1000-0569/2006/022(01)-0049-56 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

中天山北缘干沟蛇绿混杂岩带的地质地球化学*

董云鹏 周鼎武 张国伟 赵霞 罗金海 徐静刚

DONG YunPeng, ZHOU DingWu, ZHANG GuoWei, ZHAO Xia, LUO JinHai and XU JingGang

西北大学大陆动力学教育部重点实验室,西北大学地质学系,西安 710069

The Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, *China*

2005-05-10 收稿,2005-12-17 改回.

Dong YP, Zhou DW, Zhang GW, Zhao X, Luo JH and Xu JG. 2006. Geology and geochemistry of the Gangou ophiolitic mélange at the northern margin of the Middle Tianshan Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 49 – 56

Abstract Based on the geological mapping, the Gangou ophiolitic mélange (GOM) in Gangou, Mishigou and Wusutong area, Turkson County has been distinguished from the lower Paleozoic strata along the boundary fault between the Northern Tianshan Belt (NTB) and Central Tianshan Belt (CTB). It can be divided into two kinds of assemblages, which are the tectonic blocks and the mélange matrix. The tectonic blocks are mainly composed of some relics of the ophiolites and island-arc volcanic rocks, whereas the mélange matrix is composed of some volcanic-sedimentary rocks formed in a fore-arc setting. The ophiolites in the Gangou area are mainly composed of meta-peridotites, gabbros, diabases and meta-basalts (green schist), which are scattered and overthrusted into the mélange matrix of volcanic-sedimentary rocks. The geochemistry of the meta-peridotites is characterized by low SiO_2, TiO_2, Al_2O_3 and CaO contents, and high MgO contents, which are similar to that of the buchnerites in a mid-oceanic ridge. In addition to, the characteristics of lowΣREE, depleted in LREE, enriched in Cr and Ni contents are similar to that of the ultra-mafic rocks in a typical ophiolite. The basalts possess middling TiO_2 contents, high MgO contents. They also show geochemical characteristics of low contents and unfractionation in HFSE, without any enrichment in Th and depletion in Nb and Ta. All above evidences suggest that the peridotites and basalts from the Gangou area were derived from a depleted mantle source in a mid-oceanic ridge setting. The island-arc volcanic rocks are mainly distributed in the south part of the GOM belt. They are mainly composed mugearites which are characterized by high MgO, Al_2O_3, K_2O and Na_2O contents, low TiO_2 and CaO contents. Additionally, they are enriched in LILE (Rb, Ba, Zr, Th, U and LREE), depleted in Nb and Ta. All these geochemical signatures show that the magma source were inputted by some subducted components, which indicated that they were formed in an island-arc setting in an active continental margin. It is the ophiolites and island-arc volcanic rocks distributing in the GOM that show there had existed a paleo-ocean and subduction between the CTB and NTB.

Key words Geochemistry, Ophiolitic Mélange, tectonic setting, Gangou, Tianshan orogenic belt

摘 要 中天山北缘干沟蛇绿混杂岩带主要由属于弧前火山-沉积岩系的混杂基质及其裹胁的构造岩块组成,后者主要包括蛇绿岩残块、岛弧火山岩残块,以及大理岩、花岗岩等外来构造岩块。并因蛇绿岩及岛弧火山岩的出露而成为古板块缝合带的标志。干沟蛇绿岩岩石组合出露较为齐全,包括变质橄榄岩(蛇纹岩)、辉长岩、辉绿岩、玄武岩等构造岩块,但几乎均呈零散的构造岩块,散布于混杂基质中。变质橄榄岩以相对低 SiO_2、TiO_2、Al_2O_3和 CaO、高 MgO 为特征,类似于大洋中脊二辉橄榄岩主元素化学组成;ΣREE 低,LREE 亏损,富集 Cr、Ni,与世界典型蛇绿岩的超镁铁单元岩石地球化学特征类似。玄武岩的地球化学研究表明其以中等 TiO_2、高 MgO,不具有 Nb、Ta 亏损和 Th 富集为特征;与 MORB 相比较,高场强元素(HSFE)丰度低且平坦不分异;与原始地幔相比较,具有类似于 N-MORB 的亏损地幔特征,主、微量元素的地球化学特征显示岩石应形成于洋中脊构造环境。岛弧型火山岩出露于混杂岩带南部,主要为橄榄粗安岩;主元素以高 MgO、Al_2O_3、K_2O、Na_2O、$K_2O/Na_2O\approx1$、低 TiO_2和 CaO 含量,富含挥发份为特征。同时,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Zr、Th、U 和 LREE 等,并以 Nb、Ta 亏损和 Th 富

* 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2001CB409801)、国家自然科学基金项目(40472115)和中国地质调查局项目(200113000022)联合资助

第一作者简介:董云鹏,男,生于 1967 年 11 月,博士,教授,构造地质学和地球化学,E-mail:dongyp@nwu.edu.cn

集显示其成因与消减作用有关,形成于板块俯冲过程中的活动大陆边缘火山弧环境。干沟区段的混杂岩因存在蛇绿岩和与俯冲作用有关的火山岩而厘定为蛇绿混杂岩带,并指示沿中天山北缘曾存在古洋盆及其俯冲消减作用。

关键词 地球化学;蛇绿混杂岩;构造环境;干沟;天山造山带
中图法分类号 P588.125

中国天山造山带横亘于准噶尔与塔里木板块之间,是由于准噶尔地块、塔里木地块及其间的哈萨克斯坦-伊犁地块长期相互作用而成的中亚型造山带,长期受到地学界广泛关注与研究,并取得了很大进展(王作勋等,1990;高俊等,1993;汤耀庆,1995;李锦轶等,1999;何国琦等,2001;Xiao WJ *et al.*, 2004)。尽管如此,古生代天山造山作用的性质、演化时限与过程、及其动力学仍有较大争议。现有的研究表明,天山造山带可以中天山北缘边界断裂带和中天山南缘边界断裂带为界分为北天山、中天山和南天山。中天山北缘边界断裂带在研究区主要沿干沟、米什沟、乌苏通沟、冰达坂呈东西向展布(董云鹏等,2005),东延接阿齐克库都克断裂,向东被阿尔金北东向走滑断裂所截。西延经依连哈比尔尕,过艾比湖向西与西准噶尔南缘的唐巴勒蛇绿混杂岩带(冯益民,1986;朱宝清等,1987;张驰,1992;马瑞士等,1993)相接。该带多被认为是古生代准噶尔洋盆闭合后的缝合带,但是,关于古洋盆存在的确切证据,包括蛇绿岩、相关火山岩等仍存在不同认识。马瑞士等(1993)和郭召杰等(1993)认为中天山北缘边界断裂带中段的干沟、米什沟、乌苏通沟地区出露有蛇绿混杂岩。但是,高长林等(1995)的主元素和稀土元素地球化学研究表明,乌苏通、米什沟、干沟的基性火山岩相当于洋岛火山岩,缺乏标准的 MORB 型岩石。尽管绝大多数研究者都认为中天山北缘边界断裂带代表了板块缝合带,但尚未鉴定出作为板块缝合线典型代表的 N-MORB 型洋中脊蛇绿岩。已有的研究也因缺乏系统的主、微量元素地球化学的综合分析而受到质疑,直接影响对中天山北缘边界断裂带中是否存在蛇绿混杂岩,其中关键的蛇绿岩和相关火山岩的地球化学特征,以及其地幔源区性质等关键问题的认识。进而制约着对天山古生代构造格局、演化过程及其地幔动力学的理解。

在野外填图的基础上,本文通过地质、地球化学的综合研究,在中天山北缘干沟-乌苏通区段的构造混杂岩带中厘定出 MORB 型蛇绿岩和与俯冲作用相关的火山岩,从而为中天山北缘古洋盆的存在及其俯冲消减作用提供了直接证据。

1 干沟蛇绿混杂岩基本地质特征

野外地质调查研究表明,中天山北缘边界断裂带表现为一条宽约 2~4km 的蛇绿混杂岩带,明显分隔北侧的北天山晚古生代构造岩相带和南侧的中天山前寒武纪-早古生代构造岩相带。蛇绿构造混杂岩带由混杂基质和构造岩块组成,混杂基质主要为强烈剪切变形的弧前沉积-火山碎屑岩建造,构造岩块主要为蛇绿岩块和岛弧火山岩块。两者共同标定中天山北缘边界断裂带具古板块缝合线性质。该混杂岩带总体表现为一条强变形带,但其内部变形强弱程度并不均一,存在强应变带和弱应变域之分。弱应变域主要由透镜状的弱变形蛇绿岩或火山岩构造岩块构成,而强应变带由强烈剪切变形的混杂基质构成,剪切包容前述构造岩块,共同构成具有古板块缝合带指示意义的蛇绿混杂岩带,并以强烈变形的大型韧性剪切带为界分别与南侧的前寒武系-下古生界和北侧的上古生界相分隔。

干沟地区的蛇绿混杂岩带分布于干沟道班以北宽约 4km 的范围内(图 1)。原 1:20 万地质图划归志留系阿哈布拉克群,但是本次研究发现以干沟道班为界,南北两侧的岩石构造组合、变质变形特征等均明显不同,应予以解体。干沟道班以南的下古生界(原阿哈布拉克群)岩石组合主要为绿色长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩互层,具有复理石建造特征。甚低级变质或几乎未变质,原始沉积层理发育,单层厚度薄,多在几毫米到数厘米范围内,局部区段变质较深,形成千枚岩、绢云石英片岩、绿泥石英片岩,应为车自成等(1994)命名的下志留统米什沟组沉积岩系。而干沟道班以北区段的岩石变质程度可达绿片岩相-低绿片岩相,相当于车自成等(1994)定义之可可乃克群。本次研究发现其岩石组合具有混杂岩特征,主要包括两套岩石建造:混杂岩基质和蛇绿岩构造残块。构造岩块主要包括变质橄榄岩(蛇纹岩)、辉长岩、辉绿岩、玄武岩,均呈无根构造岩块、岩片或透镜体状混杂于由火山-沉积岩系组成的混杂基质之中。混杂基质主要为绿片岩(变玄武岩)、绿泥石英片岩、绢云母片岩、黑云石英片岩等。原岩是一套以火山岩为主夹沉积细碎屑岩的火山-沉积建造,总体岩石组合类似于弧前火山-沉积建造。该套混杂岩带北部以宽约 1km 的断层为界与北天山下石炭统雅满苏组相分隔,后者主要由中-基性火山岩、凝灰岩、凝灰质角砾岩、夹有少量砂岩、粉砂岩组成。

本次地球化学研究样品采自干沟地区,主要包括两类:蛇绿岩残块之变质橄榄岩 2 件和玄武岩样品 3 件,与俯冲作用(SSZ)有关的火山岩样品 8 件。元素化学分析在西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成,主元素采用 XRF 法在 RIX-2100 仪器上分析,微量元素用 ELAN6100DRC 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。用标样 BHVO-1、AGV-1 和 G-2 做分析样品元素浓度的校正标准,并随机选取 4 个样品为重复样。详细分析方法和流程参见文献(Gao S *et al.*,1999)。所有元素分析精度优于 5%,分析结果列于表 1。

2 干沟 MORB 型蛇绿岩

干沟-乌苏通地区的蛇绿岩岩石组合较为齐全,但在剖面

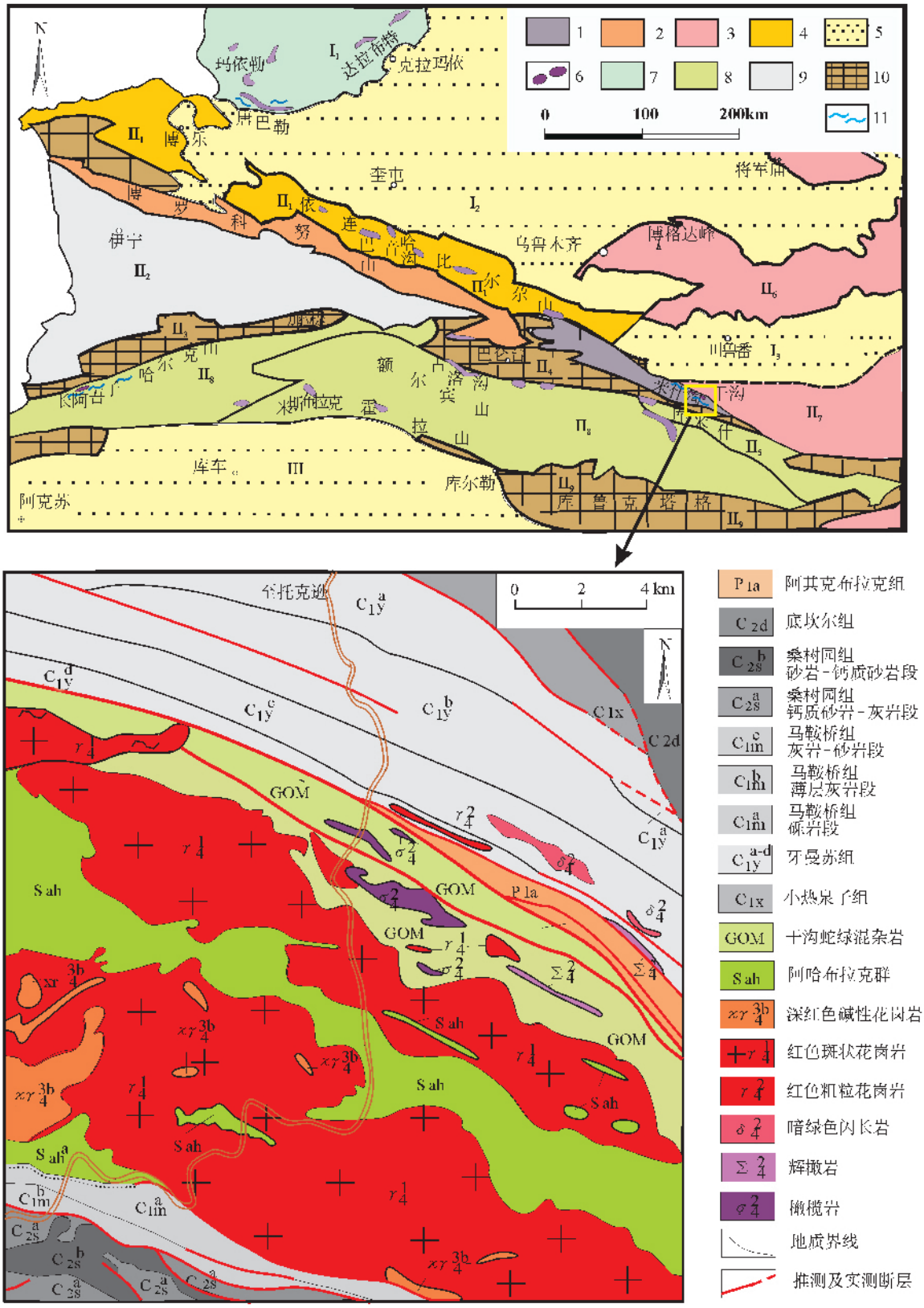

图 1　天山造山带构造单元区划简图(a)和干沟蛇绿混杂岩地质略图(b)

区域地质图图例说明 1-干沟-乌苏通蛇绿混杂岩；2-中天山北缘博罗科努带；3-北天山构造带；4-中天山北缘依连哈比尔尔带；5-中新生代沉积盆地；6-蛇绿岩；7-西准噶尔带；8-南天山构造带；9-伊犁地块；10-前寒武纪基底；11-蓝片岩

Fig. 1　Simplified tectonic map (a) of the Tianshan orogenic belt and the sketch map (b) of the Gangou ophiolitic melage

表 1 干沟蛇绿岩和 SSZ 型火山岩主(%)、微量元素化学 $\times 10^{-6}$ 组成

Table 1 Major element (%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the Gangou ophiolite and SSZ-type volcanic rocks

岩性	蛇绿岩变质橄榄岩		蛇绿岩玄武岩			SSZ 型玄武岩和玄武安山岩							
样品	01-07	01-07-2	01-86	01-87	01-92	01-69	01-71	01-72	01-73	01-74	01-75	01-76	01-77
SiO_2	41.46	41.39	44.52	43.14	47.58	54.13	55.37	51.43	54.78	54.31	50.69	54.16	54.60
TiO_2	0.01	0.01	1.63	1.12	1.29	0.96	1.00	1.06	0.93	0.98	1.04	0.96	0.96
Al_2O_3	0.67	0.68	15.19	14.38	15.17	18.18	18.48	18.33	18.29	18.27	17.97	18.18	18.17
ΣFe_2O_3	7.29	7.33	11.44	11.51	10.11	5.99	5.83	6.89	5.84	5.70	6.38	5.91	6.00
MnO	0.12	0.12	0.15	0.20	0.16	0.10	0.10	0.12	0.09	0.10	0.13	0.11	0.10
MgO	38.13	38.19	9.13	12.19	7.88	7.45	6.21	8.90	6.70	6.87	10.32	7.47	7.11
CaO	0.23	0.23	12.32	13.39	10.07	0.65	0.64	0.67	0.64	0.62	1.41	0.62	0.65
Na_2O	0.08	0.06	1.65	0.97	2.95	4.74	5.20	3.92	4.74	5.08	5.51	4.73	4.59
K_2O	0.01	0.01	1.05	0.28	0.83	4.27	4.13	4.31	4.61	3.96	1.50	4.27	4.59
P_2O_5	0.01	0.01	0.21	0.12	0.13	0.43	0.45	0.48	0.44	0.45	0.48	0.43	0.43
烧失量	11.90	12.18	2.28	2.38	3.38	3.49	3.03	4.20	3.31	3.19	4.60	3.42	3.23
总量	99.91	100.21	99.57	99.68	99.55	100.39	100.44	100.31	100.37	99.53	100.03	100.26	100.43
Sc	6.22	6.40	35.5	34.0	40.6	7.2	7.7	8.0	6.9	7.3	7.9	7.3	7.4
V	14.9	15.2	209	181	215	37.7	40.3	47.6	37.3	46.2	48.4	37.8	44.9
Cr	2547	2474	208.6	253.0	272.6	1.02	1.11	1.69	1.42	5.83	1.09	1.92	1.03
Ni	2475	2471	69	123	75	1.16	0.59	1.78	3.83	2.91	4.5	2.76	0.84
Zn	45.8	45.5	58.5	48.4	48.7	78	84	106	75.6	87	91	80	88
Rb	0.890	0.920	39.32	3.72	37.40	83.7	81.6	86.5	89.5	75.0	30.06	86.8	93.1
Sr	9.69	0.230	669	282	483	75.2	89.0	119.8	91.2	79.1	104.2	79.0	80.1
Y	0.400	0.410	32.1	22.5	27.3	32.5	35.7	36.7	33.0	34.1	34.9	33.8	34.4
Zr	0.180	0.130	150	80.5	95.9	364	381	422	362	364	362	371	375
Nb	0.240	0.240	7.70	3.57	4.19	13.7	14.2	14.1	13.3	13.4	13.4	13.8	15.9
Cs	2.41	2.44	3.23	0.611	3.08	1.57	1.46	2.66	1.56	1.37	1.35	1.78	1.60
Ba	1.82	2.15	274.5	68.8	159.5	835	723	948	843	657	363.5	871	903
Hf	0.015	0.013	3.38	2.01	2.42	8.14	8.55	8.26	8.18	8.21	8.23	8.53	8.42
Ta	0.023	0.024	0.53	0.24	0.29	0.91	0.96	0.93	0.89	0.92	0.90	0.94	1.04
Pb	4.24	4.22	2.11	2.23	1.87	8.45	1.76	1.80	1.71	2.08	2.37	6.65	3.02
Th	0.070	0.072	0.56	0.269	0.342	6.53	6.81	6.53	6.47	6.44	6.25	6.69	6.77
U	0.047	0.046	0.19	0.129	0.118	1.42	1.49	1.42	1.41	1.40	1.35	1.47	1.46
La	0.142	0.130	8.59	4.54	5.24	42.7	49.0	53.4	37.9	44.5	41.3	47.8	44.5
Ce	0.290	0.260	22.6	11.72	13.71	87.0	101.9	108.5	85.4	94.6	95.5	97.1	95.0
Pr	0.033	0.031	3.40	1.86	2.18	11.11	13.1	13.7	11.21	12.3	12.5	12.2	12.1
Nd	0.13	0.110	16.4	9.58	11.19	44.2	52.2	54.4	45.1	48.9	50.7	47.9	48.3
Sm	0.032	0.025	4.38	2.83	3.38	7.86	9.34	9.65	8.26	8.82	9.07	8.19	8.49
Eu	0.018	0.017	1.65	1.24	1.12	1.92	2.28	2.42	2.20	2.11	1.98	1.97	2.05
Gd	0.034	0.031	4.80	3.21	3.76	7.04	8.35	8.56	7.38	7.87	7.96	7.31	7.71
Tb	0.005	0.006	0.87	0.61	0.72	1.02	1.17	1.22	1.07	1.15	1.16	1.06	1.10
Dy	0.038	0.036	5.16	3.63	4.42	5.62	6.26	6.48	5.78	6.14	6.25	5.89	6.04
Ho	0.009	0.009	1.12	0.80	0.97	1.15	1.26	1.27	1.16	1.22	1.26	1.21	1.22
Er	0.030	0.028	3.01	2.18	2.61	3.24	3.53	3.55	3.30	3.41	3.50	3.43	3.46
Tm	0.006	0.006	0.45	0.34	0.40	0.50	0.53	0.54	0.51	0.52	0.53	0.53	0.53
Yb	0.046	0.045	2.93	2.16	2.58	3.36	3.58	3.55	3.36	3.46	3.45	3.53	3.51
Lu	0.009	0.010	0.44	0.32	0.38	0.53	0.56	0.55	0.53	0.54	0.54	0.55	0.54

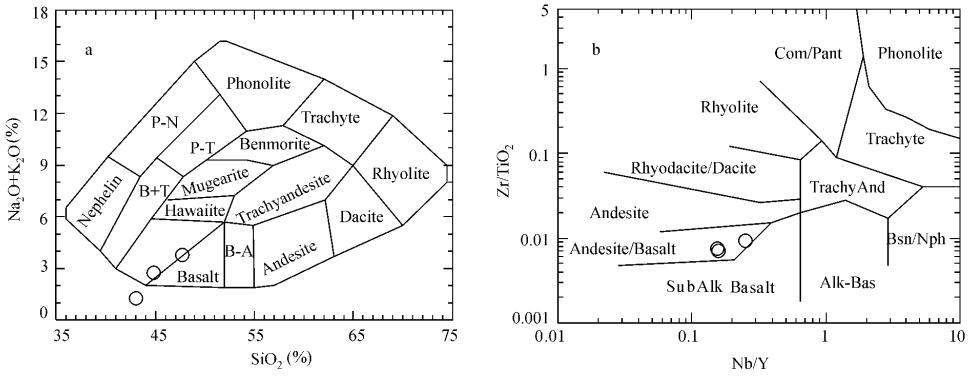

图 2　岩石分类图解

a-$Na_2O + K_2O$-SiO_2（TAS）图解；b-Zr/TiO_2-Nb/Y 图解

Fig. 2　Classification of the basalts from the Gangou ophiolite

中却不连续，均呈构造岩块状包容在由绿片岩-绿泥石英片岩（弧前火山-沉积岩系）组成的混杂基质中。尤以干沟地区蛇绿岩出露最好，在约 2km 的宽度范围内出现大量的蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩的构造岩块，裹胁在混杂基质中，构造岩块长轴多平行于基质片理面，局部区段可见蛇绿岩构造残块相互以逆冲断层叠置在一起。

2.1　变质橄榄岩岩石地球化学

变质橄榄岩主要出露于干沟道班北侧，呈大小不等的无根岩块状侵位于混杂岩基质中，且多已蛇纹石化，原岩为纯橄岩和方辉橄榄岩。显微镜下观察可见残余的橄榄石斑晶和少量辉石斑晶。主元素化学分析显示变质橄榄岩以相对高 SiO_2（41.39% ~41.46%）和 MgO（38.13% ~38.19%），低 TiO_2（0.01%）、Al_2O_3（0.67% ~0.68%）和 CaO（0.23%）为特征，类似于大洋中脊二辉橄榄岩的化学组成。稀土元素总量低，球粒陨石标准化的超镁铁质岩石稀土元素配分型式显示 LREE 亏损。另外，岩石富集相容元素 Cr、Ni。与世界典型蛇绿岩的超镁铁质单元岩石地球化学组成类似。

2.2　玄武岩岩石化学、分类及其主元素地球化学

本研究蛇绿岩之玄武岩代表性样品主要采自干沟地区混杂岩带北段的玄武岩构造块体，岩石主要为绿色致密块状构造，显微镜下可见矿物组合主要为长石、辉石斑晶，基质多已形成绿泥石。主元素分析结果（表 1）表明，岩石样品 SiO_2 含量变化在 43.14% ~47.58% 之间，以富 MgO（7.88% ~12.19%）、贫 Na_2O（0.97% ~2.95%）和 K_2O（0.28% ~1.05%），以及 $Na_2O > K_2O$ 为特征，具原始岩浆成分特点。MgO 与 CaO、MnO、ΣFe_2O_3、Na_2O 正相关，与 SiO_2 负相关。在（$K_2O + Na_2O$）-SiO_2（TAS）图上（图 2a），3 件样品分别属于苦橄玄武岩和玄武岩，若考虑换算成干体系则均应为玄武岩。投影点均落在碱性系列与亚碱性系列分界线上。考虑到蚀变过程中 K、Na 等碱金属元素的活动性较强，进一步利用蚀变过程中不活泼元素（Zr、Ti、Nb、Y）进行判别，在 Zr/TiO_2-Nb/Y 图解（图 2b）上，所有样品均为亚碱系列。然而，由于样品的 Zr 丰度较高，而使得样品飘入玄武安山岩区。

2.3　稀土和微量元素地球化学

代表性玄武岩样品稀土元素总量低，是球粒陨石的 10 ~20 倍。球粒陨石标准化的稀土元素配分图解（图 3）显示，3 件玄武岩均具有平坦的 REE 配分型式，LREE/HREE 比值近似等于 1。同时各样品 REE 配分谱线相互平行，只有位置的高低，显示其稀土分异程度相当，具有同源岩浆特征。

一般地，岛弧玄武岩和部分亏损型洋中脊玄武岩（N-MORB）的 Ta、Nb 丰度分别不大于 0.7×10^{-6} 和 12×10^{-6}，Nb/La < 1，Hf/Ta > 5，La/Ta > 15，Ti/Y < 350；而板内玄武岩（WPB）、过渡型洋中脊玄武岩（T-MORB）和富集型洋中脊玄武岩（E-MORB）则正好相反（Condie KC，1989）。干沟玄武岩的 Ta 丰度（0.24×10^{-6} ~0.53×10^{-6}）和 Nb 丰度（3.57×10^{-6} ~7.70×10^{-6}）较低，Nb/La 比值为 0.79 ~0.90，Hf/Ta 比值为 6.4 ~8.4，La/Ta 比值为 16 ~19，Ti/Y 比值为 283 ~305。表明该玄武岩成因、环境与 WPB、T-MORB、E-MORB 岩石构造环境无关，类似于岛弧玄武岩或 N-MORB 的形成环境。但是，岛弧玄武岩总是以 TiO_2、Nb、Ta 亏损和 Th 富集为标志，而干沟玄武岩 TiO_2 含量较高，变化范围在 1.12% ~1.63% 之间，明显高于岛弧火山岩 TiO_2 含量。同时，不具有

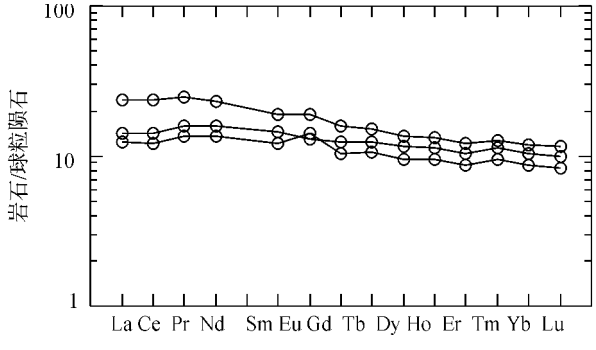

图 3　玄武岩球粒陨石标准化的稀土元素配分模式

Fig. 3　The REE distributin patterns for basalts from the Gangou ophiolite

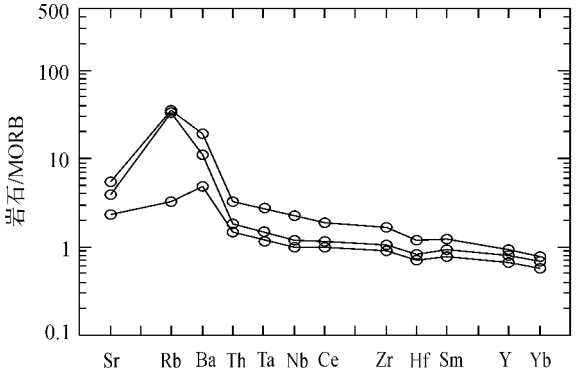

图 4 玄武岩 MORB 标准化的微量元素配分模式

Fig. 4 MORB-normalized incompatible elements spidergram for basalts from the Gangou ophiolite

Nb、Ta 亏损和 Th 富集特征。在 MORB 标准化的微量元素比值蛛网图(图 4)上,干沟玄武岩以轻微富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba,高场强元素(HSFE)丰度低且平坦不分异为特征,尤其是 Nb、Ta 和 Th 具有平坦的分布特征。明显区别于岛弧火山岩的地球化学特征,更不同于板内玄武岩(包括 OIB)富集大部分不相容元素的"大隆起"型配分型式(Pearce JA, 1982;Wilson M,1989)。

在原始地幔标准化的微量元素配分图解(图 5)中,除了大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、Sr 富集外,其余元素几乎不存在分异现象,尤其是 Th、U、Nb、La、Ce 和 Pb 的分配曲线明显具有左倾的趋势。剔除大离子亲石元素受后期影响而升高的因素外,其余元素地球化学特征完全类似于洋中脊玄武岩(MORB)的地球化学性状。

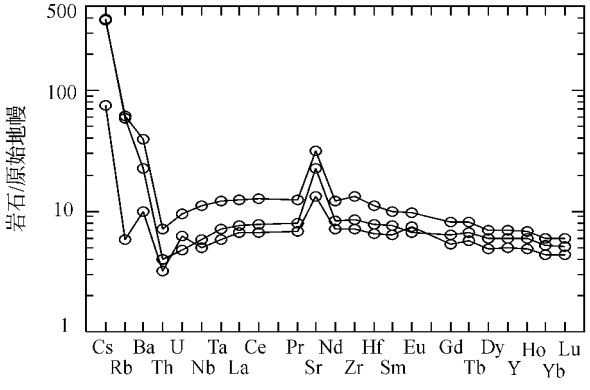

图 5 玄武岩原始地幔标准化的微量元素配分模式

Fig. 5 Primitive mantle normalized incompatible elements spidergram for basalts from the Gangou ophiolite

3 SSZ 型火山岩

3.1 基本地质特征

干沟 SSZ 型火山岩主要分布于混杂岩带的南段,与北侧的 MORB 型蛇绿岩之间以强烈剪切变形的火山-沉积岩系相分隔。总体呈多个构造岩片,并与蛇纹岩块体以及外来的花岗岩块相互逆冲叠置,共同以断层关系侵位于由火山-沉积岩系组成的混杂基质中(图 1b)。岩石样品主要采集块状构造的熔岩,岩石呈绿色、致密块状构造,斑状或变余斑状结构。变质程度多为低绿片岩-绿片岩相。显微镜下观察岩石矿物组合表明,斑晶矿物主要为斜长石、辉石和少量的角闪石,长石和辉石均有一定程度绿泥石化。基质主要为火山玻璃或微粒—细粒变晶结构的绿泥石、钠长石细小颗粒。

3.2 主元素地球化学及其分类

干沟岛弧型火山岩样品化学成分分析结果列于表 1 中。岩石样品 SiO_2 含量较高,除 01-72 和 01-75 两件样品 SiO_2 含量分别为 51.43% 和 50.69% 外,其余样品 SiO_2 含量均变化于 54.13% ~55.37%。考虑到所有样品均具有较高的烧失量(3.03% ~4.60%),尤其是样品 01-72 和 01-75 烧失量更是达到 4.2% 和 4.6%,因此,若换算成干体系,本区岩石样品均应为玄武安山岩。所有样品均具有高 Al_2O_3(17.97% ~18.48%)、MgO (6.21% ~10.32%),低 CaO (0.62% ~1.41%)、TiO_2 (0.93% ~1.06%) 和 ΣFe_2O_3 (5.70% ~6.89%)的特征,MgO 与 SiO_2 负相关,与 CaO 正相关。更为重要的是本次研究样品均以高 Na_2O(3.92% ~5.51%)、K_2O (3.96% ~4.61%)为特征。在 TAS 图解(图 6)中,样品均落在碱性系列的橄榄粗安岩范围或其附近。

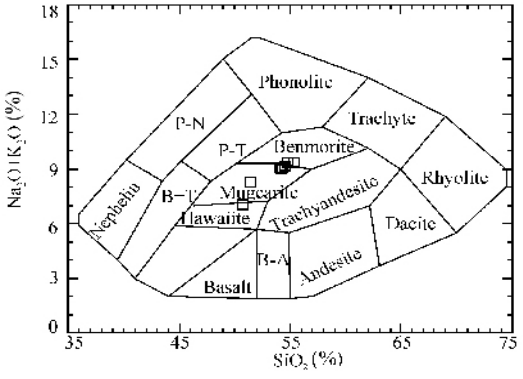

图 6 干沟 SSZ 型火山岩的($Na_2O + K_2O$)-SiO_2图解

Fig. 6 Classification of the SSZ-type volcanic rocks from Gangon

尽管本区岩石有明显的蚀变和低绿片岩-绿片岩相变质作用,Na、K 等活动性元素很可能发生了迁移,但考虑到岩石样品的 Na_2O(3.92% ~5.51%)、K_2O(3.96% ~4.61%)变化范围较小,可能反映原始碱性岩石成因信息。总之,该系列岩石以高 MgO、Al_2O_3、K_2O、Na_2O,$K_2O/Na_2O \approx 1$,低 TiO_2 为特征,类似于钾玄岩地球化学性状,属于岛弧碱性岩系列。高 MgO 含量(6.21% ~10.32%)类似于高镁安山岩。况且,Al_2O_3 含量达 17.97% ~18.48%,也指示其成因可能与板块俯冲作用有关。

3.3 稀土和微量元素地球化学

在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解(图 7)上,干沟

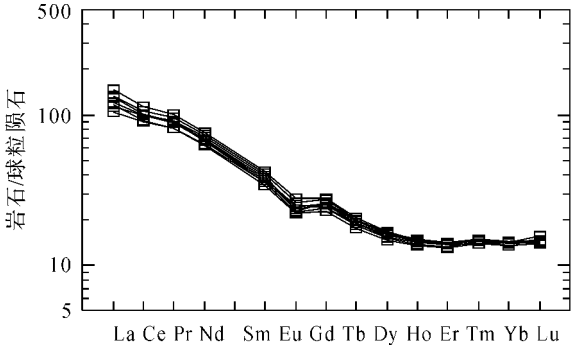

图 7 SSZ 型火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解

Fig. 7 The REE distributin patterns for SSZ-type volcanic rocks

SSZ 型火山岩样品显示强烈的轻稀土元素富集特征，轻重稀土分异明显，尤其是 LREE 相对于 HREE 分异更为明显。ΣREE 高，但主要是 LREE 总量高，而 HREE 总量相对较低，仅是球粒陨石的 10～20 倍。REE 配分图解显示存在微弱的 Eu 负异常，可能归因于斜长石的分离结晶作用。

地幔橄榄岩派生岩石一般具有高 Ni(250×10^{-6}～300×10^{-6})和 Cr(500×10^{-6}～600×10^{-6})特点，干沟橄榄粗安岩 Ni(0.59×10^{-6}～4.5×10^{-6})和 Cr(1.02×10^{-6}～5.85×10^{-6})丰度极低，甚至比岛弧火山岩 Ni(30×10^{-6})和 Cr(50×10^{-6})丰度低一个数量级，Ni 和 Cr 的降低分别被归因于橄榄石和尖晶石、单斜辉石的分离作用(Wilson M，1989)。

在原始地幔标准化的微量元素比值蛛网图(图 8)上，干沟 SSZ 型火山岩以富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 、U、Zr 和 LREE，高场强元素(HSFE)分异明显为特征，尤其是出现 Nb、Ta 亏损和 Th 富集特征，类似于岛弧火山岩的地球化学性状，明显不同于干沟 MORB 型玄武岩的地球化学特征。

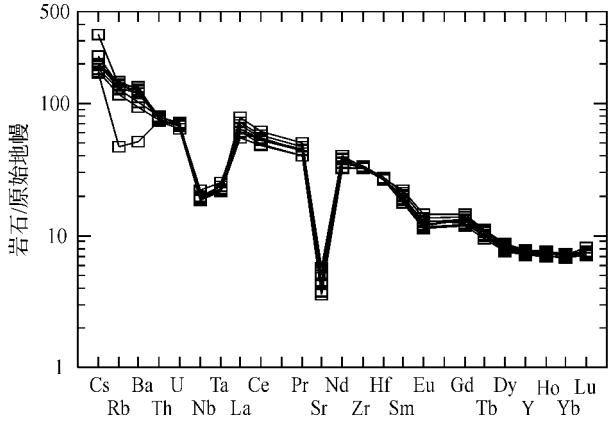

图 8 SSZ 型火山岩原始地幔标准化的微量元素配分模式

Fig. 8 Primitive mantle normalized incompatible elements spidergram for SSZ-type volcanic rocks

总之，干沟岛弧型火山岩总体以 SiO_2 较高，高 MgO、Al_2O_3、K_2O、Na_2O、$K_2O/Na_2O\approx1$，低 TiO_2、CaO，富含挥发份为特征。同时，富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Zr、Th、U 和 LREE。这些特征均指示干沟火山岩属于钾玄岩系列(橄榄粗安岩)，并以 Nb、Ta 亏损和 Th 富集显示其成因与消减作用有关。但是，原始地幔标准化的微量元素配分图解(图 8)具有轻微“隆起”特征，类似于板内玄武岩配分特征，与板内玄武岩(包括 OIB)的地球化学差异在于其显著的 Nb、Ta 亏损。这种特征可能暗示岩石成生于活动大陆陆缘火山弧环境。

4 结论与讨论

综上所述，干沟蛇绿岩组合的各单元岩石出露较齐全，包括变质橄榄岩(蛇纹岩)、辉长岩、辉绿岩、玄武岩等构造岩块，但几乎均呈零散构造岩块散布于混杂基质中。玄武岩的地球化学以中等 TiO_2、高 MgO，不具有 Nb、Ta 亏损和 Th 富集为特征，与 MORB 相比较，高场强元素(HSFE)丰度低且平坦不分异；与原始地幔相比较具有类似于 N-MORB 亏损地幔的典型特征，显示岩石应形成于洋中脊构造环境。在混杂岩带南部，有大量的橄榄粗安岩，主元素以高 MgO、Al_2O_3、K_2O、Na_2O，$K_2O/Na_2O\approx1$，低 TiO_2、CaO，富含挥发份为特征，富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Zr、Th、U 和 LREE 等，并以 Nb、Ta 亏损和 Th 富集，显示其成因与消减作用有关，形成于板块俯冲过程中的活动大陆边缘环境。干沟蛇绿岩和俯冲型火山岩的厘定，表明中天山北缘混杂岩带代表一个古洋盆消亡的古板块缝合带。该洋盆向南俯冲消减曾形成相应的活动大陆边缘火山弧或岛弧。尽管目前尚未获得该蛇绿岩可信的同位素年龄，但是，该带西延的西准噶尔南缘唐巴勒蛇绿岩(冯益民，1986；朱宝清等，1987；张驰，1992；马瑞士等，1993；高长林等，1995)锆石 U-Pb 同位素年龄为 480～520Ma(朱宝清等，1987)。限定中天山北缘蛇绿岩应形成于中寒武世—早奥陶纪，亦代表了中天山北缘古洋盆存在时限。

干沟蛇绿混杂岩的混杂基质中的火山岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值为 0.7098，反映了过渡地壳的特性；ΣREE 为 102.38×10^{-6}；δ_{Eu} 为 0.875，LREE/HREE 为 1.580，总的表现为轻稀土富集，稀土总量低，Eu 异常不明显，具岛弧成因的特点(车自成等，1994)。结合其中沉积岩特征，显示混杂基质应成生于板块俯冲过程中的弧前盆地环境。在蛇绿混杂岩的混杂基质中含硅质岩夹层，其中含放射虫(*Spumellaria*，硅骼虫、泡沫虫类)和单轴、三轴海绵骨针及瓶状几丁虫等微体化石；杂砂岩中产牙形刺 Proneotodus(?) sp.(原沃尼昂塔牙形石未定种，在中国江南地区相当于 $\in_3$—O)、*Baltoniodus* cf. *approximatus*(近似波罗的牙形刺相似种，多见于华北地区 O_1 亮甲山组和扬子地区 O_1 红花园组)、*Hindeodella* sp.(欣德刺)，灰岩夹层中产叠层石 *Drepanodus*(?) sp.，*Colonnella* sp.(车自成等，1994)。从而限定中天山北缘古洋盆俯冲作用应发生于晚寒武世—早奥陶世。

干沟蛇绿混杂岩与上覆下志留统米什沟组紫红色底砾岩层不整合，该组主要为绿色长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩互层，甚低级变质或几乎未变质，原始沉积层理发育，单层厚度薄，多在几毫米到数厘米范围内，具有复理石建造特征。明显不同于具有(低)绿片岩相和强烈变形的干沟蛇绿

混杂。米什沟组中含丰富的笔石和少量腕足类、腹足类化石。从下向上可以划分出五个笔石带,即:三角半耙笔石带 *Demirastrtes triangulatus*、盘旋半耙笔石带 *Demirastrites convolutus*、赛氏单笔石带 *Monograptus sedgwiekii*、塔形螺旋笔石带 *Spriograptus rriculatus* 和格雷斯顿单笔栅笔石带 *Monoclimacis griestoniensis*,这五个笔石带可与国内外笔石带对比,是早志留世常见笔石带,故米什沟组应属早志留世(车自成等,1994)。从而限定干沟蛇绿混杂岩形成时代应早于早志留世,即中天山北缘古洋盆最晚应于奥陶纪末关闭。

综上所述,中寒武世—早奥陶世中天山北缘存在以干沟蛇绿岩为代表的古洋盆,并于晚寒武世开始发生大洋岩石圈板块的俯冲消减作用,形成以干沟 SSZ 型火山岩以及混杂基质为代表的活动大陆边缘火山-沉积建造;到中—晚奥陶世,该洋盆关闭,继之以南北地块的对接、碰撞,并伴之以强烈的构造变形和(低)绿片岩相变质作用改造。早志留世,该带转换为对接后的陆表沉积环境,堆积复理石建造。

References

Che ZC, Liu HF and Liu L. 1994. Formation and Evolution of the Middle Tianshan Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 133 (in Chinese)

Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andsites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance, Lithos, 23: 1 – 18

Dong YP, Zhang GW, Zhou DW, Luo JH, Zhang CL, Xia LQ, Xu XY and Li XM. 2005. Geology and geochemistry of the Bingdaban ophiolitic mélange in the boundary fault zone on the northern Central Tianshan Belt, and its tectonic implications. Science in China, Serr. D, 35(6): 552 – 560 (in Chinese)

Feng YM. 1986. Genetic environments and orignal types of ophiolites in west Junggar. Journal of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, (13): 37 – 46 (in Chinese with English abstract)

Gao CL, Cui KR, Qian YX, Liu B, Ding DG and Yin Y. 1995. Macroplate Tectonics in the Tianshan and the Northern Tarim Basin. Bejing: Geological Publishing House, 1 – 284 (in Chinese)

Gao J, Xiao XC, Tang YQ, Zhao M, Wang J and Wu HQ. 1993. The discovery of blueschist in Kumux of the south Tianshan Mountains and its tectonic significance. Regional Geology of China, (4): 344 – 347 (in Chinese with English abstract)

Gao S, Ling W and Qiu Y. 1999. Constrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anotexis. Geochim. Cosmochim. Acta, 63: 2071 – 2088

Guo ZJ, Ma RS, Guo LZ and Shi YS. 1993. A comparative study on three ophiolitic mélange belts in Eastern Xinjiang. Geological Review, 39(3): 266 – 274 (in Chinese with English abstract)

He GQ and Li MS. 2001. Geotectonic research of southwest Tianshan and its west adjacent area, China. Xinjiang Geology, 19(1): 7 – 11 (in Chinese with English abstract)

Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. Chinese Journal of Geology, 34(4): 405 – 419 (in Chinese with English abstract)

Ma RS, Wang XY and Ye SF. 1993. Tectonic Framework and Crustal Evolution of Eastern Tianshan Mountains. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1 – 225 (in Chinese)

Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed). Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. Chichester: Willy, 525 – 548

Tang YQ, Gao J, Zhao M, *et al*. 1995. The ophiolites and blueschists in the Southwestern Tianshan orogenic belt Xinjiang, Northwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 133 (in Chinese)

Wang ZX, Wu JY, Lu XiCh, Zhang JG and Liu ChD. 1990. Polycyclic Tectonic evolution and Metallogeny of the Tianshan Mountains. Beijing: Science Press, 1 – 218 (in Chinese)

Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis. London: Unwin Hyman, 1 – 466

Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304: 370 – 395

Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 171 (in Chinese)

Zhang C and Huang X. 1992. The ages and tectonic settings of ophiolites in west Jungar, Xinjiang. Geological Review, 38(6): 509 – 524 (in Chinese with English abstract)

Zhu BQ, Wang LS and Wang LX. 1987. Paleozoic era ophiolite of southwest part in western Junggar, Xinjinag, China. Journal of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, (17): 3 – 64 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

车自成,刘洪福,刘良. 1994. 中天山造山带的形成与演化,北京:地质出版社, 1 – 135

董云鹏,张国伟,周鼎武,罗金海,张成立,夏林圻,徐学义,李向民. 2005. 中天山北缘冰达坂蛇绿混杂岩的厘定及其构造意义,中国科学,D 辑,35(6): 552 – 560

冯益民. 1986. 西准噶尔蛇绿岩生成环境及其成因类型,西安地质矿产研究所所刊,(13): 37 – 46

高长林,崔可锐,钱一雄,刘斌,丁道桂,殷勇. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地,北京:地质出版社, 1 – 284

高俊,肖序常,汤耀庆,赵民,王军,吴汉泉. 1993. 南天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义,中国区域地质,(4): 344 – 347

郭召杰,马瑞士,郭令智,施央申. 1993. 新疆东部三条蛇绿混杂岩带的比较研究,地质论评,39(3): 266 – 274

何国琦,李茂松. 2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究,新疆地质,19(1): 7 – 11

李锦轶,肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述,地质科学,34(4): 405 – 419

马瑞士,王赐银,叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及其演化,南京:南京大学出版社, 1 – 225

汤耀庆,高俊,赵民等. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩,北京:地质出版社,1 – 133

王作勋,乌继易,吕喜朝,张经国,刘成德. 1990. 天山多旋回构造演化与成矿,北京:科学出版社,1 – 218

肖序常,汤耀庆,冯益民,朱宝清,李锦轶,赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造,北京:地质出版社,1 – 171

张驰,黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨,地质论评,38(6): 509 – 524

朱宝清,王来生,王连晓. 1987. 西准噶尔西南地区古生代蛇绿岩,西安地质矿产研究所所刊,(17): 3 – 64