

阿克苏前寒武纪蓝片岩原岩产出的大地构造背景*

郑碧海 朱文斌** 舒良树 张志勇 于俊杰 黄文涛

ZHENG BiHai, ZHU WenBin**, SHU LiangShu, ZHANG ZhiYong, YU JunJie and HUANG WenTao

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室(南京大学),南京大学地球科学系,南京 210093

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research(Nanjing University), Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2008-08-18 收稿, 2008-10-27 改回.

Zheng BH, Zhu WB, Shu LS, Zhang ZY, Yu JJ and Huang WT. 2008. The protolith of the Aksu Precambrian blueschist and its tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2839 – 2848

Abstract Aksu blueschist terrane is located in the northwest of Tarim Basin. It is presently considered to be one of the only two Precambrian blueschists with reliable evidence in the world, for the unconformity with overlying Sinian System on its southeast. Former researches have focused on the isotope ages of the high-pressure metamorphism, with some data showing the Neoproterozoic age of the subduction-exhumation process. Nevertheless, the protolith of the blueschist and its original geotectonic setting have rarely been discussed. A geochemical analysis on mafic schists has been made in this paper, indicating the ocean crust properties of the protolith. Si contents and some immobile element diagrams show that the protolith of all samples is tholeiite. All these samples are divided into two groups: Group A and Group B, due to the distinguishable geochemical differences. The REE distribution pattern curves, the primitive mantle normalized spider diagrams and some common basalt geotectonic discrimination diagrams show that samples in Group A and Group B have EMORB(enriched mid-ocean ridge basalt) and NMORB(normal mid-ocean ridge basalt) properties, respectively. The protolith of Aksu blueschist is part of the ocean crust adjacent to Tarim in Neoproterozoic, it experienced deep subduction and exhumation as part of accretionary wedge and finally became exposed to the surface.

Key words Aksu; Blueschist; Geochemistry; Tectonic setting; NMORB; EMORB

摘要 阿克苏蓝片岩地体位于塔里木盆地西北缘。在其东南侧蓝片岩与上覆震旦纪地层不整合接触,因此被认为是目前世界上仅有的两个有确切证据的前寒武纪蓝片岩之一。过去人们对这个地区的工作主要围绕高压变质的同位素定年展开,若干个年龄数据均表明阿克苏蓝片岩的俯冲折返过程发生在新元古代。但是关于俯冲之前蓝片岩原岩产出的大地构造环境,目前还缺乏研究。本文通过对研究区内基性片岩的地球化学分析,得出蓝片岩原岩主要是洋壳玄武岩的结论。样品硅含量和一系列玄武岩不活动元素分类图解表明所有样品的原岩是拉斑玄武岩。由于明显的元素含量差异,样品被划分为A、B两组。稀土元素配分曲线、原始地幔标准化微量元素蛛网图以及常见的玄武岩大地构造判别图解都表明A组样品具有异常洋脊玄武岩的特征,而B组样品具有正常洋脊玄武岩的特征。阿克苏蓝片岩的原岩是新元古代邻近塔里木的某一洋壳的残片,它作为俯冲带增生楔的一部分经历深俯冲—折返过程,最终出露于地表。

关键词 阿克苏;蓝片岩;地球化学;大地构造环境;正常洋脊玄武岩;异常洋脊玄武岩

中图法分类号 P588.344; P588.145

* 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411301)和国家自然科学基金项目(40573038)资助成果。

第一作者简介:郑碧海,男,1986年生,硕士研究生,构造地质学专业,E-mail: zhengbihi@126.com

** 通讯作者:朱文斌,教授,博士生导师,E-mail:zwb@nju.edu.cn

1 引言

阿克苏蓝片岩地体位于塔里木盆地北缘, 出露范围大约在北纬 $40^{\circ}55'$ 至 $41^{\circ}12'$ 和东经 $79^{\circ}50'$ 至 $80^{\circ}07'$ 之间, 呈现北北东向的纺锤形展布。1979 年新疆地质研究所熊纪斌和王务严(1986)在其中发现蓝闪石片岩, 并对其做了初步的系统研究。之后一些学者又对其做了一系列野外地质、矿物学和同位素年代学的工作(Liou *et al.*, 1989, 1996; 肖序常, 1990; Nakajima *et al.*, 1991; 张立飞等, 1998; 姜文波和张立飞, 2001)。通过研究蓝片岩地体与上覆震旦系地层的不整合接触关系、蓝片岩内部大量穿插的未变质辉绿岩墙以及在上覆震旦系地层底部出现的蓝片岩、辉绿岩砾石层, 证明其为目前世界上仅有的两个可以确认的前寒武纪蓝片岩之一(Liou *et al.*, 1989, 1996; 肖序常, 1990; Nakajima *et al.*, 1991, 另一个位于泛非造山带内部)。矿物组合的研究显示蓝片岩承受了 350°C 至 450°C 和 5.5 kbar 至 7.0 kbar 的高压变质(Liou *et al.*, 1996), 表明它们经历了高压—超高压的深俯冲变质作用。现有的同位素年龄(Nakajima *et al.*, 1991; 高振家等, 1993; Liou *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2004) 都表明这个俯冲变质发生在新元古代。

西非马里北部新元古代泛非造山带内出露含柯石英的超高压榴辉岩(Caby, 1994), 被认为是大陆碰撞和深俯冲的证据(Caby, 1994; Jahn *et al.*, 2001), 其原岩以西非克拉通的被动陆缘沉积为主(Caby, 1994; Jahn *et al.*, 2001)。在同一区域沿缝合线产出混杂岩内部还曾报道过有含钠质闪石的变质基性岩(Caby *et al.*, 1981), 但是其原岩属性还未见报道。西非克拉通北缘的 Anti-Atlas 带被认为也是泛非造山带的一部分(Hefferan *et al.*, 2002), 在其最南部的增生混杂岩以及紧邻的蛇绿岩中都发现了蓝片岩(Hefferan *et al.*, 2002)。对这些蓝片岩的原岩没有详细的分析, 但是一项针对整个区域变质火山岩的地球化学分析表明含钠质闪石的蛇绿岩表现出岛弧拉斑玄武岩的原岩特征, 而增生混杂岩中的变质基性岩则具有海山玄武岩的特征(Naidoo *et al.*, 1991)。蓝片岩原岩属性的分析可以为研究蓝片岩形成的板块背景提供有用的信息, 但目前对阿克苏蓝片岩缺乏这方面的讨论。本文拟通过分析蓝片岩地体中基性片岩全岩样品的主量元素和微量元素特征, 恢复蓝片岩地体在俯冲前的大地构造背景, 并进一步探讨其原岩岩浆的地幔源区特征。

2 地质背景

阿克苏蓝片岩地体传统上被归为阿克苏群, 1959 年被阿克苏地质大队划为下元古界(熊纪斌和王务严, 1986), 但由于强烈的变质变形, 准确具体的岩石地层单位划分一直难以展开。蓝片岩地体内部缺乏混杂岩, 构造上较连续(肖序常, 1990), 内部被十多条北西南东走向的辉绿岩脉所切割(图1)。

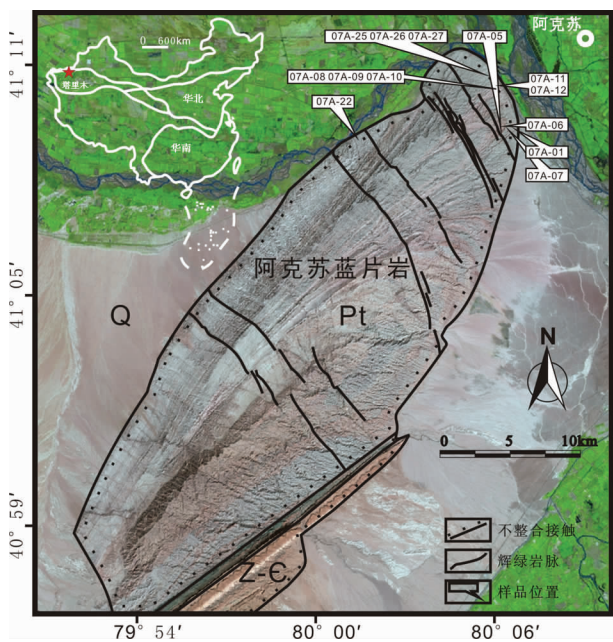


图1 阿克苏蓝片岩遥感图像解释和样品分布图

Landsat-7 ETM+ 图像, 采用 5、4、3 波段合成, 红星为阿克苏蓝片岩的位置

Fig. 1 Interpretation of remote sensing image and the sample distribution of Aksu blueschist terrane

Landsat-7 ETM+ image, composed of 5, 4, 3 bands. The red star shows the location of Aksu blueschist terrane

蓝片岩地体内部发育强烈而复杂的褶皱变形。根据野外观察, 这些褶皱变形可以被分为四期。第一期变形与蓝片岩相的高压变质以及变质岩片理面的形成相关联, 生成大量厘米至米尺度紧闭的同斜和平卧褶皱, 褶皱轴平行于片理面, 原始的岩层层面被新生成的面理和线理完全置换, 并且大多数造岩矿物沿片理面发育, 表明此期变形与蓝片岩相的变质重结晶作用是同时发生的。第二期变形生成露头尺度的枢纽与片理面以及第一期紧闭褶皱大角度相交的褶皱, 有时这些褶皱具有明显的剪切性质。第三期变形生成剖面尺度的一系列向斜和背斜, 轴面走向北西-南东, 其变形程度比上覆震旦系地层大。肖序常(1990)认为北东部基性片岩出露地带是一个大的向斜, 而在其南东侧一直到不整合面则是一系列规模相对小的背斜和向斜。但本次野外测量结果表明北东部也是由几个规模相同的向斜和背斜组成的。最后蓝片岩地体作为一个整体参与了震旦系地层的褶皱, 造成第四期变形。

由于强烈的褶皱变形作用, 蓝片岩地体内部各种不同岩石往往是反复交替出现的, 但总体上, 地体北西部是基性片岩与变质沉积片岩在剖面尺度上互层, 而靠近不整合面的南东部则仅见变质沉积片岩。基性片岩中一般表现为几厘米厚度的绿片岩和蓝片岩紧密互层产出, 有时蓝片岩缺失而仅有绿片岩。基性片岩中普遍含有变质出溶成因的浅色矿物

层,在薄片尺度下平行片理面产出。变质沉积片岩一般表现为砂质片岩和泥质片岩的交替产出,有时也可以看见砂质片岩和泥质片岩的紧密互层。在基性片岩和变质沉积片岩中,大量产出钠长石英脉体,宽度从几毫米至几十厘米,大部分平行片理面,小部分切穿片理面,常见与片岩紧密互层。前人曾认为这些条带是在变质过程中由变质热液产生的(熊纪斌和王务严,1986)。

3 地球化学特征

3.1 样品采集与分析方法

野外沿阿克苏至乌什公路在阿克苏蓝片岩地体西北缘和东北缘共采集了13个基性片岩样品,采样点剖面段跨越了野外所见的基性片岩出露范围,也覆盖了肖序常(1990)描述的“北部”基性片岩出露区域,具体的样品点位见图1。采集样品时尽量避免了钠长石英脉体的混入,大部分样品中蓝片岩和绿片岩互层,也有一些样品不含钠质闪石。

对所有样品进行了主量元素和微量元素地球化学分析。主量元素在南京大学现代分析中心使用ARL 9800型X射线荧光光谱仪(XRF)分析,分析精度一般优于2%。微量元素在南京大学内生金属矿床国家重点实验室使用Finnigan MAT-Element 2型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,大多数元素的分析精度优于5%。主量元素和微量元素的详细实验方法分别见Fronzini *et al.* (1972)和高剑锋等(2003)。

分析结果表明(表1),样品07A-9和07A-10和其它样品存在很大的差异,因此本文将它们分开讨论,将除07A-9和07A-10之外的样品归为A组,而将07A-9和07A-10两个样品单独归为B组。两组样品在野外产状和矿物组合方面均没有明显的区别。

3.2 元素活动性

Rollinson(1993)指出在热液蚀变作用和变质作用中,大离子亲石元素(LILE)在通常情况下都是活泼元素,而高场强元素(HFS)是不活泼元素。样品中K、Na等碱金属元素以及Rb、Ba、Cs、Pb等大离子亲石元素含量差别很大,很有可能在成岩之后又已经发生了一次或多次的活动,已经不能反映原岩的成分。这些元素的活动可能发生在蓝片岩相变质作用、退变质以及后期浅部低温热液蚀变等过程中。

地幔岩浆形成过程中具有几乎相同的分配系数的两个元素,成岩之后如果没有再活动,它们在样品中含量的协变图应该呈一条直线,其斜率应该近似代表源区两个元素的含量比值。符合条件的元素组包括Cs-Rb-Ba、U-Nb-Ta-K、Ce-Pb、Pr-Sr、P-Nd、Zr-Hf-Sm、Eu-Ti、Ho-Y等(Rollinson, 1993)。将本文样品作图(图略),发现多数情况下这些元素对的线性相关性良好,但当元素对中包含K、Rb、Ba、Cs和Pb时,线性相关性消失。这表明碱金属元素K、Na和部分大离子亲石元素在成岩后确实有明显的活动。而其它的高场强元素

(HFS)、过渡元素和稀土元素(REE)则仍然能反映原岩的原始成分,它们相对活动元素也能更好地约束原岩的岩浆组成(Zhu *et al.*, 2001),所以在本文中主要运用这些元素来探讨样品的原岩性质。

3.3 岩石分类

由于Na、K的活动性,传统的TAS图解变得不可靠。在岩石分类时选用Zr/TiO₂-Nb/Y图解(图2a)。大多数样品投影在亚碱性玄武岩区域,少部分投影在玄武岩和安山岩的交叠区域。Zr/TiO₂值稳定,而Nb/Y值变化较大,其中B组样品的Nb/Y值与其它样品有明显的不同。在SiO₂-Zr/TiO₂图解中(图2b),大多数样品也投影在亚碱性玄武岩中。另外,采用Nb/Y-Zr/(P₂O₅ * 10000)图解(图略, Floyd and Winchester, 1975),所有的样品都投在了拉斑玄武岩的区域。不活动元素指标和图解明确显示所有基性片岩的原岩都是基性的玄武岩,并且具有拉斑玄武岩的特征。

3.4 主量元素

样品SiO₂含量在45.50%和54.60%之间,平均值为48.36%,在基性岩的范围之内。除样品07A-8、07A-9和07A-10之外,其它样品Na₂O含量明显大于K₂O,这有可能是碱金属成岩后活动的结果,也很有可能是在元素活动叠加的基础上反映的原岩的性质。MgO含量(3.45%~9.79%)偏低且变化大。样品TiO₂含量在0.62%和2.39%之间,平均值为1.56%,与Pearce(1983)指出的典型洋中脊玄武岩TiO₂含量(约1.5%)接近。总的来说,各个样品的主量元素含量差异相当大,这与阿克苏蓝片岩地体在整个地质历史中经历的复杂的蚀变、风化、变质过程相关。Pearce(1976)曾经总结在洋底风化和大气风化的条件下,只有Ti和Al等少数主量元素保持了较好的不活动性。同时这些样品还经历了蓝片岩相的高压变质,并受到俯冲带富集的变质流体的影响,很可能大多数主量元素的含量都相对原岩有了一定的变化。

3.5 稀土元素

所有样品都具有REE富集的特征,ΣREE在43.17到163.28之间, Eu只有极轻微的负异常(δEu = 0.83~0.95)。A组样品的REE配分模式显示LREE中等富集的特征(图3a), (La)_N在22.10和48.92之间。(La/Yb)_N值在1.49和2.86之间。(La/Sm)_N值在1.07到1.36之间,球粒陨石标准化曲线LREE一侧轻微右倾,HREE一侧近水平,显示与典型异常洋脊(EMORB,数据参考Sun and McDonough, 1989)相似的稀土元素分配特征。B组样品相对亏损REE(图3b), La_N、Sm_N都低于10,暗示它们来自一个相对A组样品更加亏损的地幔源区。同时LREE相对HREE亏损,(La/Yb)_N值为0.66和0.68。(La/Sm)_N值为0.77和0.76,球粒陨石标准化曲线呈轻微的左倾。这些特征相对A组样品更加接近

表1 阿克苏蓝片岩主量元素(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果表Table 1 Major(wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) contents of Aksu blueschists

样品	07A-1	07A-5	07A-6	07A-7	07A-8	07A-9	07A-10	07A-11	07A-12	07A-22	07A-25	07A-26	07A-27
SiO ₂	47.85	54.60	48.15	47.54	45.47	47.55	52.63	46.00	46.05	48.15	50.96	47.01	46.75
TiO ₂	1.48	1.29	1.95	1.87	1.46	0.75	0.62	1.50	2.39	2.15	1.38	1.84	1.62
Al ₂ O ₃	14.19	12.78	14.35	15.15	13.78	16.02	14.25	13.79	13.59	14.16	11.53	15.96	15.93
Fe ₂ O ₃	12.44	11.76	15.44	13.95	14.75	12.10	10.83	14.43	16.05	11.85	12.79	15.19	14.83
MnO	0.16	0.23	0.20	0.23	0.19	0.18	0.14	0.21	0.22	0.16	0.17	0.24	0.20
MgO	3.97	3.81	4.00	6.17	9.79	5.72	5.98	7.98	4.43	7.91	8.08	3.71	3.45
CaO	13.63	10.06	9.49	7.53	8.19	7.86	7.60	11.15	11.77	7.84	8.62	11.04	10.45
Na ₂ O	3.26	3.43	3.50	2.85	0.86	2.90	2.81	2.18	3.25	4.26	3.38	2.25	2.98
K ₂ O	0.29	0.48	1.36	1.63	2.67	3.04	2.64	0.18	0.49	0.12	0.44	0.36	1.60
P ₂ O ₅	0.29	0.24	0.35	0.33	0.19	0.08	0.13	0.18	0.37	0.31	0.35	0.32	0.36
LOI	2.93	1.47	1.94	3.05	3.27	4.33	2.90	3.10	2.19	3.45	2.76	2.71	1.91
SUM	100.5	100.1	100.7	100.3	100.6	100.5	100.5	100.7	100.8	100.4	100.5	100.6	100.1
Li	13.0	13.0	41.3	44.4	30.5	35.3	26.1	16.5	41.2	29.9	20.9	38.2	55.2
Be	0.84	0.43	1.30	1.07	1.14	0.97	0.48	0.49	0.70	0.65	1.12	0.55	1.39
Sc	56.6	44.1	51.4	55.1	47.0	53.6	40.8	52.1	53.9	33.2	25.7	38.7	36.5
Ti	8909	7747	11687	10746	8164	4648	3600	8949	14817	12598	8273	10924	9897
V	346	318	358	328	377	209	202	407	460	272	243	280	284
Cr	212	150	134	172	164	343	259	181	128	282	283	206	190
Mn	1386	1891	1639	1862	1566	1496	1175	1793	1782	1301	1377	1976	1742
Co	52.8	41.5	51.1	49.7	56.3	55.7	49.1	55.6	47.0	49.1	54.1	65.4	65.2
Ni	94	71	55	84	103	179	142	90	73	137	245	125	107
Cu	48.3	65.2	66.7	80.8	86.8	57.8	36.6	80.3	89.6	40.1	49.3	68.0	28.5
Zn	44.4	36.3	68.0	62.2	61.2	51.9	36.3	52.4	61.2	57.2	74.6	84.4	85.7
Ga	17.5	17.3	19.4	20.0	18.5	16.3	13.2	18.9	23.5	16.9	15.0	23.7	24.3
Rb	8.37	12.07	38.87	53.14	54.01	65.11	53.33	4.09	14.23	3.03	13.27	14.39	54.42
Sr	151	115	162	168	263	137	165	126	257	130	105	154	169
Y	33.0	26.1	40.9	40.5	28.9	20.7	17.0	28.9	45.4	23.4	24.8	26.5	26.2
Zr	119.5	101.7	184.0	164.2	102.2	50.5	39.1	107.1	206.5	142.1	118.8	119.2	105.8
Nb	10.72	8.32	16.37	14.41	6.99	2.44	1.98	7.49	19.07	13.79	12.18	10.66	9.33
Mo	0.69	1.15	0.98	1.58	0.70	1.25	0.68	1.27	0.80	0.98	0.89	0.91	0.86
Cd	0.12	0.05	0.05	0.09	0.02	0.01	0.02	0.09	0.11	0.05	0.05	0.05	0.04
Sn	1.15	0.95	1.72	1.62	0.96	0.57	0.44	1.01	1.82	1.39	1.21	1.24	1.17
Cs	0.31	0.21	1.38	2.33	1.35	1.96	1.65	0.01	0.61	0.02	0.52	0.48	1.97
Ba	99.2	109.2	430.9	452.6	347.0	494.8	406.5	39.1	114.9	53.6	113.8	164.1	604.4
La	10.08	6.85	12.40	11.05	7.14	2.41	2.16	7.27	15.17	10.44	10.04	8.89	9.21
Ce	22.62	16.70	30.08	26.33	17.30	6.31	5.44	17.22	35.94	24.31	23.47	21.39	21.85
Pr	3.11	2.31	4.02	3.67	2.48	0.95	0.86	2.45	4.81	3.54	3.09	2.88	2.88
Nd	14.27	11.20	19.32	17.56	11.82	4.78	4.57	12.03	22.35	17.11	14.86	13.81	13.68
Sm	3.94	3.16	5.28	4.88	3.56	1.66	1.52	3.53	5.98	4.76	4.18	4.08	4.04
Eu	1.38	1.16	1.76	1.74	1.32	0.69	0.61	1.25	2.02	1.51	1.42	1.48	1.46
Gd	4.89	4.05	6.59	6.40	4.72	2.50	2.19	4.46	7.44	5.35	4.96	5.02	4.96
Tb	0.73	0.59	1.00	0.95	0.72	0.42	0.37	0.66	1.11	0.70	0.72	0.72	0.70
Dy	6.04	4.87	7.69	7.47	5.44	3.56	2.84	5.17	8.56	5.01	5.17	5.30	5.26
Ho	1.36	1.07	1.72	1.65	1.22	0.84	0.69	1.12	1.90	1.04	1.06	1.13	1.09
Er	4.03	3.18	5.19	5.05	3.49	2.56	2.12	3.41	5.61	2.81	2.78	2.93	3.17
Tm	0.59	0.48	0.74	0.74	0.50	0.37	0.32	0.49	0.82	0.40	0.38	0.44	0.43
Yb	3.91	3.09	4.89	4.78	3.09	2.45	2.15	3.31	5.33	2.51	2.37	2.72	2.60
Lu	0.61	0.48	0.74	0.72	0.48	0.39	0.33	0.51	0.80	0.37	0.34	0.40	0.40
Hf	2.91	2.58	4.42	4.14	2.67	1.42	1.02	2.75	4.69	3.68	2.98	3.21	2.81
Ta	0.72	0.57	1.10	0.98	0.48	0.20	0.16	0.54	1.38	0.94	0.95	0.72	0.65
W	0.37	0.44	0.41	0.70	0.31	0.52	0.26	0.40	0.51	0.78	0.46	0.50	0.44
Pb	2.15	0.33	1.34	1.43	0.11	0.53	0.76	0.17	1.77	0.66	0.62	1.03	1.17
Bi	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.01	0.13	0.01
Th	0.96	0.67	1.47	1.26	0.62	0.24	0.18	0.61	1.62	1.04	0.95	0.87	0.78
U	0.28	0.18	0.28	0.35	0.24	0.11	0.06	0.21	0.48	0.37	0.30	0.20	0.20
ΣREE	110.55	85.32	142.28	133.53	92.21	50.57	43.17	91.76	163.28	103.23	99.60	97.71	97.92
ΣCe	55.41	41.39	72.87	65.22	43.63	16.80	15.15	43.75	86.27	61.67	57.06	52.51	53.12
ΣY	55.15	43.94	69.41	68.31	48.58	33.77	28.02	48.02	77.01	41.56	42.54	45.20	44.80
(La/Yb) _N	1.74	1.49	1.71	1.56	1.56	0.66	0.68	1.48	1.92	2.81	2.86	2.21	2.39
(La/Sm) _N	1.36	1.15	1.25	1.21	1.07	0.77	0.76	1.10	1.35	1.17	1.28	1.16	1.21
(Gd/Yb) _N	1.01	1.06	1.09	1.08	1.23	0.82	0.82	1.09	1.13	1.72	1.69	1.49	1.54
δEu	0.88	0.90	0.84	0.87	0.91	0.95	0.94	0.88	0.84	0.83	0.87	0.91	0.91

全铁用 Fe₂O₃表示

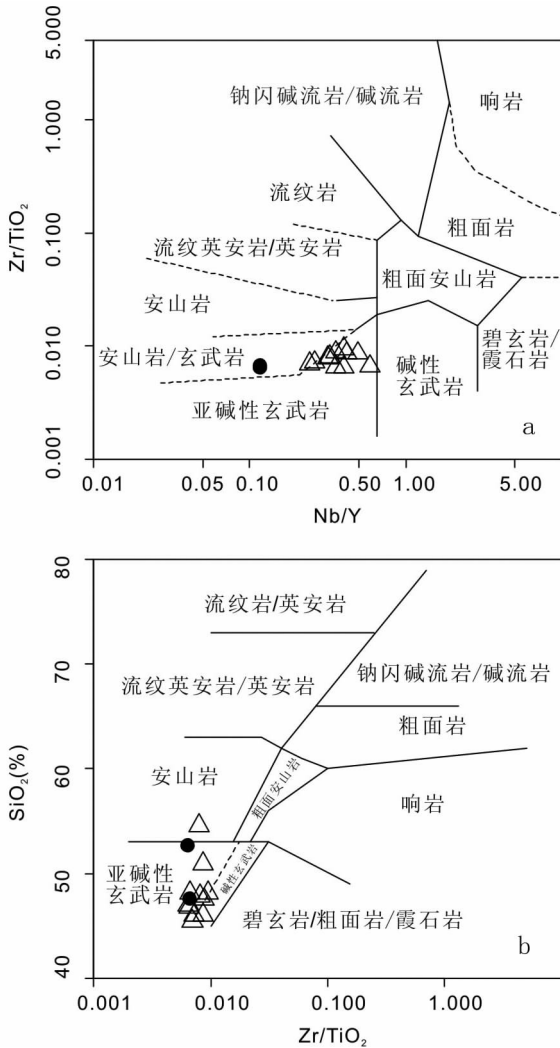


图2 不活动元素岩石分类图解(据 Winchester and Floyd, 1977)

a: Zr/TiO_2 - Nb/Y 图解, b: SiO_2 - Zr/TiO_2 图解, 三角形代表 A 组样品, 圆形代表 B 组样品

Fig. 2 Discrimination diagrams of immobile elements (after Winchester and Floyd, 1977)

a: Zr/TiO_2 - Nb/Y diagram, b: SiO_2 - Zr/TiO_2 diagram, triangles represent samples in Group A, solid circles represent samples in Group B

正常洋脊 (NMORB, 数据参考 Sun and McDonough, 1989) 的稀土配分模式。

3.6 微量元素

运用各种标准化数据对样品的不相容元素数据进行蛛网图图解分析, 同样可以发现 K, Rb, Ba, Cs, Pb 等含量差异非常大, 很有可能是后期扰动的结果, 不能反映原岩的性质, 应该尽量排除这些元素的干扰。原始地幔标准化的蛛网图 (图 3c, d) 中, A 组样品曲线 (图 3c) 在数值 10 附近呈现近

水平的样式, 与 EMORB 相似, 而 B 组样品 (图 3d) 则明显相对地亏损这些不相容元素。采用 MORB 标准化得到的蛛网图 (图略, 标准化数据引用 Pearce, 1983) 显示 A 组样品明显地富集强不相容元素, 从而在 Th 元素处形成一个明显的驼峰, 这一特征与典型 EMORB 及 OIB 样品相似。B 组样品没有这一特征。运用 EMORB 数据对样品进行标准化处理 (图略, 标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989), A 组样品的曲线在数值 1 附近保持平直, 而 B 组样品的元素含量则普遍相对亏损。所有样品都没有明显地亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等元素, 显示它们没有受到明显的地壳物质的混染, 不同于典型的岛弧拉斑玄武岩 (Pearce, 1982; Zhu *et al.*, 2005), 而与洋中脊玄武岩及板内环境的玄武岩更加接近。

4 讨论

4.1 构造环境判别

在常见的能够区分 EMORB 和 NMORB 的图解中, A 组样品落入 EMORB 区, B 组样品落入 NMORB 区。在 Wood (1980) 的三角图解中 (图 4a, b, c), A 组样品均落入了 EMORB 和板内玄武岩交叠的区域, 而 B 组样品除了在 Th-Hf-Ta 图解中落在 NMORB 区和 EMORB 区之间外 (图 4a), 在另两个图解中均落入 NMORB 区域。在 La-Y-Nb 图解中 (图 4d), A 组样品投影在了富集的 EMORB 区域, 有两个样品向弱富集型 EMORB 偏移, 而 B 组样品则投影在 NMORB 区域中。

在 Zr-Ti-Y 图解中 (图 5a), AB 两组大多数样品都投影在了 MORB、IAT 和 CAB 的交叠区域, 而 A 组小部分样品有落入板内玄武岩 (WPB, 包括洋岛玄武岩、大陆裂谷玄武岩和大陆泛流玄武岩) 区域的趋势, 尤其是样品 07A-22, 其 Y 含量低于其它样品而明显具有板内玄武岩的特征。EMORB 被认为有两种成因模式 (Doubleday *et al.*, 1994, 汪云亮等, 2001)。一种是地幔柱岩浆和正常洋中脊的亏损地幔岩浆相互作用的结果 (Schilling, 1973; Schilling *et al.*, 1983; Niu *et al.*, 1999), 可以形成 OIB-EMORB-NMORB 在区域内逐渐变化的岩石组合 (郭安林等, 2006), 其中 EMORB 的富集程度可以从 NMORB 一直变化到 OIB 的水平。另一种可能与地幔柱无关, 而是地幔源区本身不均一的反映, 富集型的岩浆源形成富集型的洋中脊玄武岩 (Zindler *et al.*, 1984; Cousens *et al.*, 1995; Donnellya *et al.*, 2004; Hofmann and Hémond, 2006)。两种模式成因的 EMORB 都可能同时具有 MORB 和大洋板内玄武岩 (OIB) 的特征, 使样品在判别图解中投影到 MORB 区域和 WPB 区域之间。在 Zr-Nb-Y 图解中 (图 5b), B 组玄武岩投影在 NMORB 和火山弧玄武岩重叠的区域, 而 A 组样品投影在了板内玄武岩和 EMORB 之间的交界区域。相同情况的还有 Ti/Y-Nb/Y 图解 (图 5c), A 组和 B 组样品基本都投在了 MORB 区域内, 但是 A 组样品有向板内玄武岩区迁移的趋势, 同样样品 07A-22 表现得最明显。李

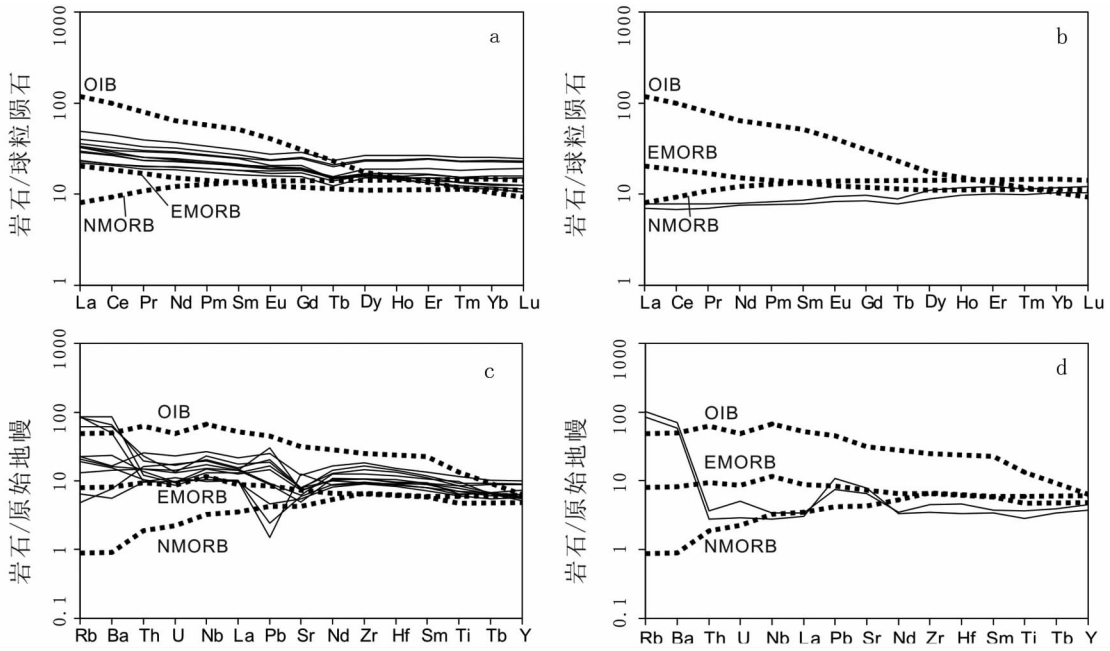


图3 球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a、b, 标准化数据引自 Boyton, 1984) 和原始地幔标准化蛛网图(c、d, 标准化数据引自 McDonough *et al.*, 1992)

实线代表本文样品(a、c: A组样品, b、d: B组样品), 虚线代表引自的 Sun and McDonough(1989) 的平均数据

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution pattern diagrams (a, b, normalizing data from Boyton, 1984) and Primitive mantle-normalized spider diagrams (c, d, normalizing data from McDonough *et al.*, 1992)

Solid lines represent samples in this paper(a、c: Group A, b、d: Group B), dotted lines represent average data from Sun and McDonough(1989)

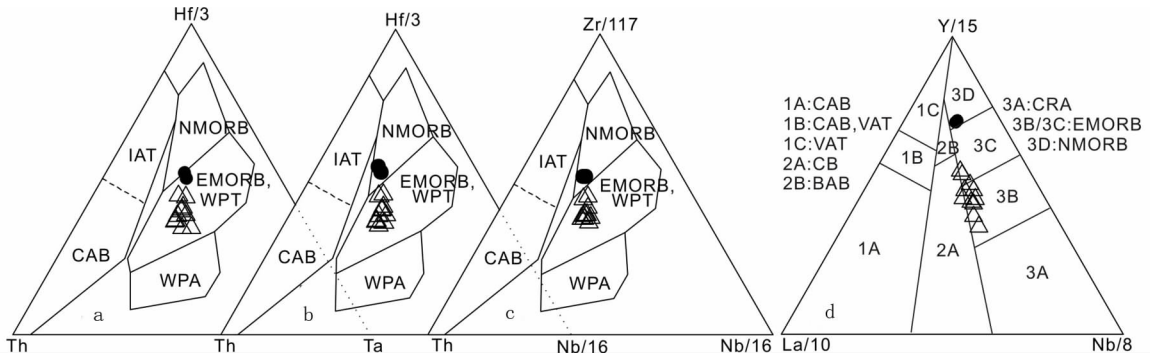


图4 玄武岩构造环境判别图解(一)

A组样品投影在EMORB区域, B组样品投影在NMORB区域. a: Th-Hf-Ta图解, b: Th-Hf-Nb图解, c: Th-Zr-Nb图解(a、b、c: 据 Wood, 1980), d: La-Y-Nb图解(据 Cabanis and Lecolle, 1989, 其中3B区相对3c区更加富集), 图例同图2. NMORB-正常洋中脊玄武岩, EMORB-异常洋中脊玄武岩, WPT-板内拉斑玄武岩, WPA-板内碱性玄武岩, IAT-岛弧拉斑玄武岩, CAB-钙碱性玄武岩, VAT-火山弧拉斑玄武岩, CB-大陆玄武岩, BAB-弧后玄武岩, CRA-大陆裂谷碱性玄武岩

Fig. 4 Discrimination diagrams for tectonic settings I

Group A plots into EMORB while Group B plots into NMORB. a: Th-Hf-Ta diagram, b: Th-Hf-Nb diagram, c: Th-Zr-Nb diagram(a、b、c: after Wood, 1980), d: La-Y-Nb diagram(after Cabanis and Lecolle, 1989, Samples in 3B region are more enriched than in 3c region), explanation for legends see Fig. 2. NMORB: normal mid-ocean ridge basalt, EMORB: enriched mid-ocean ridge basalt, WPT: within plate tholeiite, WPA: within plate alkaline basalt, IAT: island arc tholeiite, CAB: calc-alkaline basalt, VAT: volcanic arc tholeiite, CB: continental basalt, BAB: back arc basalt, CRA: continental rift alkaline basalt

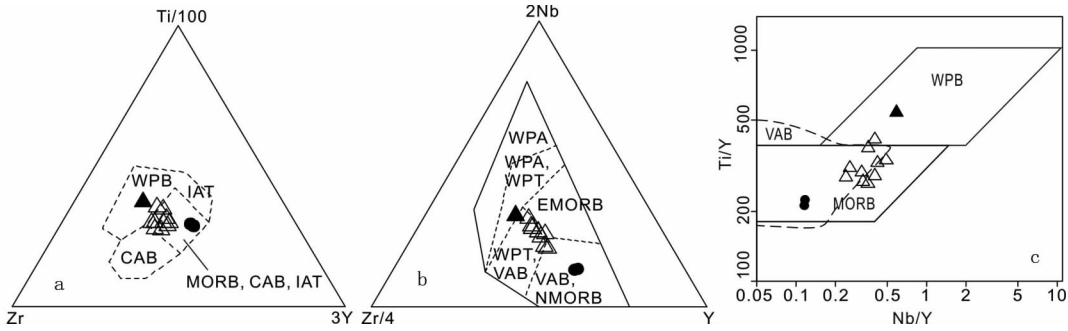


图5 玄武岩构造环境判别图解(二)

显示A组样品向板内玄武岩区域偏移。a:Zr-Ti-Y图解(据Pearce and Cann, 1973),b:Zr-Nb-Y图解(据Meschede, 1986),c:Ti/Y-Nb/Y图解(据Pearce,1982),实心三角代表样品07A-22,其它同图2。MORB-洋中脊玄武岩,WPB-板内玄武岩,VAB-火山弧玄武岩,其它同图4

Fig.5 Discrimination diagrams for tectonic settings II

Show the migration towards within plate basalt of Group A. a: Zr-Ti-Y diagram(after Pearce and Cann, 1973), b: Zr-Nb-Y diagram(after Meschede, 1986), c: Ti/Y-Nb/Y diagram(after Pearce, 1982), the solid triangle represents Sample 07A-22, others see Fig. 2. MORB:mid-ocean ridge basalt, WPB:within plate basalt, VAB:volcanic arc basalt, others see Fig. 4

曙光(1993)的Nb/Th-Nb图解和La/Nb-La图解(图略)区分了岛弧玄武岩、洋中脊玄武岩和板内的洋岛玄武岩三种构造环境,A组样品被投影在洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩之间。

另外,Pearce(1983)的Th/Yb-Ta/Yb图解和Ce/Yb-Ta/Yb图解(图略)表明A、B两组样品都产自MORB环境,但是B组样品的岩浆来自更加亏损的地幔源区。但是,这同样不能判断A组样品是地幔柱影响还是地幔源区不均一性的产物。

汪云亮和孙书勤等学者认为大多数玄武岩构造环境判别图都建立在大洋玄武岩样品的基础之上,他们尝试运用新的参数明确区分大陆和大洋环境产出的样品。在汪云亮等(2001)的Th/Hf-Ta/Hf图解(图略)和孙书勤等(2003, 2007)的Th/Zr-Nb/Zr图解(图略)中,A组样品都投影在了大洋板内区域(统计时这一区域包括了洋岛、海山玄武岩区和TMORB、EMORB区),而B组样品位于NMORB区和大洋板内区的边界上。孙书勤等(2007)指出大陆板内玄武岩的Th/Nb > 0.11, Nb/Zr > 0.04,这与本文样品明显不符。这些都明确指示本文样品原岩是大洋环境的产物而不含大陆玄武岩成分。

综合各个构造环境判别图解以及稀土元素配分模式和微量元素蛛网图,A组样品原岩很可能在EMORB环境下形成,一方面使样品相对正常洋中脊玄武岩更加富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),另一方面也使得A组样品在许多判别图中有向板内玄武岩偏移的趋向,这一点在样品07A-22上表现得最明显。B组样品很可能来源于NMORB,它们明显地相对A组样品亏损大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),其岩浆来自于一个与现代典型洋中脊玄武岩相似的亏损地幔源区。

4.2 大地构造意义

Maruyama *et al.* (1996)和Maruyama and Liou(1998)将

高压/超高压变质带划分为A型和B型两种。前者与大陆碰撞相关,被称为碰撞型,原岩一般是被动陆缘的物质,同时所有的超高压变质带都属于这一类型。后者被称为科迪勒拉型,代表活动陆缘的环境,其原岩是俯冲增生带中的物质。如西非Anti-Atlas带中Bou Azzer蓝片岩具有岛弧玄武岩和洋岛玄武岩的特征(Naidoo *et al.*, 1991),南天山Fan - Karategin变质带中蓝片岩的原岩被认为是地幔柱来源的洋岛玄武岩和EMORB(Volkova and Budanov, 1999),而艾永亮等(2005)对中国境内西南天山变质带中的榴辉岩和蓝片岩的研究也表明它们的原岩是包括海山玄武岩、火山弧玄武岩及深海沉积物的俯冲增生杂岩体。矿物组合表明阿克苏蓝片岩形成的温压条件大约在350~450℃和5.5~7.0kbar范围内(Liou *et al.*, 1996),缺少蓝闪石成分的钠质闪石和硬柱石、文石等更高压的矿物也表明阿克苏蓝片岩属于B型高压变质带(≤12kbar),而不是A型碰撞带(压力可大至45kbar, Maruyama *et al.*, 1996)。本文的研究表明,塔里木克拉通周缘的某一洋壳作为俯冲带混杂岩的一部分经历了蓝片岩相的变质,之后又经历折返并拼贴到大陆边缘。虽然蓝片岩中辉绿岩脉具有板内性质(Liou *et al.*, 1996),表明岩脉侵入之前洋盆已经闭合,但阿克苏蓝片岩俯冲-折返的过程有可能同大多数B型高压变质带的形成时间一样早于陆壳的碰撞(Liou *et al.*, 1996; Maruyama and Liou, 1998)。地层对比研究和古地磁资料表明阿克苏蓝片岩原岩代表的这一洋壳很可能位于塔里木和澳大利亚两个板块之间(Li *et al.*, 1996, 2008; Chen *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2005)。

对于新元古代末期超大陆的裂解及其在塔里木板块中的表现,目前已有大量的讨论(Li *et al.*, 1996; Xu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2008)。但关于在此之前超大陆聚合情况的研究仍然不是十分充分。根据塔里木周缘中、新元古代的被动、主动陆缘沉积和岩浆活动的记录(Zhang *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2008),

推测当时塔里木与一个发育成熟的洋盆相邻。这个洋盆随着陆壳的聚合而逐渐关闭,其中的一部分洋壳俯冲经受高压相变质并重新折返回地表,阿克苏蓝片岩地体是这一部分洋壳的一个露头。对这一洋盆目前还缺少认识,但本文对阿克苏蓝片岩地体样品的地球化学分析表明,这一洋盆中具有现代大洋中最常见的正常型洋中脊玄武岩,也存在略富集的异常型洋中脊玄武岩,这可能反映了地幔柱对这个洋盆的影响,也可能反映了这个地区地幔物质的不均一性,进一步的讨论需要更多的资料来支持。

5 结论

1) 元素含量分析表明在热液蚀变作用和变质作用中活泼的元素包括 K、Rb、Ba、Cs 和 Pb 等在阿克苏蓝片岩地体中已经发生了明显的活动,其含量不能反映原岩的性质。

2) 地球化学特征分析表明阿克苏蓝片岩地体中基性片岩的原岩属于拉斑玄武岩。

3) 稀土元素配分模式、微量元素特征以及玄武岩构造环境图解表明大多数样品具有异常洋脊玄武岩(EMORB)的特征,另两个样品则显示了明显的正常洋脊玄武岩(NMORB)的特征。EMORB 特征的样品相对更加富集强不相容元素和轻稀土(LREE),在判别图解中有向板内玄武岩偏移的趋势。

4) 阿克苏蓝片岩地体可能是新元古代塔里木周缘某个洋盆的残片,这个洋盆的地幔源区可能存在不均一性,也可能在某一时间内受到地幔柱活动的影响,使得部分洋壳玄武岩具有了异常洋脊玄武岩(EMORB)的特征。这部分洋壳作为俯冲带增生楔的一部分经历了深俯冲、高压变质和快速折返的过程,并最终重新出露地表。

致谢 南京大学石火生教授提供了阿克苏地区的陆地卫星图像,于津海教授对镜下矿物鉴定提供了帮助,北京大学朱永峰教授及另一位审稿人对本文提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

References

Ai YL, Zhang LF, Li XP and Qu JF. 2005. Geochemical characteristics and tectonic implications of HP-UHP eclogites and blueschists in southwestern Tianshan, China. *Progress in Natural Science*, 15(11): 1346–1356 (in Chinese)

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite study. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114

Cabanis B and Lecolle M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination de series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences Série II*, 309: 2023–2029

Caby R, Bertrand JM and Black R. 1981. Oceanic closure and continental collision in the Hoggar-Iforas Pan-African segment. In: Kröner A (ed.). *Precambrian Plate Tectonics*. Amsterdam:

Elsevier, 407–434

Caby R. 1994. Precambrian coesite from northern Mali: First record and implications for plate tectonics in the trans-Saharan segment of the Pan-African belt. *European Journal of Mineral*, 6: 235–244

Chen Y, Xu B, Zhan S and Li YG. 2004. First mid-Neoproterozoic paleomagnetic results from the Tarim Basin (NW China) and their geodynamic implications. *Precambrian Research*, 133: 271–281

Cousens BL, Allan JF, Leybourne MI, Chase RL and Wagoner NV. 1995. Mixing of magmas from enriched and depleted mantle sources in the northeast Pacific: West Valley segment, Juan de Fuca Ridge. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 120: 337–357

Donnelly KE, Goldstein SL, Langmuir CH and Spiegelman M. 2004. Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 226: 347–366

Doubleday PA, Leat PT, Alabaster T, Nell PAR and Tranter TH. 1994. Allochthonous oceanic basalts within the Mesozoic accretionary complex of Alexander Island, Antarctica: Remnants of proto-Pacific oceanic crust. *Journal of the Geological Society, London*, 151: 65–78

Floyd PA and Winchester JA. 1975. Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth Planet Science Letters*, 27: 211–218

Franzini M, Leoni L and Saitta M. 1972. A simple method to evaluate the matrix effect in X-ray fluorescence analysis. *X-ray Spectrometry*, 1: 151–154

Gao JF, Lu JJ, Lai MY, Lin YP and Pu W. 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(6): 844–850 (in Chinese with English abstract)

Gao ZJ, Chen JB, Lu SN, Peng CW and Qin ZY. 1993. The Precambrian Geology in northern Xinjiang. *Precambrian Geology (No. 6)*. Beijing: Geological Publishing House, 1–83 (in Chinese)

Guo AL, Zhang GW, Sun YG, Zheng JK, Liu Y and Wang JQ. 2006. Geochemistry and spatial distribution of OIB and MORB in A'nyemaqen ophiolite zone: Evidence of Majixueshan ancient ridge-centered hotspot. *Science in China (Series D)*, 36(7): 618–629 (in Chinese)

Hefferan KP, Admou H, Hilal R, Karson JA, Saquaque A, Juteau T, Bohn MM, Samson SD and Kornprobst JM. 2002. Proterozoic blueschist-bearing mélange in the Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Precambrian Research*, 118: 179–194

Hofmann AW and Hémond C. 2006. The origin of E-MORB. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A257

Huang BC, Xu B, Zhang CX, Li YA and Zhu RX. 2005. Paleomagnetism of the Baiyisi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim Northwest China: A continental fragment of neoproterozoic Western Australia? *Precambrian Research*, 142: 83–92

Jahn BM, Caby R and Monie P. 2001. The oldest UHP eclogites of the World; Age of UHP metamorphism, nature of protoliths and tectonic implications. *Chemical Geology*, 178: 143–158

Jiang WB and Zhang LF. 2001. The PTt path calculation of blueschists on the compositional zonings of sodic amphiboles: An example from Aksu Precambrian blueschists of Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 469–475 (in Chinese with English abstract)

Liou JG, Graham SA, Maruyama S, Wang X, Xiao X, Carroll AR, Chu J, Feng Y, Hendrix MS, Liang YH, Mcknight CL, Tang Y, Wang ZX, Zhao M and Zhu B. 1989. Proterozoic blueschist belt in western China: Best-documented Precambrian blueschists in the world. *Geology*, 17: 1127–1131

Liou JG, Graham SA, Maruyama S and Zhang RY. 1996. Characteristics and tectonic significance of the Late Proterozoic Aksu blueschists and diabasic dikes, Northwest Xinjiang, China. *International Geological Review*, 38: 228–244

Li SG. 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146–157 (in Chinese with English abstract)

Li ZX, Zhang L and Powell CM. 1996. Positions of the East Asian

- cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 593–604
- Li ZX, Bogdanova SV, Collins AS, Davidson A, De Waele B, Ernst RE, Fitzsimons ICW, Fuck RA, Gladkochub DP, Jacobs J, Karlstrom KE, Lu S, Natapov LM, Pease V, Pisarevsky SA, Thrane K and Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160: 179–210
- Lu SN, Li HK, Zhang CL and Niu GH. 2008. Geological and geochronological evidence for Precambrian evolution of the Tarim platform and surroundings. *Precambrian Research*, 160: 94–107
- Maruyama S, Liou JG and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geological Review*, 38: 485–594
- Maruyama S and Liou JG. 1998. Initiation of ultrahigh-pressure metamorphism and its significance on the Proterozoic-Phanerozoic boundary. *Island Arc*, 7: 6–35
- McDonough WF, Sun S, Ringwood AE, Jagoutz E and Hoffmann AW. 1992. K, Rb and Cs in the Earth and Moon and the Evolution of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001–1012
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207–218
- Naidoo DD, Bloomer SH, Saquaque A and Hefferan KP. 1991. Geochemistry and significance of metavolcanic rocks from the Bou Azzer-El Graara ophiolite (Morocco). *Precambrian Research*, 53: 79–97
- Nakajima T, Maruyama S, Uchiumi S, Liou JG, Wang X, Xiao X and Graham SA. 1991. Evidence for late Proterozoic subduction from 700-Myr-old blueschists in China. *Nature*, 346: 263–265
- Niu YL, Collerson KD, Batiza R, Wendt JI and Regelous M. 1999. Origin of enriched-type mid-ocean ridge basalt at ridges far from mantle plumes: The East Pacific Rise at 11° 20' N. *Journal of Geophysical Research*, 104: 7067–7087
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth Planet Science Letters*, 19: 290–300
- Pearce JA. 1976. Statistical Analysis of Major Element Patterns in Basalts. *Journal of Petrology*, 17(1): 15–43
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed.). *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: Wiley, 525–548
- Pearce JA. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magmagenesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth and Norry (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva, 230–249
- Rollison HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, presentation, interpretation. *Longmans*, 1–352
- Schilling JG. 1973. Iceland mantle plume: Geochemical study of the Reykjanes Ridge. *Nature*, 242: 565–571
- Schilling JG, Zajac M, Evans R, Johnston T, White W, Devine JD and Kingsley R. 1983. Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic ridge from 29° N to 73° N. *American Journal of Science*, 283(6): 510–586
- Sun SQ, Wang YL and Zhang CJ. 2003. Discrimination of the tectonic settings of basalts by Th, Nb and Zr. *Geological Review*, 49(1): 40–47 (in Chinese with English abstract)
- Sun SQ, Zhang CJ and Zao SJ. 2007. Identification of the tectonic settings for continental intraplate by trace elements. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 104–109 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society London Special Publication, 42: 313–345
- Volkova NI and Budanov VI. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karategin transitional blueschist/greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan: Seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 47: 201–216
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413–421 (in Chinese with English abstract)
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet Science Letters*, 50: 11–30
- Xiao XC. 1990. Proterozoic blueschist belt in Western China: Best-documented Precambrian blueschists in the world. *Xingjiang Geology*, 8(1): 12–21 (in Chinese with English abstract)
- Xiong JB and Wang WY. 1986. Preliminary research on Aksu Group of the Presinian. *Xingjiang Geology*, 4(4): 33–46 (in Chinese with English abstract)
- Xu B, Jian P, Zheng H, Zou H, Zhang L and Liu DY. 2005. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations. *Precambrian Research*, 136: 107–123
- Zhang CL, Dong YG, Zhao Y and Wang AG. 2003. Geochemistry of Mesoproterozoic volcanics in West Kunlun: Evidence for plate tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 78: 532–542
- Zhang CL, Li XH, Li ZX, Lu SN, Ye HF and Li HM. 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Qurugtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Precambrian Research*, 152: 149–168
- Zhang LF, Jiang WB, Wei CJ and Dong SB. 1998. Discovery of deerite from the Aksu Precambrian blueschist terrane and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 28(6): 539–545 (in Chinese)
- Zhu WB, Zhang ZY, Shu LS, Lu HF, Su JB and Yang W. 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Neoproterozoic Korla mafic dykes in the northern Tarim Block, NW China: Implications for the long-lasting breakup process of Rodinia. *Journal of the Geological Society, London*, 165: 887–890
- Zhu YF, Sun SH, Gu LB, Ogasawara Y, Jiang N and Honma H. 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: Geochemistry, magma sources and petrogenesis. *Geological Magazine*, 138(2): 101–115
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201–2212
- Zindler A, Staudigel H and Batiza R. 1984. Isotope and trace element geochemistry of young Pacific seamounts: Implications for the scale of upper mantle heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 70: 175–195

附中文参考文献

- 艾永亮, 张立飞, 李旭平, 曲军峰. 2005. 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. *自然科学进展*, 15(11): 1346–1356
- 高剑锋, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. *南京大学学报(自然科学)*, 39(6): 844–850
- 高振家, 陈晋鑑, 陆松年, 彭昌文, 秦正永. 1993. 新疆北部前寒武系. 见: 地质矿产部《前寒武纪地质》编辑委员会编. 前寒武纪地质(第6号). 北京: 地质出版社, 1–171
- 郭安林, 张国伟, 孙廷贵, 郑健康, 刘晔, 王建其. 2006. 阿尼玛卿蛇绿

- 岩带 OIB 和 MORB 的地球化学及空间分布特征: 玛积雪山古洋脊热点构造证据. 中国科学(D 辑), 36(7): 618-629
- 姜文波, 张立飞. 2001. 利用钠质角闪石成分环带计算蓝片岩的 PTt 轨迹——以新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩为例. 岩石学报, 017(03): 469-475
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图. 岩石学报, 9(2): 146-157
- 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 2003. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别. 地质论评, 49(1): 40-47
- 孙书勤, 张成江, 赵松江. 2007. 大陆板内构造环境的微量元素判别. 大地构造与成矿学, 31(1): 104-109
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 17(3): 413-421
- 肖序常. 1990. 中国西部元古代蓝片岩带——世界上保存最好的前寒武纪蓝片岩. 新疆地质, 8(1): 12-21
- 熊纪斌, 王务严. 1986. 前震旦系阿克苏群的初步研究. 新疆地质, 4(4): 33-46
- 张立飞, 姜文波, 魏春景, 董申保. 1998. 新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩地体中迪尔闪石的发现及其地质意义. 中国科学(D 辑), 28(6): 539-545