新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的 SHRIMP 年代学研究

张海祥① 牛贺才① K. Terada② 于学元① H. Sato③ J. Ito③

(①中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ②广岛大学科学部, 广岛 739-8526, 日本; ③神户大学理学部地球与行星科学教室, 神户 657-8501, 日本. E-mail: zhanghx@gig.ac.cn)

摘要 研究显示, 库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的野外地质产状、岩石学和岩相学以及地球化学特征均与剪切成因的斜长花岗岩一致, 是由洋壳运移过程中下部第三层发育的剪切带中的辉长岩经低角度剪切变形形成的角闪岩的部分熔融形成的. 斜长花岗岩的锆石 SHRIMP 年代学研究表明, 该蛇绿岩形成于泥盆纪, 形成时间为 372±19 Ma, 这同时代表了库尔提弧后盆地的扩张时代. 该年代学研究结果表明, 古亚洲洋板块向西伯利亚板块俯冲消减作用应始于晚古生代早期.

关键词 库尔提蛇绿岩 斜长花岗岩 锆石 SHRIMP 年代学

由于蛇绿岩的形成时代对于解释其构造意义十分重要, 因此, 蛇绿岩的年代学研究是目前蛇绿岩研究中最重要的研究内容之一. 已有的研究表明, 蛇绿岩可以形成于洋中脊、岛弧、弧前和弧后盆地等多种不同的构造环境, 而且绝大多数蛇绿岩形成于消减带之上[1,2]. 以往, 蛇绿岩中高 SiO_2 低 K_2O 的花岗质岩石都被认为是铁镁质岩浆结晶分异作用的产物[3], 随后的模拟实验研究也证明了这个观点[4], 但越来越多的研究发现, 除了铁镁质岩浆结晶分异作用外, 蛇绿岩从洋中脊分离、运移[5,6]、俯冲[7~14]到仰冲就位[15~17]整个过程中都可能形成高 SiO_2 低 K_2O 的花岗质岩石, 它们与蛇绿岩的形成和演化都有成因上的直接或间接的联系[5~18]. 由于它们的源区物质、形成机制以及形成温压条件等方面的不同, 蛇绿岩中不同成因的花岗质岩石不仅具有明显不同的构造意义, 同时具有明显不同的岩石、地球化学特征. 因此, 对蛇绿岩中不同类型的斜长花岗岩的系统研究, 不仅可以获得其成岩方面的信息, 同时精确的同位素定年还可以为蛇绿岩的形成和演化提供重要信息. 新疆北部阿勒泰地区的库尔提蛇绿岩位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块的缝合带北侧, 已有研究显示, 这套变质的镁铁质火成岩属于弧后盆地蛇绿岩, 它很可能代表了晚古生代古亚洲洋北侧的一个洋内岛弧的弧后盆地系统[19]. 由于缺乏精确的同位素年龄, 目前对该蛇绿岩的构造意义以及古亚洲洋的北向俯冲作用等问题的探讨仍缺乏强有力的证据, 本文拟通过对该蛇绿岩中发现的斜长花岗岩详细的地质、地球化学特征及锆石 SHRIMP 年代学研究, 查明它的成因类型, 厘定该蛇绿岩的形成时代, 并探讨其大地构造意义.

1 库尔提蛇绿岩的地质概况及样品特征

库尔提蛇绿岩位于新疆北部阿尔泰地区富蕴县城以北约 30 km 的库尔提一带, 它在库尔提河两侧出露较为完整, 呈两个岩片侵位于早泥盆世康布铁堡组变质岩系中. 其中北部岩片属于蛇绿岩的上部, 主要由具枕状构造的变玄武岩及侵入其中的少量辉长岩、辉绿岩岩墙组成, 枕状玄武岩的变质程度较低, 为绿片岩相, 枕状构造保存完好. 南部岩片主要由变质的辉长岩(镁铁质侵入岩)组成, 它们普遍遭受了角闪岩相的变质作用, 岩石的韧性变形也很普遍, 南部岩片中的基性岩脉也很常见, 而在岩片的最北侧出现少量枕状玄武岩(图 1)[19]. 库尔提蛇绿岩上部枕状玄武岩和下部辉长岩之间变质程度和变形强度的明显差异表明, 辉长岩的变质变形是蛇绿岩定位前洋壳发生剪切作用所致. 本次研究在库尔提蛇绿岩剖面的南部岩片发现了斜长花岗岩脉, 它以脉状与由辉长岩剪切变形形成的角闪岩呈黑白互层产于蛇绿岩剖面的下部辉长岩单元中, 脉体宽度从几厘米到几十厘米不等, 最大宽度约 1 m. 值得特别注意的是, 斜长花岗岩与角闪岩条带之间并没有见到冷凝边, 表明它们不可能是侵入关系, 而应该是岩浆分凝作用的产物. 由于受后期强烈的构造影响和断层控制, 库尔提蛇绿岩各岩石单元的层序和厚度都不清晰,

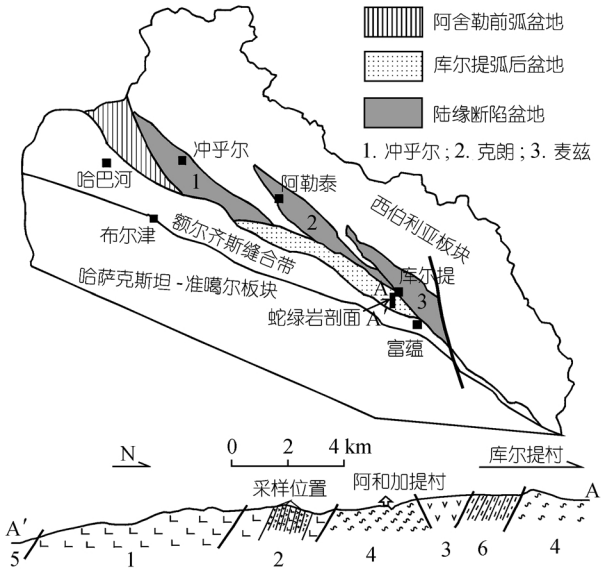

图 1 新疆北部晚古生代地质略图及库尔提蛇绿岩剖面图 据文献[19]修改. 1. 变质辉长岩; 2. 产于变质辉长岩中的斜长花岗岩与角闪岩互层; 3. 变质枕状玄武岩夹硅质岩; 4. 康布铁堡组混合岩(D_1); 5. 二叠系; 6. 阿勒泰组砂页岩(D_2)

从地表情况看, 这种角闪岩与斜长花岗岩的互层在地表断续出露的可视厚度约 1 km. 从野外产状和地质特征看, 库尔提蛇绿岩中的斜长花岗岩与加拿大 Appalachian 山 Fournier 蛇绿岩中剪切成因的斜长花岗岩非常相似[6], 它是由洋壳运移过程中下部第三层剪切的辉长岩经低角度剪切变形形成的角闪岩的部分熔融形成的, 岩石具有明显的剪切变形特征. 薄片观察结果也表明, 库尔提蛇绿岩的变形作用非常明显, 其中斜长花岗岩主要由石英、斜长石(An = 9~16)和少量副矿物(如锆石、绿帘石和赤铁矿)组成. 岩石具有斑状结构, 斑晶为斜长石, 基质为细粒石英和少量细粒的斜长石, 样品含有少量后期形成的、条带状分布的黑云母.

2 斜长花岗岩的地球化学特征

主量元素采用 ICP-AES 或 X 荧光光谱分析, 微量元素分析由第一作者采用 PE Elan 6000 型 ICP-MS 在中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室完成, 仪器的工作条件、分析精度和分析方法见文献[20].

3 个样品的主量元素分析结果表明(表 1), 与通常所说的由铁镁质岩浆结晶分异形成的斜长花岗岩相比, 库尔提蛇绿岩中的斜长花岗岩具有富 SiO_2, 贫 Al_2O_3 的主量元素特征. 样品的 SiO_2 含量介于 75.66%~78.80% 之间, 含有较高的 CIPW 标准矿物分子 Q; Al_2O_3 含量小于 13.5%(11.67%~13.29%); K_2O 含量较低(0.41%~1.00%), Na_2O 的含量较高(4.56%~6.86%). 所有这些都与剪切成因的斜长花岗岩的特征一致.

微量元素方面(表 1), 相对于地壳花岗岩, 库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的酸性岩浆元素 Rb, Ba, Sr, Nb, Ta 和 Pb 等的含量较低, 而基性岩浆元素 Cr, Ni, Co, V 和 Zn 的含量相对较高. 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 库尔提斜长花岗岩显示了平缓右倾的曲线型式, 并伴随着明显的 Sr 和 Ti 负异常(图 2(a)); 与铁镁质岩浆结晶分异形成的斜长花岗岩不同, 库尔提斜长花岗岩具有分异的稀土特征, 它们的轻稀土轻

表 1 斜长花岗岩的主量元素(%)、微量元素(μg/g)分析结果 a)

主量元素	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	总量	
K34-2	78.01	0.28	12.28	1.93	1.58	0.03	0.93	1.42	4.56	0.81	0.06	0.31	100.62	
X28-1	75.66	0.26	13.29	0.30	0.88	0.02	1.14	0.56	6.86	0.71	0.02	0.49	100.19	
X35-2	78.80	0.15	11.67	0.22	0.74	0.02	1.00	0.74	4.97	1.00	0.04	0.62	99.97	
Fournier	77.68	0.12	13.30	0.23	0.82	0.02	0.50	1.00	6.14	0.41	0.07	1.21	100.38	
微量元素	Ti	V	Cr	Co	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U
K34-2	1664	22.9	4.21	1.47	14.7	75.3	20.8	124	4.35	307	3.81	0.37	6.24	1.28
X28-1	1530	18.4	3.88	7.69	17.2	86.7	31.6	110	5.80	111	3.36	0.52	8.17	1.56
X35-2	931	5.72	3.76	3.80	17.7	38.9	27.8	104	7.21	379	3.73	0.73	11.9	4.10
Fournier			7		9	155	12	94	25	102				
稀土元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
K34-2	18.9	38.2	4.61	17.7	3.39	0.739	3.26	0.555	3.48	0.739	2.14	0.370	2.57	0.436
X28-1	13.8	27.7	4.79	19.1	4.40	0.860	4.45	0.810	5.36	1.20	3.79	0.600	4.12	0.620
X35-2	32.0	50.3	7.07	24.2	4.47	0.420	4.32	0.740	4.72	1.02	3.25	0.510	3.68	0.590
Fournier	17.7	32.0		11.0	1.90	0.37				0.50			1.20	0.15

a) K-34-2 的主量元素采用 ICP-AES 分析, 其他采用 X 荧光光谱分析, Fournier 的数据引自文献[6]

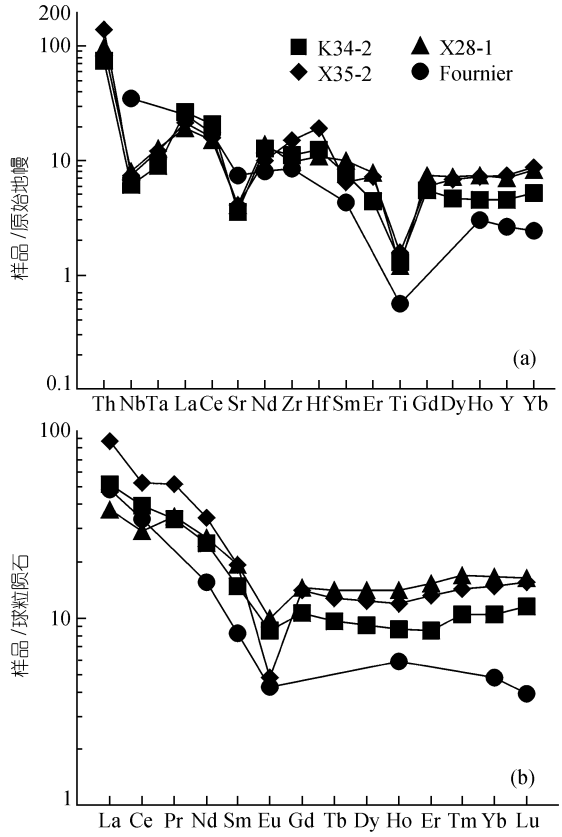

图 2 斜长花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土配分图(b)

微富集，表现为略微右倾的稀土配分型式(图 2(b))．这是剪切成因的斜长花岗岩所具有的典型微量元素和稀土元素特征．

因此，不论从野外地质产状，岩石学和岩相学特征，还是从地球化学特征来看，库尔提斜长花岗岩都与剪切成因的斜长花岗岩一致，它是由洋壳下部剪切的辉长岩经低角度剪切变形形成的角闪岩的部分熔融形成的．

3 SHRIMP 年代学

锆石按常规方法分选，在双目显微镜下挑纯，锆石颗粒较细．SHRIMP 的 U, Pb 同位素分析由日本广岛大学 SHRIMP 实验室完成(加速电压 10 kV/4 nA, $^{238}U^{+}/^{206}Pb^{+}$比值采用 SL13 锆石标样校正，年龄数据误差为 2σ)．详细的 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析方法参阅文献[21]，17 个点的分析结果列于表 2，U-Pb 谐和图见图 3.

已有的研究结果表明[22]，岩浆型锆石的 Th/U 比值大于 0.1，而且各锆石的 Th, U 之间具有正相关关系．从表 2 可以看出，17 个测点的 U, Th 含量分别介于 51~350 和 34~365 μg/g 之间，Th/U 比值变化较小，且都大于 0.1(介于 0.62~1.35 之间)，Th, U 之间也具有良好的正相关关系(图 4)，显示了岩浆型锆石的特征．除了 K.1.e.01.1 测点给出明显较低的年龄值外(283.0 Ma)，其余 16 个测点给出的 $t_{206/238}$ 介于 335.7~432.1 Ma 之间，这 16 个测点在 U-Pb 谐和图上给出了 372 ± 19 Ma 的年龄，它代表了斜长花岗岩的结晶年龄(图 3).

表 2 库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果 a)

测点编号	U/μg·g^{-1}	Th/μg·g^{-1}	Th/U	F_{206}/%	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{208}Pb/^{206}Pb$	$^{206}Pb^{*}/^{238}U$	$t_{206/238}$/Ma
K.1.a.03.1	91	79	0.89	0.0083	0.0693 ± 0.0033	0.320 ± 0.013	0.0608 ± 0.0048	380.3 ± 29.3
K.1.b.01.1	134	111	0.85	0.0063	0.0632 ± 0.0017	0.288 ± 0.007	0.0645 ± 0.0039	403.1 ± 23.5
K.1.b.02.1	82	49	0.62	0.0235	0.0758 ± 0.0051	0.225 ± 0.013	0.0693 ± 0.0035	432.1 ± 21.3
K.1.c.01.1	204	189	0.95	0.0197	0.0665 ± 0.0018	0.300 ± 0.008	0.0608 ± 0.0025	380.2 ± 15.0
K.1.c.02.1	85	78	0.94	0.0450	0.0831 ± 0.0034	0.337 ± 0.016	0.0589 ± 0.0035	368.7 ± 21.3
K.1.c.03.1	161	119	0.76	0.0084	0.0648 ± 0.0017	0.240 ± 0.007	0.0551 ± 0.0036	345.6 ± 21.9
K.1.d.01.1	169	165	1.01	0.0230	0.0748 ± 0.0033	0.343 ± 0.015	0.0535 ± 0.0037	335.7 ± 22.8
K.1.e.01.1	76	59	0.79	0.0109	0.0720 ± 0.0047	0.292 ± 0.024	0.0677 ± 0.0073	422.4 ± 44.0
K.1.e.01.1	265	250	0.97	0.0065	0.0593 ± 0.0077	0.381 ± 0.065	0.0449 ± 0.0114	283.0 ± 70.4
K.1.e.03.1	77	74	0.98	0.0177	0.0806 ± 0.0040	0.369 ± 0.023	0.0620 ± 0.0035	387.9 ± 21.3
K.1.f.01.1	61	45	0.75	0.0189	0.0617 ± 0.0047	0.236 ± 0.019	0.0538 ± 0.0103	338.1 ± 63.0
K.1.f.02.1	350	365	1.07	0.0061	0.0564 ± 0.0042	0.344 ± 0.023	0.0541 ± 0.0079	339.9 ± 48.2
K.2.b.01.1	118	105	0.91	0.0095	0.0671 ± 0.0036	0.297 ± 0.019	0.0576 ± 0.0072	360.7 ± 43.9
K.3.b.01.1	54	38	0.72	0.0118	0.0678 ± 0.0046	0.260 ± 0.017	0.0588 ± 0.0082	368.5 ± 50.1
K.3.b.02.1	51	34	0.69	0.0166	0.0779 ± 0.0034	0.293 ± 0.020	0.0625 ± 0.0087	390.5 ± 52.8
K.3.b.03.1	182	239	1.35	0.0075	0.0581 ± 0.0022	0.308 ± 0.008	0.0601 ± 0.0026	376.3 ± 16.0
K.3.c.01.1	109	92	0.87	0.0071	0.0589 ± 0.0033	0.252 ± 0.010	0.0649 ± 0.0047	405.6 ± 28.3

a) F_{206} 为非放射成因 Pb 在总 ^{206}Pb 中所占的百分比

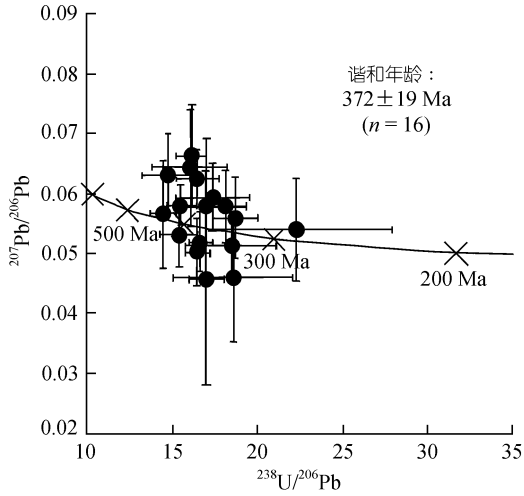

图 3 锆石 SHRIMP U-Pb 谐和线

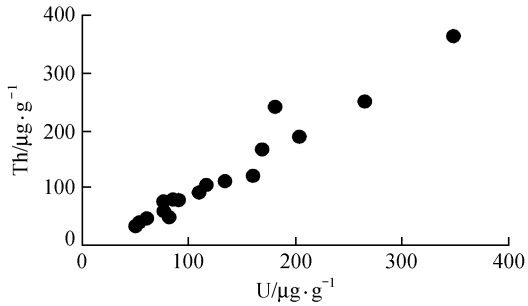

图 4 17 个测点的 Th, U 相关图

4 结果与讨论

对于新疆北部阿尔泰地区古生代的大地构造环境一直以来都存在争议，争论的焦点主要集中在两个方面：晚古生代该地区所处的构造环境和古亚洲洋俯冲、闭合的确切时间.

随着研究的不断深入，有关阿尔泰地区晚古生代的构造环境问题已有了较为公认的结论. 研究表明[23~25]，西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块之间在早古生代存在一个古亚洲洋. 而近几年的研究发现，在西伯利亚板块南缘的阿舍勒地区中泥盆世分布有高镁安山岩和富镁英安岩共生的典型岛弧火山岩系，它属于前弧盆地环境[26]；而同样分布于西伯利亚板块南缘的库尔提蛇绿岩(位于阿舍勒东南侧)则形成于弧后盆地环境[19]. 综合这些研究结果可以看出，新疆北部阿尔泰地区在早古生代不仅存在古亚洲洋，而且大约在晚古生代，古亚洲洋板块发生了北向俯冲，并形成了一套与俯冲作用密切相关的岛弧火山岩系以及完整的前弧和弧后盆地系统.

至于古亚洲洋俯冲、闭合的具体时间，目前仍存在极大的争论，其主要原因是至今仍没有能直接代表板块俯冲作用的精确同位素年代学资料. 一些研究认为[27,28]，在晚志留世~早泥盆世之前阿尔泰地区就发生了碰撞造山；同时有人认为，直到晚石炭世~二叠纪，西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块才开始发生碰撞造山作用[29,30]. 库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的发现为同位素定年提供理想的研究对象，同时精确的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学为研究结果提供了强有力的技术保证.

野外地质产状及岩石地球化学特征表明，库尔提蛇绿岩中的斜长花岗岩是由辉长岩剪切作用形成的，对于这类的斜长花岗岩的成因，目前认为是形成于蛇绿岩高温韧性剪切带中角闪岩的部分熔融. Helz[31]在研究玄武岩熔融实验时发现，该类岩石的部分熔融反应可以表述为：角闪石+斜长石(An_{53})+富铁副矿物→角闪石+斜长石(An_{75})+贫铁副矿物+熔体. 而斜长花岗岩的微量元素地球化学特征表明，角闪岩的部分熔融出现在含水的低压条件下，熔融残留矿物应为角闪石和斜长石而不含石榴石. Flagler 等人[6]通过对加拿大 Appalachian 山 Fournier 大洋碎片中斜长花岗岩的综合研究认为，形成这类花岗岩的剪切带通常发育在靠近大洋中脊分离中心的洋壳第 3 层，即辉长岩岩层中：首先，靠近大洋中脊分离中心的洋壳第 3 层、即辉长岩岩层，在高温条件下发生塑性变形，形成干的、低角度剪切带；继而经由外加的、轻稀土富集的热水溶液作用形成角闪岩；然后，在剪切过程中，角闪岩发生部分熔融形成由斜长花岗岩条带和角闪岩残留体交替构成的混合岩. 因此，这种类型的花岗岩在空间上通常与蛇绿岩地壳层序中下部辉长岩中的角闪岩相韧性剪切带共生，并常呈脉状(通常<1 m)产出在韧性剪切带中及其附近. 在时间上，略晚于蛇绿岩中辉长岩的形成时间. Appalachian 山 Fournier 大洋碎片中辉长岩、角闪岩和斜长花岗岩的同位素年代学研究表明，它们具有非常一致的形成年龄(461 Ma)，这表明，辉长岩的结晶、角闪岩剪切带和斜长花岗岩的形成基本是同时的[6].

上述分析表明，虽然加拿大 Appalachian 山 Fournier 斜长花岗岩形成于洋中脊，而库尔提蛇绿岩属于弧后盆地系统，但它们具有相似的地质过程：(1) 随着古亚洲洋板块的北向俯冲，库尔提弧后盆地开始持续拉张；(2) 伴随着地幔上涌，软流圈与洋壳下

部第 3 层辉长岩发生相对运动而形成低角度剪切带; (3) 在轻稀土等大离子半径元素富集的热水溶液作用下形成的角闪岩在减压的条件下发生部分熔融就形成了斜长花岗岩. 由于辉长岩的形成时间略早于这个年龄, 因此, 库尔提斜长花岗岩中单颗粒锆石 372 ± 19 Ma 的 SHRIMP 年龄不仅基本代表了库尔提弧后盆地拉张和蛇绿岩的形成时代, 同时也表明, 古亚洲洋的北向俯冲也应该发生在晚古生代早期. 而最近在阿尔泰地区报道的后碰撞造山 A 型花岗岩形成于 270~300 Ma(晚石炭世~早二叠世)[30]. 因此, 古亚洲洋的闭合时间应该在晚古生代晚期.

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2001CB409805)和国家自然科学基金(批准号: 40073006)资助.

参 考 文 献

1 Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of suprasubduction zone ophiolites. In: Kokelaar B P, Howells M F, eds. Marginal Basin Geology. Geological Society of London Special Publication 16, 1984. 77 ~ 94

2 Stern R J, Bloomer S H, Lin P H, et al. Submarine arc volcanism in the southern Mariana Arc as an ophiolite analogue. Tectonophysics, 1989, 168: 151 ~ 170

3 Coleman R G, Peterman Z E. Oceanic plagiogranite. Journal of Geophysical Research, 1975, 30: 1099 ~ 1108

4 Dixon S, Rutherford M J. Plagiogranites as late-stage immiscible liquids in ophiolite and mid-ocean ridge suites: An experimental study. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 45(1): 45 ~ 60

5 Pedersen R B, Malpas J. The origin of oceanic plagiogranites from the Karmoy ophiolite, western Norway. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 88(1-2): 36 ~ 52

6 Flagler P A, Spray J G. Generation of plagiogranite by amphibolite anatexis in oceanic shear zones. Geology, 1991, 19(1): 70 ~ 73

7 Cox J, Searle M, Pedersen R. The petrogenesis of leucogranitic dykes intruding the northern Semail ophiolite, United Arab Emirates: Field relationships, geochemistry and Sr/Nd isotope systematics. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 137(3): 267 ~ 287

8 Whitehead J, Dunning G R, Spray J G. U-Pb geochronology and origin of granitoid rocks in the Thetford Mines ophiolite, Canadian Appalachians. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(6): 915 ~ 928

9 Sorenson S S, Grossman J N. Enrichment of trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina Schist, southern California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(12): 3155 ~ 3177

10 Sorensen S S. Petrology of amphibolite-facies mafic and ultramafic rocks from Catalina schist, southern California: Metamorphism and migmatization in a subduction zone metamorphic setting. Journal of Metamorphic Geology, 1988, 6(4): 405 ~ 435

11 Bebout G E, Barton M D. Metasomatism during subduction: Products and possible paths in the Catalina schist, California. Chemical Geology, 1993, 108(1-4): 61 ~ 92

12 Defant M J, Richerson P M, De Boer J Z, et al. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: Petrogenesis of La Yeguada Vocanic Complex, Panama. Journal of Petrology, 1991, 32(6): 1101 ~ 1142

13 Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 1999, 46(3): 411 ~ 429

14 Scarrow J H, Pease V, Fleutelot C, et al. The late Neoproterozoic Enganepe ophiolite, Polar Urals, Russia: An extension of the Cadomian arc? Precambrian Research, 2001, 110(1-4): 255 ~ 275

15 Searle M P, Malpas J. The structure and metamorphism of rocks beneath the Semail ophiolite of Oman and their significance in ophiolite obduction. Transactions, Royal Society, Edinburgh Earth Sciences, 1980, 71: 247 ~ 262

16 Pearce J A. High T/P metamorphism and granite genesis beneath ophiolite thrust sheets. Ofioliti, 1989, 14: 195 ~ 211

17 Peters T, Kamber B S. Peraluminous, potassium-rich granitoids in the Semail Ophiolite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 118(3): 229 ~ 238

18 Floyd P A, Yaliniz M K, Goncuoglu M C. Geochemistry and petrogenesis of intrusive and extrusive ophiolitic plagiogranites, Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey. Lithos, 1998, 42(3-4): 225 ~ 241

19 许继峰, 陈繁荣, 于学元, 等. 新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩: 古弧后盆地系统的产物. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 344 ~ 352

20 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 1996, 25(6): 552 ~ 558

21 Compston W, Williams I S, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass resolution ion microprobe. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B): 525 ~ 534

22 Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, et al. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia; a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. Lithos, 2000, 51(1-2): 95 ~ 108

23 何国琦, 李茂松. 兴蒙-北疆及邻区古生代蛇绿岩的对比研究及其大地构造意义. 见: 张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996. 104 ~ 107

24 唐克东, 邵济安. 古亚洲洋区蛇绿岩的某些特征与古洋演化. 见: 张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996. 108~111

25 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1992. 1 ~ 100

26 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义. 科学通报, 1999, 44(9): 1002 ~ 1004

27 Graupner T, Kempe U, Dombon E, et al. Fluid regime and ore formation in the tungsten (-yttrium) deposits of Kyzyltau (Mongolian Altai): Evidence for fluid variability in tungsten-tin ore systems. Chemical Geology, 1999, 154(1-4): 21 ~ 58

28 Liu W, Liu C Q, Masuda A. Complex trace element effects of mixing-fractional crystallization composite processes: Applications to the Alaer granite pluton, Altay Mountains, Xinjiang, northwestern China. Chemical Geology, 1997, 135(1-2): 103 ~ 124

29 于学元, 梅厚均, 江福芝, 等. 额尔齐斯火山岩和成矿作用. 北京: 科学出版社, 1995. 95 ~ 243

30 Han B F, Wang S G, John B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur river A-type granites from north Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. Chemical Geology, 1997, 138(3-4): 135 ~ 159

31 Helz R T. Phase relations of basalts in their melting range at P_{H2O} = 5 kb as a function of oxygen fugacity: part Ⅰ. Mafic phases. Journal of Petrology, 1973, 14(2): 249 ~ 302

(2003-04-08 收稿, 2003-05-16 收修改稿)