩浆包裹体（7—30μ），具主矿物负晶形，现已演化，包裹体充填物由子矿物相（单斜辉石+钛磁铁矿）、残余玻璃相和收缩气泡组成。其均一温度为1185—1222℃。岩浆包裹体均一后的化学成分代表其初始成分，产于斑晶内带中的岩浆包裹体基性度最高（SiO₂：53.47—54.35%，重量%，下同），与全岩化学成分十分相近，其Na₂O为3.69—4.44%，K₂O为0.00—0.49%，证明辉石细碧玢岩早期矿物相单斜辉石结晶时，周围岩浆已经富钠。正环带单斜辉石斑晶中，从中心向边缘，随着结晶温度逐渐降低（1218→1195→1185℃），岩浆包裹体的成分渐趋偏酸性（SiO₂：54.35→56.26—57.53→59.71%）。反环带单斜辉石斑晶中，从内带向过渡带，随着结晶温度降低（1222→1218—1204℃），岩浆包裹体的成分酸度升高（SiO₂：53.47—54.61→56.34%），至富镁贫铁的基性边缘带，结晶温度反向增高（1218℃），岩浆包裹体成分复又变得偏基性（SiO₂：54.53%），与内带中岩浆包裹体成分相近。上述事实意味着细碧玢岩形成过程中，可能曾发生过岩浆混合作用：即顽透辉石—普通辉石相首先从早期偏基性岩浆中结晶，随着温度降低，岩浆演化程度增高，变为以普通辉石相为主析出；尔后又新的、较热的原始偏基性岩浆注入，与先期已发生演化的中等基性度岩浆混合，造成在早期单斜辉石晶体边部又生长出一圈结晶温度较高的顽透辉石带（详见参考文献⁽⁴⁾）。根据电子

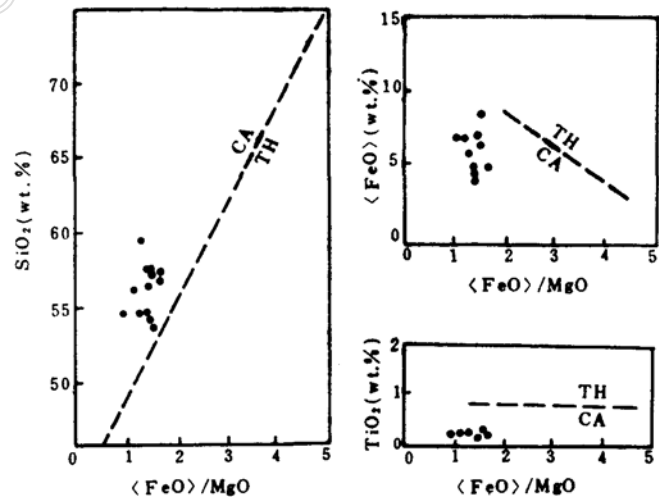


图5 石灰沟细碧玢岩单斜辉石中岩浆包裹体化学成分在都城秋穗(1975)⁽¹⁴⁾火山岩系列分类图中的位置

Fig. 5 Position of chemical compositions of magmatic inclusions in clinopyroxene of spilite-porphyrite from Shihuigou area in the classification diagrams of volcanic series of Miyashiro (1975)⁽¹⁴⁾

●—单斜辉石中岩浆包裹体；TH—拉斑玄武质火山岩系列；CA—钙碱性火山岩系列

● 夏林圻、夏祖春主编，1990，秦岭、祁连山系下古生代（部分前寒武纪）海相火山岩（待出版）。

表 1 石灰沟奥陶纪海相火山岩化学成分 (重量%)
Table 1 Chemical compositions of Ordovician submarine volcanic rocks from Shihuigou area (wt. %)

岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	CO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	总计
辉石细碧玢岩	53.87	0.30	16.34	7.24	4.78	4.54	2.29	6.86	0.21	0.12	0.002	0.003	0.61	0.06	3.04	100.265
钠长粒玄武岩	46.10	1.75	15.53	1.33	8.05	6.89	7.54	4.66	0.40	0.30	0.017	0.003	2.20	0.55	4.30	99.62
细碧玢岩	52.09	0.60	17.63	2.81	5.71	4.54	7.27	3.22	0.32	0.15	0.002	0.003	0.21	0.14	4.28	98.975
辉石角斑岩(岩枕)	55.87	0.24	11.69	3.40	4.99	7.59	5.14	4.56	0.60	0.12	0.103	0.014	2.07	0.07	3.02	99.477
细碧岩*	54.74	0.28	13.50	2.13	5.92	6.47	6.09	5.09	0.40	0.17	未测	未测	2.08	0.08	2.70	99.65
角斑岩*	47.03	0.64	17.42	2.84	5.94	4.74	9.77	4.17	0.57	0.19	未测	未测	2.97	0.16	3.92	100.36
碱性粒玄武岩	56.6	0.23	14.16	1.90	4.50	6.70	4.13	4.68	0.09	0.11	未测	未测	3.23	0.06	3.72	100.11
粗面玄武岩	50.42	1.04	13.98	1.28	5.71	9.35	6.34	2.90	2.84	0.13	0.071	0.021	0.95	0.47	3.86	99.362
	51.63	0.61	13.61	1.17	5.42	4.58	7.65	3.82	3.86	0.15	0.023	0.006	4.21	0.49	2.26	99.489
	47.79	2.39	13.32	3.25	6.68	8.29	7.05	2.94	2.44	0.18	0.052	0.018	0.09	1.07	3.88	99.44
	50.14	1.08	13.41	3.11	4.45	5.75	9.29	3.74	3.46	0.13	0.031	0.008	2.31	0.77	1.74	99.419
白榴碱玄武岩	52.01	1.05	16.77	4.44	4.38	3.99	5.90	5.28	3.75	0.14	0.017	0.007	0.22	0.86	0.80	99.614
	53.58	0.72	18.19	1.86	4.85	4.50	3.01	5.22	3.68	0.08	0.01	0.004	0.92	0.51	3.42	100.554
	52.14	0.82	16.55	2.49	4.06	4.42	6.01	6.58	2.36	0.11	0.02	0.006	0.56	0.66	2.96	99.746
白榴粗面斑岩	56.45	0.78	18.12	0.43	3.88	2.31	2.73	7.04	2.96	0.06	0.01	0.003	0.52	0.50	1.83	99.623
粗面玄武岩*	50.35	0.90	14.25	1.32	6.78	8.28	6.33	3.20	2.95	0.12	未测	未测	1.73	0.67	3.22	100.1
	50.03	0.78	17.90	0.61	6.10	2.89	5.44	4.94	4.80	0.10	未测	未测	3.91	0.44	2.52	100.46
白榴碱玄武岩*	51.16	1.02	16.55	3.26	2.56	4.54	6.60	5.09	3.09	0.12	未测	未测	3.44	0.55	2.24	100.22

*者引自“甘肃区调队, 1980, 北祁连山东段奥陶纪、奥陶纪火山岩系地层划分和火山机构研究”, 其余由西安地质矿产研究所化验室分析, 分析者: 石宝贵、龚心才。

探针分析不能测出的亏损量估算^[10,13], 石灰沟中奥陶世细碧质岩浆中所溶解的挥发组分总量约为 2.5—5% (重量%), 其中 F、Cl、S 等分别为 0.14%、0.08%、0.87%, 岩浆中所溶解的 H₂O 量约为 1.5—3%。经激光喇曼探针测定, 岩浆中还溶解有 CO₂、N₂、CH₄、H₂、H₂S、SO₂ 等挥发组分。将岩浆包裹体的化学成分投影于 Miyashiro^[14] 的火山岩系列分类图 (图 5) 中, 可以判别第二喷发旋回辉石细碧岩的“源”岩浆系列应属于岛弧钙碱性火山岩系列。这与前述由岩石微量元素地球化学研究得出的结论完全一致。若将上述岩浆包裹体的化学成分及该区细碧岩类 (个别角斑岩) 的全岩化学成分 (表 1) 投于 Peccerillo 等^[15] 的岛弧火山岩分类图 (图 6) 中, 亦可看出, 有少量投点落于低钾拉斑玄武岩和钙碱系的玄武岩区, 绝大部分投点则落于低钾钙碱岩系的低钾玄武安山岩和低钾安山岩区。

第四喷发旋回白榴方沸岩的单斜辉石斑晶中同样也含有大量演化型原生岩浆包裹体, 大小为 10—50 μ , 均一温度介于 1193 至 1230 $^{\circ}$ C 之间。位于斑晶中心岩浆包裹体的化学成分 (均一后成分) 与全岩成分相似, 基性度最高 (SiO₂: 51.25—53.85%), 富碱 (Na₂O: 2.23—2.38%, K₂O: 3.38—4.87%), 代表了单斜辉石结晶初始周围岩浆的化学成分。随着结晶温度降低, 岩浆成分逐渐偏酸, 更富碱性, 表现为 SiO₂、K₂O 含量明显增高, CaO、MgO、FeO 含量下降, Na₂O 含量略有上升 (表 2)。根据电子探针分析亏损量估算出石灰沟中奥陶世末碱性火山岩岩浆中所溶解的挥发组分总量约为 0.7—3.4%, 主要为 CO₂、CH₄、H₂、H₂S、C₂H₆、CO 等。将表 2 所列白榴方沸岩单斜辉石斑晶中岩浆包裹体的化学成分 (表 1) 投影于图 6 之中, 可以看出, 除一个成分点落于岛弧高钾钙碱岩系的高钾玄武安山岩区外, 其余全部落入岛弧橄榄玄粗岩系的橄榄粒玄岩 (absarokite) 和橄榄玄粗岩区。进一步证明, 本区中奥陶世末的碱性火山岩系确实具有岛弧橄榄玄粗岩系的“源”岩浆属性。

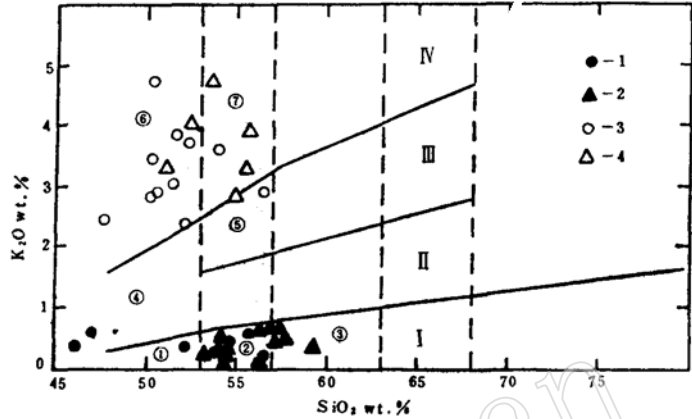


图 6 石灰沟奥陶纪海相火山岩在 Peccerillo 等^[15] (1976) 岛弧火山岩分类图中的位置

Fig. 6 Position of Ordovician submarine volcanic rocks from Shihuigou area in the classification scheme for island arc volcanic rocks of Peccerillo et al.^[15] (1976)

- 1—细碧岩类、角斑岩类; 2—辉石细碧岩单斜辉石斑晶中的岩浆包裹体; 3—碱性火山岩类; 4—白榴方沸岩单斜辉石斑晶中的岩浆包裹体
- I—低钾钙碱岩系; II—钙碱岩系; III—高钾钙碱岩系; IV—橄榄玄粗岩系
- ①—低钾拉斑玄武岩; ②—低钾玄武安山岩; ③—低钾安山岩; ④—玄武岩; ⑤—高钾玄武安山岩; ⑥—橄榄粒玄岩; ⑦—橄榄玄粗岩

四、结论和讨论

1. 北祁连山石灰沟地区的中奥陶世海相细碧岩—碱性火山岩组合为岛弧火山作用产物。岛弧火山作用初期, 属低钾拉斑玄武质岩浆喷发, 尔后以钙碱性火山活动为主。该岛弧演化

表 2 甘肃永登石灰沟白榴方沸岩单斜辉石斑晶中岩浆包裹体的化学成分(重量%)
Table 2 Chemical compositions of magmatic inclusions in clinopyroxene phenocrysts of leucite-analcitite of Shihuigou area of Yongdeng county from Gansu (wt. %)

化 学 成 分	种 类	全 岩	单斜辉石中岩浆包裹体										
			内 带			过 渡 带			边 缘				
			主 矿 物	包裹体(均-后)			主 矿 物	包裹体(均-后)			主 矿 物	包裹体(均-后)	
SiO ₂		52.14	42.89	51.25	52.55	53.85	49.21	55.07	55.52	55.45	49.37	59.20	60.31
TiO ₂		0.82	0.99	0.13	0.17	0.20	1.23	0.67	1.03	0.51	1.28	0.62	0.29
Al ₂ O ₃		16.55	4.41	22.61	22.56	22.50	5.28	17.26	16.18	19.27	4.91	19.37	18.23
FeO $\frac{Fe^{2+}O}{Fe^{2+}O_3}$		2.49 4.06	8.14	4.97	4.47	3.97	8.48	4.58	4.93	4.52	8.76	2.60	2.03
MgO		4.42	14.26	2.35	2.09	1.83	13.97	4.38	4.46	3.06	13.49	1.14	0.99
CaO		6.01	21.65	10.69	9.77	8.84	20.80	7.00	6.53	5.67	21.46	2.85	2.35
Na ₂ O		6.58	0.56	2.23	2.31	2.38	0.64	6.29	7.21	6.04	0.51	3.02	2.44
K ₂ O		2.36	0.00	3.38	4.13	4.87	0.02	2.87	3.33	4.16	0.00	9.52	9.84
MnO		0.11	0.10	0.07	0.07	0.06	0.20	0.05	0.08	0.02	0.18	0.02	0.07
Cr ₂ O ₃		0.02	0.14	0.00	0.00	6.00	0.14	0.03	0.01	0.02	0.05	0.01	0.02
NiO		0.006	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.07	0.05	0.03	0.00	0.03	0.00
CO ₂		0.55											
P ₂ O ₅		0.66											
H ₂ O*		2.96											
总 计		99.746	99.57	97.70	98.14	98.49	100.00	98.27	99.33	98.75	100.01	98.65	96.62
En			41.5				41.5				39.9		
Wo			45.3				44.4				45.6		
Fs			13.2				14.4				14.5		
均-温度°C			1227-1230			1213-1218			1193-1199				

* 湿法分析, 分析者: 石宝贵, 龚心才。其余为电子探针分析, 测定者: 夏林折、唐南安。
表中所列包裹体数据为单个包裹体成分, 每个包裹体系3-5个测点的平均值。

晚期, 为橄榄玄粗质火山活动, 所形成的火山岩层位最高。

2. 石灰沟中奥陶世末的橄榄玄粗岩系在该区整个岛弧型海相火山岩系中所占比例不到10%, 主要由粗面玄武岩、白榴碱玄岩、白榴方沸岩和白榴粗面斑岩组成。该橄榄玄粗岩系的发育, 是北祁连山古岛弧体系在中奥陶世晚期已达到成熟阶段的重要标志。

3. 从 La/Sm-La 图解(图7)可以看出, 石灰沟地区中奥陶世以钙碱系列为主(初期少量拉斑玄武系列)的海相火山岩系应属消减带之上地幔楔部分熔融产物, 其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始比为0.70616。该区的碱性橄榄玄粗岩系列则应为分离结晶作用所形成。利用玄武岩单斜辉石温压方程(周新民等^[16], 1982; 邱家骥等^[17], 1987)计算求得, 该区非碱性火山岩系中单斜辉石斑晶的结晶温度为1045—1290°C, 压力为0.11—1.41 GPa, 其上部橄榄玄粗岩系中单斜辉石的结晶温度为1152—1269°C, 压力为0.13—1.2 GPa, 证明本区岛弧型海相火山岩形成过

程中曾经过1GPa左右高压下的结晶分离作用。由此可以利用 Meen⁽¹⁰⁾ 提出的有关成熟弧岛区橄榄玄粗质岩浆系由钙碱质玄武岩浆上升至莫霍面附近岩浆房中,在1GPa左右高压下通过结晶分离作用产生的模式来解释石灰沟地区橄榄玄粗质岩浆的成因。即石灰沟地区自中奥陶世始已明显具有岛弧性质,由消减带之上地幔楔部分熔融产生的初期少量拉斑玄武质和尔后大量钙碱性玄武质岩浆喷发后,仍有一部分钙碱性玄武质岩浆停积于莫霍面附近的岩浆房内,随着岛弧成熟,在1GPa左右压力下经结晶分离作用析出斜长石、单斜辉石、磁铁矿等矿物,导致岩浆中 K_2O 富集,形成橄榄玄粗质岩浆。由于此类橄榄玄粗质岩浆形成于地壳下部或底部,在其产生及随后上升喷发过程中曾受到陆壳物质混染,因而具有较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值:0.708929。

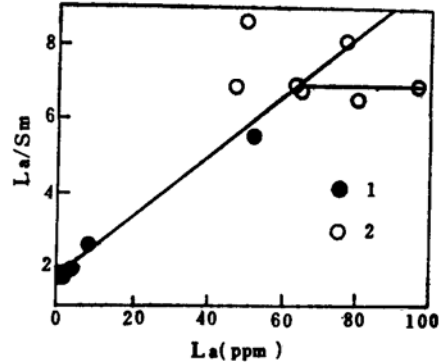


图7 石灰沟奥陶纪海相火山岩
La—La/Sm图解

Fig. 7 La—La/Sm diagram of Ordovician submarine volcanic rocks from Shihuigou area

1—细碧岩类; 2—碱性火山岩类

参考文献

- [1] 李效文, 胡守智, 1979, 北祁连槽区发现碱性火山岩, 甘肃区域地质, 第2期, 2—10.
- [2] Le Bas, M., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram., *J. Petrol.*, Vol. 27, 745-750.
- [3] 夏林圻, 夏祖春, 1987, 细碧角斑质火山岩若干问题, 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 第19期, 1—30.
- [4] 夏林圻, 夏祖春, 1989, 细碧岩岩浆成因的最新证据, 科学通报, 第13期, 1010—1013.
- [5] Barberi, F., Innocenti, F., Ferrara, G., Keller, J. and Villari, L., 1974, Evolution of Aeolian arc volcanism, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, Vol. 21, 269-276.
- [6] Morrison, G.W., 1980, Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association, *Lithos*, Vol. 13, 97-108.
- [7] Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982, Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of palaeo-volcanic series, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, Vol. 59, 139-154.
- [8] Pearce, J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, in: *Andesites*, edited by R.S. Thorpe, 525-548.
- [9] Osborn, E.F., 1962, Reaction series for subalkaline igneous rocks based on different oxygen pressure conditions, *Am. Mineral.*, Vol. 47, 211-226.
- [10] Xia Linqi (夏林圻), 1984, Contribution à l'étude des inclusions vitreuses dans différents minéraux des laves: thermométrie optique, barométrie, composition chimique, Thèse de Doctorat, Université de Paris sud, 316.
- [11] 夏林圻, 1985, 岩浆包裹体的成因和意义, 中国地质科学院院报, 第11号, 55—77.
- [12] 夏林圻, 1987, 岩浆包裹体研究在火山岩岩石学中的地位, 岩石学报, 第2期, 51—63.
- [13] 夏林圻, 1988, 岩浆包裹体化学成分研究, 矿物岩石学杂志, 第1期, 1—11.
- [14] Miyashiro, 1975, Classification, characteristics and origin of ophiolites, *J. Geol.* Vol. 83, 249-281
- [15] Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene calc alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey, *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 58, 63-81.
- [16] 周新民, 陈国华, 刘昌实, 薛纪越, 1982, 我国东海沿海碱性玄武质岩中辉石和角闪石巨晶, 矿物学报, 第1期, 75—86.

(17) 邱家骥、曾广策, 1987, 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及岩石学意义, 岩石学报, 第4期, 1—9.

(18) Meen, J.K., 1987, Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality, *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 97, 333—351.

Determination of Magmatic Nature of Ordovician Island Arc Volcanic Series in the Shihuigou Area in the Northern Qilian Mountains

Xia Linqi Xia Zuchun Peng Ligui Ren Youxiang
Yang Jinghua Zhang Cheng Li Zhipei Wang Xingan

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: palaeo-island arc; calc-alkaline basaltic series; tholeiitic series; shoshonitic series; magmatic inclusions

Abstract

The Middle Ordovician submarine spilite-alkaline volcanic rock association in the Shihuigou area in the Northern Qilian mountains was the product of island arc volcanism.

Based on the studies of petrology, mineralogy, geochemistry of trace elements, magmatic inclusions in minerals and Sr isotope, the nature of the "source" magma series of the spilite-alkaline volcanic rock association is determined and the sequence of the island arc volcanism is established in this paper.

At first erupted a small amount of tholeiitic magma which was produced by the partial melting of the mantle wedge above subduction zone, then a lot of calc-alkaline magma. At the end of Middle Ordovician, the shoshonitic magma formed by a high pressure (1 GPa) fractional crystallization of calc-alkaline basalt magma in Moho-level chamber erupted, and resulted in the formation of shoshonite rock association. Shoshonitic rocks in the Shihuigou area are stratigraphically highest and consist mainly of trachybasalt, leucite-tephrite, leucite-analcitite and leucite-trachyte porphyry. The development of the shoshonite rock association suggests that the palaeo-island arc system of the Northern Qilian mountains had reached to the mature stage at the end of Middle Ordovician.