

* 北京大学地球与空间科学学院 2004 年度学术研讨会论文选 *

新疆西南天山超高压榴辉岩、蓝片岩地球化学特征
及大地构造意义*艾永亮¹ 张立飞^{1**} 李旭平² 曲军峰¹

1 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要 新疆西南天山高压-超高压(HP-UHP)变质带为一 NEE-SWW 向延伸的古俯冲增生杂岩体, 其 4 个岩石组合对应于两个不同的构造环境. 榴辉岩组合 Ec1 为变碱性玄武岩, 地球化学特征与洋岛玄武岩(OIB)一致; Ec2 微量元素成分特征类似富集型大洋中脊玄武岩(EMORB); 蓝片岩组合 Bs1 微量元素则显示 NMORB 特征, 上述组合应形成于海山环境. 岩石中普遍发育的碳酸盐矿物以及绿辉石石英岩条纹/团块应源于上叠在玄武岩质海山之上的沉积物. Bs2 则显示 CAB 地球化学特征. 海山及其携带的远洋沉积物倾没于俯冲带内, 在此过程中侵蚀并裹挟发育于活动大陆边缘的 CAB 物质或其再沉积产物和海沟沉积物, 一起遭受高压至超高压变质作用后折返. 各岩石组合空间上的交叠并置显示昭苏高压-超高压变质带是在洋壳俯冲过程中, 海山玄武岩、火山弧玄武岩、深海和海沟沉积物经构造混杂交叠形成的俯冲增生杂岩体.

关键词 西南天山 高压-超高压变质带 俯冲增生杂岩 微量元素地球化学

自从在新疆昭苏境内阿克牙孜河上游发现榴辉岩以来^[1], 已开展的工作初步建立了区内构造格架, 认为榴辉岩及相关蓝片岩是塔里木板块北缘向伊犁-中天山板块俯冲时, 其间的南天山古洋闭合形成的增生楔体^[2,3]. 近来的详细岩石学研究在榴辉岩及榴辉岩相变质的岩石中发现诸如柯石英假像及绿辉石中的石英出溶片晶^[4], 残留菱镁矿^[5], 绿辉石中柯石英出溶体的残留^[6]及云母片岩中的菱镁矿转化为白云石的变质反应^[7], 表明新疆西南天山榴辉岩-蓝片岩带经历了超高压变质作用.

西南天山低温榴辉岩具有保存完整的岩枕构造, 表明其为洋壳俯冲变质的产物^[8], 这是目前继西阿尔卑斯 Zermat-Saas 洋壳岩石超高压变质带之后第二例

洋壳岩石发生超高压变质地区, 从而引起国内、外学者们的关注. 但有关这套超高压变质岩石的原岩地球化学特征及其形成的确切的大地构造背景至今尚未有深入的研究工作, 本文在详细的岩石学研究的基础上, 对西南天山超高压变质岩石以变基性岩组合为单元进行了主量元素、微量元素和 Sm/Nd 同位素地球化学研究, 并探讨了其可能的大地构造演化意义.

1 地质背景

天山为横亘中亚的世界最长东西向山系, 绵延 2500 km. 南天山造山带为其西起乌兹别克斯坦东迄中国新疆伊犁的分支, 与中国新疆境内东天山相接, 代表了伊犁-中天山板块与塔里木板块间的俯冲、碰

2005-02-06 收稿; 2005-05-26 修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1999075508)、国家自然科学基金(批准号: 40325005, 40228003, 40272031)和教育部高校青年教师奖励资助项目, 部分测试工作得到北京大学电子探针测试基金的资助

** 通讯作者, E-mail: lfzhang@pku.edu.cn

撞带. 从科克苏、阿克牙孜至长阿乌子并西延出境的 HP-UHP 变质带即发育其中. 我国新疆的西南天山为南天山的中国境内部分, 它夹持于伊犁-中天山板块和塔里木板块之间, 东西延长超过 200 km, 露出一套以榴辉岩、蓝片岩为代表的 HP-UHP 变质岩系^[3,8](图 1). 该高压-超高压变质带内主要组成岩

石为榴辉岩、蓝片岩和多硅白云母片岩等. 超高压变质榴辉岩有 3 种地质产状, 其中第 I 类榴辉岩呈扁豆状、布丁状、薄层状和厚层状产于蓝片岩中. 高压-超高压带以韧性剪切带北与前寒武纪结晶基底相接, 南与互层状的大理岩和绿泥石白云母片岩相邻(图 1).

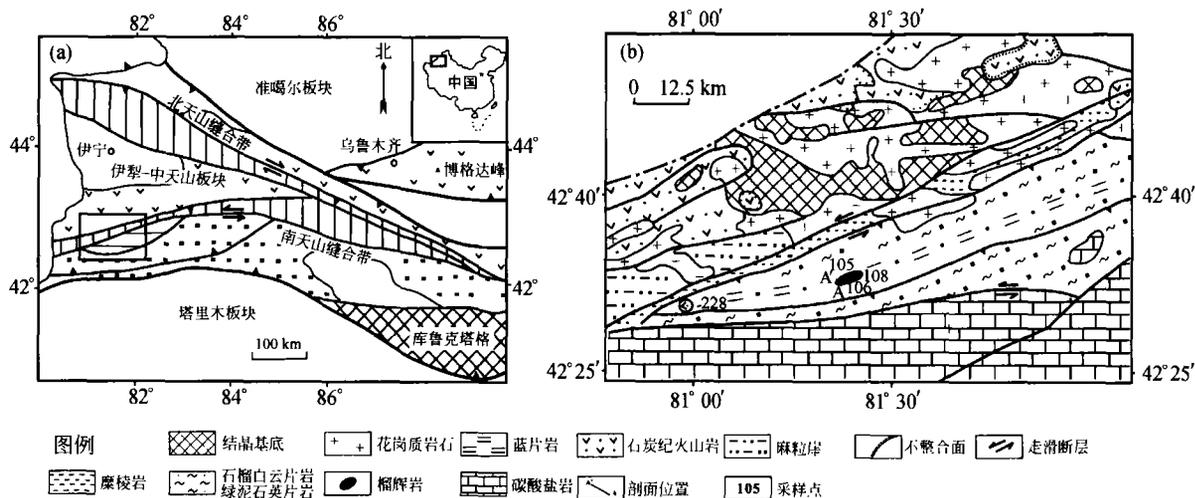


图 1 中国西南天山昭苏高压低温变质带构造地质示意图(按文献[3]改绘)

(a) 区域地质图; (b) 工作区地质及采样位置图

最近的研究发现在构造带北侧前寒武纪结晶基底南缘沿木扎尔特河出露以二辉麻粒岩和经历麻粒岩相变质的堇青石石榴石夕线石片麻岩为代表的高温低压(HT-LP)变质带, 代表了塔里木板块向伊犁-中天山板块俯冲过程中发育于伊犁-中天山板块南缘的陆缘岩浆弧上环境, 与增生楔内蓝片岩和榴辉岩代表的高压-超高压变质带一起构成了双变质带^[9]. 榴辉岩中锆石 U-Pb 离子探针定年表明, 该高压-超高压变质带形成的时代为 232—225 Ma^[10].

2 岩石学特征

本文所研究的高压-超高压变质基性岩石主要由第 I 类榴辉岩和石榴石蓝片岩、绿泥石蓝片岩等组成. 据野外产状及其岩石学特征, 该类榴辉岩-蓝片岩又可进一步划分为如下 4 个岩石组合: 榴辉岩组合 Ec1: 主要为块状榴辉岩和条带/透镜状石榴石蓝闪石片岩, 偶见石榴石白云母片岩薄层(图 1(b)中 105 样点). 该类榴辉岩中已发现了柯石英出溶条纹^[7]、柯石英假象^[4]等超高压变质矿物. Ec2 组合: 以石英榴辉岩为主, 夹杂

有透镜状蓝片岩及石榴石多硅白云母片岩, 少量绿帘石石英岩条纹/团块(图 1(b)中 106 样点). 榴辉岩矿物组合为石榴石、绿辉石、多硅白云母、绿帘石、钠云母、蓝闪石和石英, 以及少量白云石、菱镁矿和金红石. 榴辉岩中发现了具有放射状裂纹的柯石英假象和变质的菱镁矿残留^[5]. 蓝片岩组合 Bs1: 薄板状石榴石蓝片岩与石榴石多硅白云母片岩不等厚相间, 夹石英岩薄层和透镜体. 蓝片岩矿物组合为石榴石、黝帘石、蓝闪石、钠云母、阳起石、石英, 以及少量楣石. Bs2 为薄板状白云母绿泥石蓝片岩与石榴石白云母石英片岩不等厚相间的组合, 蓝片岩矿物组成为蓝闪石、绿帘石、多硅白云母、钠云母、绿泥石、白云石、石英和钠长石, 以及少量楣石.

3 地球化学特征

经机械剥离风化表层和超声波清洗所得新鲜样品使用刚玉磨板粉碎后堆分取 200 g 研磨至 200 目. 主量、微量元素测定均在西北大学大陆动力学实验室进行, 主量元素采用 XRF 粉晶法测定 LiF₄ 烧结

表1 新疆昭苏一带高压-超高压变质带岩石主、微量元素化学成分

组 合	Ec1			Ec2			Bs1			Bs2						
	1051	10512	10512C	10513	10516	1054	10610	10611	1068	1082	1083	1085	2284 ^{a)}	2286 ^{a)}	2287 ^{a)}	
样品号	Bs	Ec	Ec	Ec	Ec	Bs	Bs	Ec	Ec	Bs	Bs	Bs	Bs	Bs	Bs	
岩石类型	Bs	Ec	Ec	Ec	Ec	Bs	Bs	Ec	Ec	Bs	Bs	Bs	Bs	Bs	Bs	
主量元素(质量分数 w/%)																
SiO ₂	48.23	49.86	46.28	47.63	48.86	47.28	54.10	45.32	45.91	48.04	46.39	50.35	53.15	53.42	54.20	
TiO ₂	2.67	2.77	2.80	2.86	2.76	2.72	1.79	2.09	2.13	1.36	1.31	1.42	0.77	1.00	0.78	
Al ₂ O ₃	17.06	14.80	15.41	12.80	15.16	16.31	14.60	15.41	15.58	14.10	14.23	13.39	14.29	13.59	11.62	
TF _{e2} O ₃	13.94	11.43	11.81	14.20	15.50	13.41	12.51	14.27	12.97	15.08	14.90	13.34	7.99	9.51	8.96	
MnO	0.14	0.13	0.15	0.09	0.15	0.18	0.15	0.16	0.06	0.34	0.29	0.23	0.17	0.12	0.18	
MgO	3.89	6.90	5.37	4.25	3.38	5.81	5.78	3.68	5.82	6.32	5.58	6.69	10.10	11.80	12.37	
CaO	6.15	7.48	8.88	7.36	8.58	8.82	2.18	7.52	8.74	10.56	10.36	10.94	9.17	5.55	7.31	
Na ₂ O	2.58	3.57	4.52	5.08	2.29	3.05	3.37	3.97	3.46	1.78	2.84	2.87	1.55	3.18	2.95	
K ₂ O	2.20	0.90	1.02	2.44	1.26	0.60	3.14	3.07	1.38	0.27	0.09	0.08	2.64	1.68	1.36	
P ₂ O ₅	0.66	0.45	0.48	0.22	0.56	0.36	0.22	0.23	0.16	0.09	0.11	0.11	0.17	0.16	0.27	
LOI	2.03	1.51	3.22	3.32	1.17	1.10	2.19	3.79	3.57	1.78	3.50	0.71	0.00	0.00	0.00	
总计	99.55	99.80	99.94	100.25	99.67	99.64	100.03	99.51	99.78	99.72	99.60	100.13	100.00	100.00	100.00	
微量元素(w×10 ⁵)																
V	210.95	219.97	295.66	266.94	238.43	219.85	139.79	245.79	311.67	383.76	349.29	411.64	146.24	174.12	153.42	
Cr	98.15	143.85	146.29	113.19	126.50	107.32	127.63	137.18	143.55	105.73	162.97	120.58	305.82	539.15	739.23	
Ni	59.44	111.13	86.28	45.27	37.65	108.16	77.78	59.52	130.82	55.72	63.29	56.75	233.61	376.92	442.21	
Rb	46.76	13.89	19.80	57.79	28.90	11.38	66.71	88.67	38.92	8.15	2.28	1.44	81.56	46.88	37.72	
Sr	259.52	281.41	219.84	117.43	182.14	464.12	55.53	143.79	212.89	133.84	143.84	93.10	281.64	123.97	118.19	
Y	40.16	29.47	34.74	21.55	45.54	38.85	32.09	33.53	24.75	42.67	41.42	36.14	22.77	24.46	25.33	
Zr	242.71	244.82	216.42	238.73	250.99	236.62	141.13	174.69	149.39	78.65	74.44	79.97	125.35	134.38	69.37	
Nb	27.95	29.26	38.16	39.06	40.32	28.66	16.39	17.63	9.62	1.25	1.25	1.35	7.44	6.54	4.82	

续表

组 合	Ec1			Ec2			Bs1			Bs2					
Bá	787.10	659.17	171.84	442.88	299.70	227.12	374.85	392.02	286.06	90.13	24.40	17.85	1388.64	1153.91	945.87
La	25.61	26.93	31.66	26.57	26.00	24.81	17.66	13.57	11.74	1.97	2.07	2.57	18.37	12.86	13.18
Ce	56.99	58.88	66.62	56.70	54.23	56.04	40.37	32.99	30.07	6.61	6.86	8.39	37.71	26.75	24.98
Pr	7.16	7.57	8.70	7.12	6.71	7.19	5.35	4.29	4.44	1.19	1.23	1.49	4.60	3.44	3.46
Nd	30.06	32.74	37.09	29.95	27.65	31.70	23.77	19.29	21.87	7.19	7.25	8.57	17.86	14.18	15.00
Sm	6.65	7.58	8.14	6.64	6.04	7.48	5.90	4.73	6.20	2.89	2.81	3.22	3.65	3.32	3.71
Eu	2.08	2.18	2.50	1.96	1.97	2.24	1.74	1.49	2.11	1.05	1.01	1.15	0.99	1.01	1.09
Gd	7.02	6.64	7.99	5.91	7.11	7.46	5.76	4.69	5.99	4.06	3.92	4.04	3.68	3.66	4.03
Gd	7.02	6.64	7.99	5.91	7.11	7.46	5.76	4.69	5.99	4.06	3.92	4.04	3.68	3.66	4.03
Tb	1.21	1.02	1.18	0.82	1.31	1.24	0.98	0.85	0.89	0.91	0.90	0.83	0.59	0.64	0.68
Dy	6.98	5.43	6.33	4.17	7.34	6.85	5.67	5.28	4.51	6.11	5.91	5.40	3.47	3.76	3.93
Ho	1.43	1.04	1.23	0.76	1.52	1.37	1.20	1.17	0.87	1.46	1.42	1.23	0.75	0.83	0.86
Er	3.60	2.61	3.17	1.93	3.78	3.41	3.12	3.36	2.32	3.99	3.89	3.43	2.09	2.23	2.26
Tm	0.52	0.38	0.46	0.27	0.57	0.48	0.47	0.55	0.36	0.65	0.63	0.55	0.33	0.34	0.34
Yb	3.19	2.36	2.93	1.79	3.66	2.98	2.84	3.60	2.38	4.35	4.14	3.60	2.24	2.22	2.17
Lu	0.48	0.35	0.45	0.27	0.57	0.45	0.41	0.55	0.37	0.72	0.67	0.57	0.36	0.35	0.33
Hf	5.47	5.45	5.66	5.18	5.52	5.44	3.28	3.80	3.30	2.13	2.01	2.10	3.04	3.26	1.75
Ta	1.76	1.81	2.47	2.34	2.46	1.80	0.99	1.09	0.62	0.09	0.09	0.09	0.58	0.43	0.31
Pb	2.56	2.89	2.17	1.83	2.14	3.19	1.58	1.98	1.96	4.67	3.79	1.46	9.27	5.32	4.40
Th	3.15	3.09	3.73	3.89	3.60	2.46	2.20	1.49	0.75	0.14	0.14	0.16	7.11	3.77	2.78
U	0.55	0.72	0.86	0.65	0.70	0.66	0.38	0.25	0.15	0.07	0.05	0.05	1.72	14.16	0.87
ΣREE	193.14	185.17	213.19	166.42	193.98	192.55	147.33	129.94	118.87	85.85	84.13	81.20	119.47	100.06	101.34
ΣCe	128.55	135.88	154.72	128.94	122.59	129.45	94.79	76.36	76.42	20.91	21.22	25.39	83.18	61.56	61.41
ΣY	64.59	49.29	58.47	37.48	71.39	63.10	52.54	53.57	42.44	64.93	62.91	55.81	36.29	38.49	39.93
(La/Yb) _N	5.76	8.17	7.75	10.65	5.09	5.96	4.46	2.71	3.53	0.32	0.36	0.51	5.88	4.15	4.35
Eu/Eu*	0.93	0.94	0.95	0.96	0.92	0.92	0.91	0.97	1.06	0.94	0.93	0.97	0.82	0.89	0.86

a) 样品经无烧量校正; Ec: 榴辉岩, Bs: 蓝片岩

的样品粉末,烧失量通过将样品加温至 800 °C 时测定重量差获得.微量元素采用采用 PE 公司 ELAN6100DRC ICP-MS,并使用国际标准物质 BHVO-1, AGV-1, G-2 测定,精度优于 10%.

Sm-Nd 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 VD354 固体同位素质谱仪上通过同位素稀释法完成, Nd 同位素分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正. 测试期间, 国际标样 La Jolla 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值平均值为 0.511862 ± 0.000007 ($2\sigma, n=6$), BCR-1 标准的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均测定值为 0.512626 ± 0.000009 ($2\sigma, n=2$).

主量微量元素和同位素分析结果分别见表 1, 2.

总体上榴辉岩和 Bs1 组合的基性程度普遍较高, SiO_2 含量分别为 Ec1: 47.28%—49.86%, Ec2: 47.01%—54.10%, Bs1: 47.67%—50.35%, 和 Bs2: 52.89%—53.90%. 榴辉岩和蓝片岩 Bs1 组合样品的 SiO_2 含量在 45.3%—50.3% 之间, 样品 106-10 的 SiO_2 含量较高, 达 54.1%. 大部分榴辉岩的 K_2O 和 Na_2O 含量较高, K_2O 含量变化于 0.6%—3.14%, Na_2O 2.29%—5.08%. 榴辉岩组合的 TiO_2 含量大于 2.0%, 只有样品 106-10 的 TiO_2 含量为 1.79%, 而蓝片岩 Bs1 组合样品的

TiO_2 含量为 1.31%—1.42%, 远低于榴辉岩的 TiO_2 含量. 另外, 榴辉岩组合样品 Al_2O_3 和 P_2O_5 含量分别为 14.6%—17.1% 和 0.16%—0.66%, 高于蓝片岩组合 Bs1 的 Al_2O_3 (13.4%—14.2%) 和 P_2O_5 (0.09%—0.11%) 含量. 大多数样品具有 0.71%—3.79% 的烧失量, Bs2 三个样品的烧失量达 6.80% 以上, 与镜下含有一定量的含水含 CO_2 矿物的观察结果相符. 各组合样品的 Na_2O , K_2O 和 MgO 含量存在较为明显的波动, 暗示其原岩化学成分在其遭受洋底蚀变、洋底变质和随后的俯冲带脱水作用及折返到地壳浅部后经受低温退变质改造过程中有了一定程度的改变^[11,12].

各组合原岩均经历上述一个或多个地质过程, 水溶性元素如 Ba, Rb, Cs, U, K, Na, La, Ce, Sr, Pb 等含量会有所改变^[13], Th 在极端条件如俯冲带环境下亦会改变其丰度, 而一些微量元素如高场强元素 (HFSE) Nb, Ta, Zr, Hf, Ti, 除 La, Ce 外的 REE 和 Y, 以及强相容元素 Ni, V, Cr 则在上述过程中其含量基本上保持不变. 本文中采用不迁移元素 Nb/Y 和 Zr/Ti 比值分别代替 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 和 SiO_2 ^[14] 对其分类并使用基本不迁移元素或其比值判别其各自形成环境.

表 2 新疆昭苏高压-超高压变质岩系 Sm-Nd 同位素分析^{a)}

样品号	^{147}Sm /(nmol·g ⁻¹)	Sm ×10 ⁶	^{144}Nd /(nmol·g ⁻¹)	Nd ×10 ⁶	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2σ)	ϵ_{Nd}	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	年龄 /Ma ^{b)}	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
105-13	6.960	6.979	50.89	30.89	0.1368	0.512459 ± 12	-3.49	-0.30	439	-0.13
105-16	6.220	6.237	46.36	28.14	0.1342	0.512445 ± 5	-3.76	-0.32	439	-0.26
105-4	7.271	7.291	50.29	30.53	0.1446	0.512430 ± 7	-4.06	-0.26	439	-1.14
106-10	5.293	5.308	35.12	21.32	0.1507	0.512388 ± 10	-4.88	-0.23	439	-2.30
106-11	5.087	5.101	33.94	20.60	0.1499	0.512621 ± 11	-0.33	-0.24	439	+2.30
106-8	6.532	6.549	37.93	23.03	0.1722	0.512737 ± 11	1.93	-0.12	439	+3.30
108-2	3.256	3.265	13.02	7.90	0.2501	0.513120 ± 10	9.40	0.27	439	+6.41
108-3	2.871	2.879	11.95	7.25	0.2403	0.513099 ± 11	8.99	0.22	439	+6.55
108-5	3.720	3.73	16.25	9.87	0.2289	0.513103 ± 13	9.07	0.16	439	+8.15
228-4	7.539	7.559	58.33	35.41	0.1292	0.512118 ± 9	-10.14	-0.34	439	-6.36
228-6	3.596	3.606	24.83	15.07	0.1448	0.512279 ± 13	-7.00	-0.26	439	-4.10
228-7	4.349	4.361	29.28	17.77	0.1485	0.512331 ± 10	-5.99	-0.25	439	-3.29

a) 国际标准样 La Jolla $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511862$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 外部精度: ± 0.000020 , $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 外部精度: 0.2%.

b) 锆石离子探针 U-Pb 年龄(未发表数据)

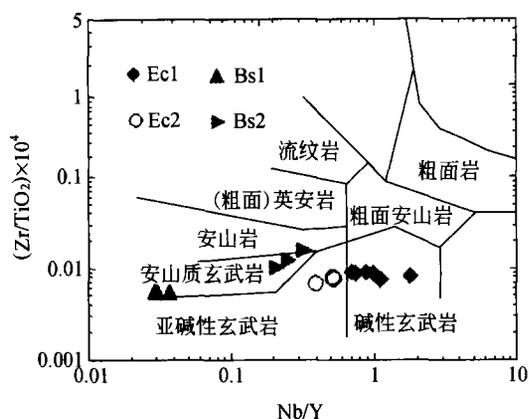


图2 微量元素分类图解(据文献[14])

如图2所示, Ec1和Ec2组合样品分别落入碱性和亚碱性玄武岩范围, Bs1组合样品位于安山质和亚碱性玄武岩过渡区, Bs2组合样品则完全处于安山质玄武岩区。

微量元素分析结果显示各组合分别具有各自独特的地球化学特征(图3;表1)。

榴辉岩组合 Ec1 显示稀土总量高, ΣREE 为 $166.4 \times 10^{-6} - 205.6 \times 10^{-6}$, 轻稀土显著富集且分馏程度较高, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为 1.72-3.44, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 5.09-10.65, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.12-2.78. 而重稀土相对较平坦, 平均 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2$. Eu 异常不明显, Eu/Eu^* 为 0.92-0.97. Zr/Hf 为 43.53-46.12(除 T10512C=38.22

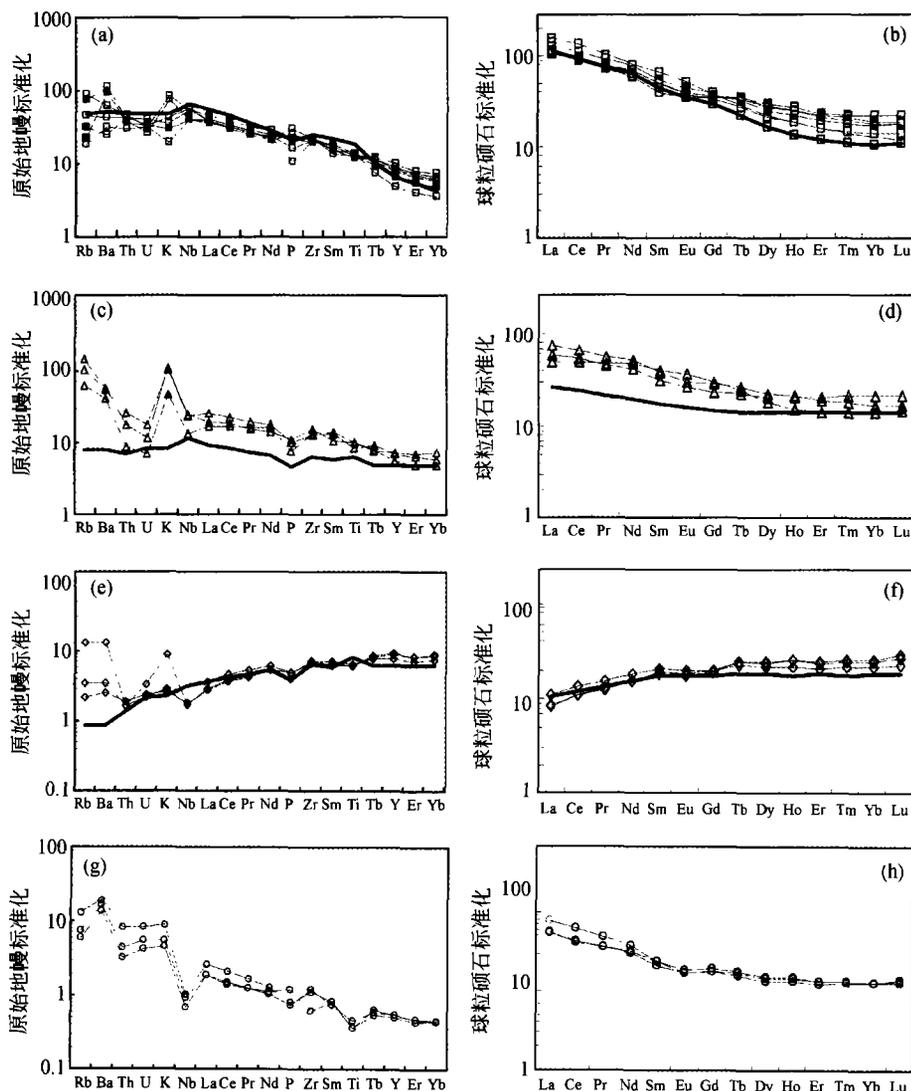


图3 西南天山 HP-UHP 岩系微量元素分布型式图

标准化数值采用文献[15]; (a)和(b), (c)和(d), (e)和(f)中粗黑线分别代表 OIB, EMORB 和 NMORB

外). Nb/La 为 1.09—1.55 (除 T1053 = 0.89 外), Nb 为 25.21×10^{-6} — 40.32×10^{-6} ($> 8 \times 10^{-6}$), 与平均 OIB^[15] 相近 (表 1; 图 3(a), (b)). $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化于 0.512430—0.512459 间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -1.1—-0.1 (表 2; 图 4(a), (b)). 一些样品 Sr 的亏损和 Pb 的富集应分属俯冲板片脱水/或少量沉积物的混入产生的效应.

Ec2 亦显轻稀土富集特征, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为 1.43—1.80, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 2.71—4.46, 轻稀土亦有相当程度分馏, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 1.22—1.93. 未见明显 Eu 异常, Eu/Eu^* 为 0.91—1.06. Zr/Hf 为 42.97—45.21. Nb/La 为 0.73—1.30, Nb 为 9.62×10^{-6} — 22.00×10^{-6} ($> 8 \times 10^{-6}$), 显现 EMORB 型玄武岩特征^[16] (表 1; 图 3(c), (d)). 与 Ec1 相比, Nb 含量有较明显降低, 表明此类玄武岩源区 Nb 含量低和/或少量海洋沉积物加入, 后者可由 Pb 的相对富集予以佐证, 其 Sr, Th 和 U 普遍显示相对亏损应属受俯冲脱水作用影响所致. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化于 0.512388—0.512737 间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -2.3—+3.3 (表 2; 图 4(a), (b)).

蓝片岩组合 Bs1 稀土总量明显偏低, 为 $81 \times$

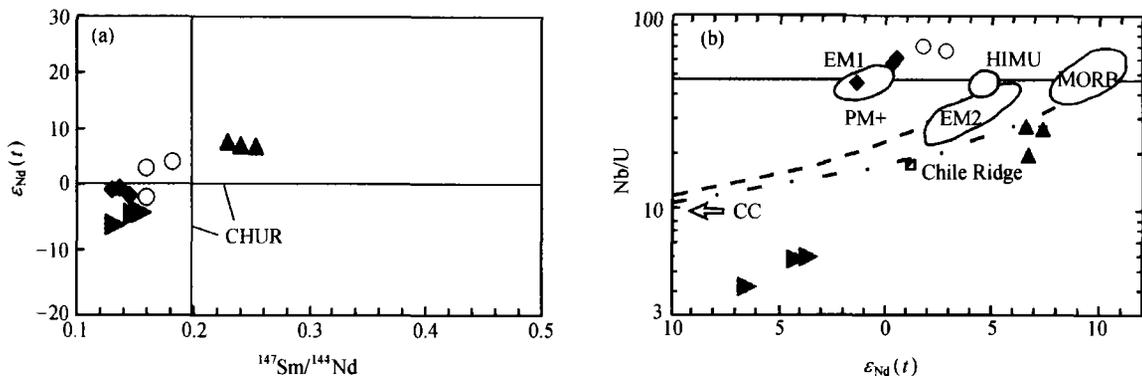


图 4 Sm-Nd 同位素图解^[19]

4 岩石成因及大地构造意义探讨

从以上主量元素特征和微量元素配分型式初步判断西南天山超高压变质的榴辉岩和有关蓝片岩的原岩各组合分别与 OIB, EMORB, NMORB 和 CAB 相似, 一些高场强元素和其他不活动元素判别图解可作进一步验证.

Nb-Zr 图解 (图 5(d)) 显示 4 个岩石组合的样

10^{-6} — 86×10^{-6} , 轻稀土显著亏损, La/Yb 为 0.3—0.5, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.44—0.52, 两者均明显小于 1. 重稀土较平坦, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均为 0.76. REE 显示明显的左倾配分型式, 显示原岩具 NMORB 型玄武岩特征. Zr/Hf 为 36.96—38.11, 与洋脊玄武岩范围一致, Nb/La 比值低 (0.53—0.63), Nb 为 1.25×10^{-6} — 1.35×10^{-6} , 低于 2.33×10^{-6} 的均值 (表 1; 图 3(e), (f))^[15] 以及 Pb 丰度较高都表明有一定量的海洋沉积物参与. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化于 (0.513099 ± 11) — (0.513120 ± 10) 间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.4—+8.2 (表 2; 图 4(a), (b)).

Bs2 的 REE 亦显示强右倾型配分, 所有样品均强烈亏损全部 HFSE 元素 Nb/La 为 0.41—0.66, Nb 为 3.16×10^{-6} — 7.44×10^{-6} ($< 11 \times 10^{-6}$), 大多数样品尚保留较高含量低场强元素 (LFSE) 如 Rb, Ba, U, K (表 1; 图 3(g), (h)), 显示岛弧玄武岩 (VAB) 特征. 其更低的 Nb 含量以及 Pb 的富集 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -3.3—-6.4 (表 2; 图 4(a), (b)) 表明有俯冲壳析出流体端元和陆源沉积物端元^[17] 的参与, 因而其原岩应为陆缘岛弧玄武岩 (CAB).

品投点各自汇集在一个区域内. 在 Ti-Zr-Y 图解 (图 5(a)) 中, Ec1 和 Ec2 样品落入板内玄武岩 (WPB) 区域, Bs2 组合样品两个落入 CAB 区, 一个样品与 Bs1 共同位于混合区内. 而在 Ti-Zr (图 5(f)) 中, Bs1 样品落在 MORB 区, Bs2 样品落在 VAB 区. Nb-Zr-Y 图解 (图 5(e)) 中, Ec1 落在板内碱性玄武岩 (WPA) 区和板内拉斑玄武岩 (WPT) 区, Ec2 的投点位于 EMORB 和 VAB+WPT 混合

区. 在图 5(a)中位于 CAB 及混合区以及在图 5(f)中位于 VAB 的 Bs2 样品则确定地落在 CAB 区域. 因为 Th 仅在俯冲板片脱水过程中成为迁移元素^[18], 位于 Hf/Th<3 区域的 Bs2 样品应为上俯冲带(SSZ)火山活动产物. 图 6^[12]中 Ec1 组合样品位于 OIB 型玄武岩区, Bs1 组合样品基本上位于 MORB 玄武岩区, Ec2 样品则落入 MORB 和 OIB 的交汇区. 主量元素 Ti-P 图解(图 5(b))亦表明 Ec1 和 OIB, Bs1 与 MORB 间密切的可比性.

全岩 Sm-Nd 同位素数据(表 2)和图 4(a)表明, Bs1 样品均落入较 CHUR 更亏损的地幔源区, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 6.7—7.4; Ec1 样品位于富集地幔源区, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 1.4—0.4; Ec2 样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -2.5—3.2, 介于两者之间, 其中 10610 样品与石英岩呈过渡关系, 故显示更富集特征; Bs2 样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -6.7—-3.5, 显示富集的源区特征, 除在岛弧岩浆上升过程中受到陆壳混染和沉积物参与外, 其原岩亦有可能源于古俯冲过程改造后的地幔源区.

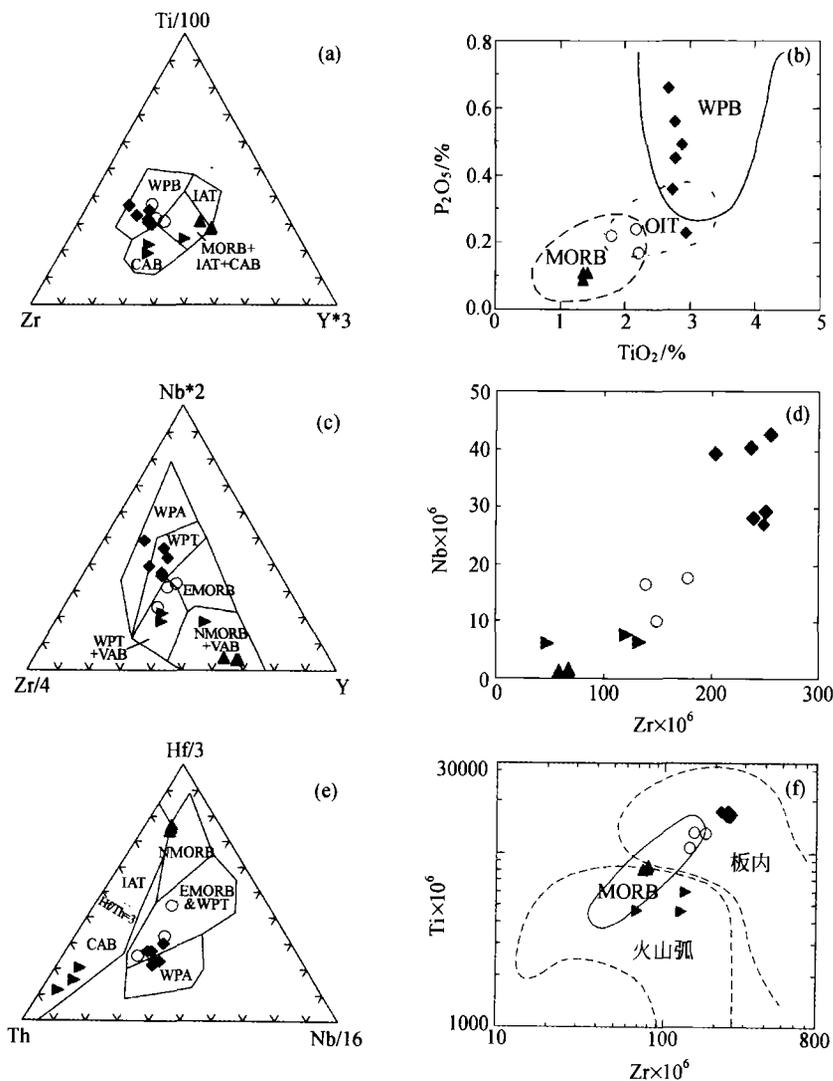


图 5 微量元素比值图解(图例同图 2)

(a) Ti-Zr-Y 图解; (b) Ti-P 图解; (c) Nb-Zr-Y 图解; (d) Nb-Zr 图解; (e) Th-Hf-Nb 图解; (f) Ti-Zr 图解

因为不论 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值从 MORB 到 EM1 如何变化, MORB 和几种 OIB 端元的 Nb/U 比值集中于 Nb/U=

47 上下^[19], 所以 Nb/U- $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解不仅能反映样品原岩的地幔源区性质, 而且能提供沉积物混入的信息

(图4(b)). Ec1和Ec2组合样品分别位于EM1型OIB附近以及EM1型与HIMU型OIB之间,反映其OIB来源的特征,其往上方的偏离表明U在俯冲脱水过程中有一定的丢失. Ec1和Ec2样品较高的Th/U比值(除样品1054外均大于4.2)亦可证明U的丢失,因为除下地壳和榴辉岩外,没有其它物质Th/U>4.2,而Ec1, Ec2原岩在俯冲过程中不太可能卷入Th/U>4.2的物质即下地壳物质和榴辉岩. Bs1样品投点位于MORB+CC一线之下,表明其原岩乃是MORB型玄武岩与一定量沉积物的混合. Bs2样品最接近陆壳(CC)区,与前述微量元素判别结果相一致,其原岩当为更早期俯冲板片的洋壳及沉积物脱水交代地幔楔而导致的陆缘岛弧钙碱性火山岩(CAB)及混入的沉积物或系CAB再沉积产物.

基于以上主量、微量元素化学成分和Sm-Nd同

位素数据及分析,研究区内4个HP-UHP岩石组合的原岩地球化学特征分别为OIB型(EC1), NMORB型(Bs1), CAB型(Bs2)和介于OIB型和NMORB型之间的EMORB型玄武岩.

OIB型玄武岩为地幔柱活动的产物,形成于板内环境^[19,20];NMORB型玄武岩形成于以洋中脊(MOR)为代表的洋底扩张中心;而EMORB型玄武岩则形成于海山或洋脊与地幔柱相邻区域^[13,14].虽然Ec1, Ec2和Bs1的微量元素和放射性同位素子元素分别具有亲OIB, EMORB和NMORB的地球化学特性,然而他们的主微量元素间密切的相互关联性揭示他们应来自同一源区:图5(a), (f)及图6中的Ti和Zr;图5(a), (d)及图6中的Nb和Zr;以及图5(b)中的Ti和P之间,上述三组合样品的投点均呈现良好的相关性.

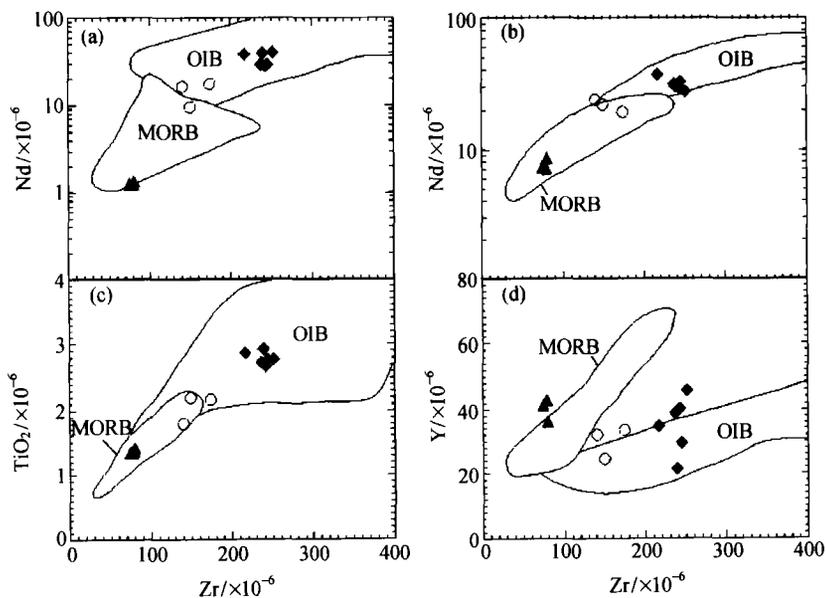


图6 基本不迁移微量元素图解

(a) Nb-Zr图解; (b) Nb-Zr图解; (c) TiO₂-Zr图解; (d) Y-Zr图解

土耳其Ankara混杂岩内的蛇绿岩片中亦见OIB, EMORB和NMORB三种岩石的连贯产出, Floyd^[21]认为其形成环境为海山. Tajikistan的Fan-Karategin构造带发育一套蓝片岩-绿片岩, 其中的变碱性玄武岩为OIB型, 变拉斑质玄武岩则具EMORB性质, Volkova等^[22]认为其形成环境为板内地幔柱之下的海山类构造. Niu等^[13]报道了在东太平洋洋隆(EPR)附近的一系列海山环境中从高度

富集的碱性到极亏损的拉斑质玄武岩的连贯产出, 认为其来源应为EPR区域一个很小规模的经历长期演化的地幔异质体. Gao^[23]对研究区内变火山岩和变火山碎屑岩的分析结果表明其微量元素特征与OIB, EMORB和NMORB相接近, 为海山环境产物.

新疆西天山昭苏UHP变质的Ec1, Ec2和Bs1三个岩石组合出现在方圆数千米以内, 其中Ec1和

Ec2 在同一条剖面中相邻, Bs1 与两者紧邻. 其产状的紧密连贯性, 以及上述的化学成分的相关性, 昭示其原岩应产于同一海山环境, 来源很可能是地幔中一个小规模的异质体.

与上述 3 个岩石组合不同, Bs2 的野外产状及其主微量元素地球化学特征表明其原岩形成环境有别于其他组合, 应为同俯冲过程(始自 290 Ma 以前^[9])中板片脱水作用引起上覆地幔楔被交代富集并发生部分熔融形成的岛弧钙碱性火山岩(CAB)与沉积物的混合或其再沉积产物. 这是目前首次在西南天山高压-超高压变质带中发现的岛弧玄武岩. 说明古天山洋曾为一宽广大洋, 其俯冲消减过程持续了相当长的阶段, 以致早期俯冲形成的岛弧火山岩又被后续俯冲板片侵蚀裹挟而经历高压-超高压变质.

5 结论

(1) 新疆西南天山超高压变质榴辉岩及其有关的蓝片岩的地球化学特征表明它们是来源于两种不同的大地构造背景下的玄武质岩石: 形成于海山环境下的大洋玄武岩和陆缘岛弧环境下的岛弧玄武岩.

(2) 高压超高压变质岩原岩可以分为 4 种成因类型: 源于富集地幔的(ϵ_{Nd} 变化于-1.4—0.4)具有 OIB 特点的变碱性玄武岩; 源于亏损地幔的(ϵ_{Nd} 为+6.7—+7.4)具有 NMORB 特点的洋中脊玄武岩; 源于较富集地幔的(ϵ_{Nd} 为-2.5—+3.2)具有 EMORB 特点的洋中脊玄武岩; 具有更富集地幔源区特征的岛弧玄武岩(ϵ_{Nd} 为-6.7—3.5).

(3) 新疆西南天山超高压变质带属于典型的洋壳岩石发生超高压变质地区, 但在古天山洋消减过程中有部分岛弧火山物质参与了深俯冲作用.

参 考 文 献

- 高俊, 张立飞, 王宗秀, 等. 新疆西天山高压变质带的变质矿物与变质作用演化. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(3): 244—254
- Gao J, Li M, He G, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 1998, 287: 213—231
- Gao J, Klemd R, Zhang L, et al. P-T path of high pressure low temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains (NW China). *Journal of Metamorphic Geology*, 1999, 17: 621—636
- Zhang L F, Ellis D J, Williams S, et al. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: Evidence from magnesite in eclogite. *American Mineralogist*, 2002, 87: 861—866
- Zhang L F, Ellis D J, Jiang W. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: Evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 2002, 87: 853—860
- Zhang L F, Ellis D J, Arculus R J, et al. Ultradeep subduction of carbonates to the mantle: evidence from the carbonate reaction of magnesite + calcite (aragonite) = dolomite in metapelites from western Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 523—529
- Zhang L F, Song S G, Ai Y L, et al. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China. *American Mineralogist*, 2005, 89: 180—186
- 张立飞, 高俊, 艾科拜尔, 等. 新疆西天山低温榴辉岩相变质作用研究. 中国科学, D辑, 2000, 30(4): 345—354
- 李强, 张立飞. 西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 PT 轨迹及其地质意义. 岩石学报, 2004, 20(3): 583—594
- Zhang L, Song S, Song B, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of HP-UHP metamorphic rocks from Western Tianshan, China. Abstract of the Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Field Symposium. NGU Report, 2003, 055:180
- Staudigel H, Plank T, White B, et al. Geochemical fluxes during seafloor alteration of the basaltic upper oceanic crust: DSDP sites 417 and 418. In: Bebout G Ed. Subduction: Top to Bottom, American Geophysical Union. *Geophysical Monograph*, 1996, 19—38
- Becker H, Jochum K P, Carlson R W. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones. *Chemical Geology*, 2000, 163:65—99
- Niu Y, Regelous M, Wendt I J, et al. Geochemistry of near-EPR seamounts: Importance of source vs. process and the origin of enriched mantle component. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 199:327—345
- Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28:459—469
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, Eds. *Magmatism in the Ocean Basin*. *Geol Soc Spec Publ*, 1989, 42: 313—345
- Thompson G, Bryan W B, Humphris S E. Axial volcanism of the East Pacific Rise, 10-12N. In: Saunders A D, Norry M J, Eds, *Magmatism in the Ocean Basin*. *Geol Soc Spec Publ*, 1989,

- 42;181—200
- 17 李曙光. $\epsilon_{\text{Nd}}\text{-La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th}$ 图对地幔不均一性研究的意义——岛弧火山岩分类及 EM II 端元的分解. 地球化学, 1994, 23(2): 105—114
- 18 Pearce J A, Baker P E, Harvey P K, et al. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich Island Arc. *Oceanographic Literature Review*, 1996, 43(2): 155
- 19 Hofmann A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, 385(16): 219—229
- 20 Doubleday R A, Leat P T, Alabaster T, et al. Allochthonous oceanic basalts within the Mesozoic accretionary complex of Alexander Island, Antarctic: Remnants of proto-Pacific oceanic crust. *J Geol Soc (Lond)*, 1994, 151:65—78
- 21 Floyd P A. Geochemical discrimination and petrogenesis of alkaline basalt sequences in part of the Ankara melange, central Turkey. *J Geol Soc (Lond)*, 1993, 150:541—550
- 22 Volkova N I, Budanov V I. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karategin transitional blueschist/green-schist belt, South Tianshan, Tajikistan: Seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 1999, 47: 201—216
- 23 Gao J, Klemd R. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 2003, 66:1—22

国家自然科学基金项目资助类型介绍:国际(地区)合作与交流(2)

海外留学人员短期回国工作讲学专项(含“两个基地”专项)

支持留学人员以各种有效的形式短期回国工作和讲学. 继续重点支持“两个基地”研究模式专项. 关于“两个基地”项目申请的具体要求, 可参阅《国家自然科学基金委员会关于资助留学人员短期回国工作讲学专项基金实施办法的补充规定》中的详细说明.

国家重点实验室国际合作与交流专项

鼓励国家重点实验室开展国际合作与交流工作. 资助形式包括: 出国参加国际会议; 国家重点实验室主办的各种类型在华国际学术会议; 外国科研人员来实验室从事长期合作研究工作. 另外, 自然科学基金委对当年评估结果为优秀的国家重点实验室按每个实验室不超过 20 万元的额度实行一次性资助.

中德科学中心合作项目

中德科学中心是由自然科学基金委与德意志研究联合会(DFG)共同成立的科研促进组织, 其主要任务是推动中德高等院校和科研单位在基础研究和应用研究领域内的科学合作与交流. 中德科学中心随时受理中德双方合作项目申请. 合作项目类型包括: 双边学术研讨会; 双方科研人员或科研机构对合作项目的前期筹划活动; 共同出版物或会议论文集; 推动青年科学家互访或建立青年科学家小组; 实施中心联合委员会已经确定的合作项目; 促进双方管理人员之间的互访和交流. 中德科学中心除了向合作项目提供经费外, 还免费提供学术活动场所.

其他

对于与我国港、澳、台地区的合作交流, 自然科学基金委也一直非常重视并给予大力支持. 在合作形式上, 上述前几种类型同样适用于这类地区性合作交流.

随着国际(地区)合作渠道不断拓展, 自然科学基金委与多个国际基金组织及学术机构签订了合作协议, 为共同组织双方科学家进行合作研究与学术交流奠定了良好基础. 凡纳入双方协议框架下的国际合作项目称之为“协议项目”. 为作好这类项目的组织工作, 国际合作局将根据与国外协议单位协商情况, 不定期在自然科学基金委网站上公布“协议项目”征集通知, 对此感兴趣的申请者可注意网上动态.