

# 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约\*

毛启贵<sup>1,2</sup> 肖文交<sup>1</sup> 韩春明<sup>1</sup> 孙敏<sup>3</sup> 袁超<sup>4</sup> 闫臻<sup>1</sup> 李继亮<sup>1</sup> 雍拥<sup>1,2</sup> 张继恩<sup>1,2</sup>

MAO QiGui<sup>1,2</sup>, XIAO WenJiao<sup>1</sup>, HAN ChunMing<sup>1</sup>, SUN Min, YUAN Chao<sup>4</sup>, YAN Zhen<sup>1</sup>, YONG Yong<sup>1,2</sup> and ZHANG JiEn<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院地球科学院, 北京 100039

3. 香港大学地球科学系, 香港

4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *College of Earth Sciences, Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*

3. *Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, China*

4. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

2005-10-30 收稿, 2005-12-20 改回。

**Mao QG, Xiao WJ and Han CM, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li JL, Yong Y and Zhang JE. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province; constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1):153-162**

**Abstract** The Baishiquan Cu-Ni sulfide deposit is located in the northern part of the Center Tianshan Massif, south of the Aqikuduke-Shaquanzi fault of the Eastern Tianshan Mountains. Ore-body was formed by the magmas and lay within the mafic-ultramafic complex. Zircons from the mineralized gabbro of the orefield yield a crystallization age of  $281.2 \pm 0.9$  Ma. These gabbro and peridotites of the Baishiquan mafic-ultramafic complex have high Mg content. With enriched LILE (Rb, Ba, K, Sr), LREE and HFSE (U, Pb), these rocks have negative Ce anomalies and depleted HIFE (Th, Nb, Ta, Ti). These data indicate that the Baishiquan complex has the characters of mantle-derived and arc island magmas. Combined with analyses of the geological and tectonic characters of the Baishiquan complex, we conclude that the Baishiquan complex was formed in an island setting or active margin. This indicates that a subduction event was reasonable in the Eastern Tianshan Mountains in the Early Permian, thus the Paleo-Asian Ocean did not close until the later Early Permian.

**Key words** Baishiquan, Cu and Ni sulfide deposit, Mafic-ultramafic complex, Zircon dating, Early Permian island arc, Center Tianshan massif

**摘要** 白石泉铜镍硫化物矿床位于中天山北缘,阿齐库都克-沙泉子断裂带南侧,产于同源侵入基性-超基性复式岩体中。采用锆石激光剥蚀法(LA-ICP-MS)获得矿化辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为  $281.2 \pm 0.9$  Ma。辉长岩和橄辉岩的地球化学数据表明白石泉含矿杂岩体具高 Mg 特征。岩石富集大离子亲石元素(Rb, Ba, K, Sr)、LREE 和高场强元素(U, Pb),而具有 Ce 负异常和亏损高场强元素(Th, Nb, Ta, Zr, Hf)的特征。这些表明白石泉含矿杂岩体具有幔源特征和岛弧岩浆特征。结合对白石泉岩体地质特征和区域地质背景的综合分析,本文推断白石泉岩体形成于岛弧环境或活动陆缘环境,即早二叠世期间在东天山地区还存在俯冲作用,因而古亚洲洋至少应在早二叠世晚期或以后才闭合。

**关键词** 白石泉; 铜镍矿床; 基性-超基性岩体; 锆石定年; 早二叠世岛弧; 中天山

**中图法分类号** P597.3; P588.125; P618.4; P618.63

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409801)、国家自然科学基金项目(40172080)与香港研究基金项目(HKU7840/04P)联合资助。  
第一作者简介:毛启贵,男,1980年生,博士研究生,构造地质学与大地构造学专业, E-mail: qg-mao@mail.igcas.ac.cn

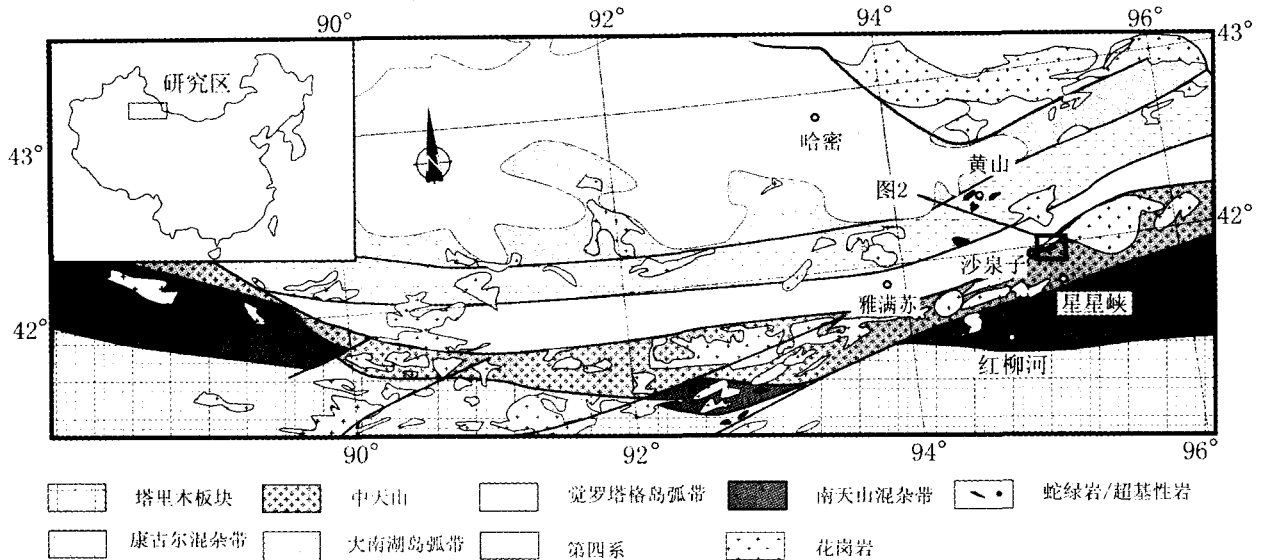


图1 东天山地区地质和构造地质简图(据李锦轶等, 2002 和 Xiao WJ *et al.*, 2004)

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of the Eastern Tianshan (Modified after Li JY *et al.*, 2002 and Xiao WJ *et al.*, 2004)

东天山位于中亚造山带南缘,是研究中亚造山带和古亚洲洋最终闭合的关键地区之一。长期以来吸引了大量地质学家的关注和研究,并取得了丰硕的研究成果(Coleman GR, 1989; Windley BF *et al.*, 1990; 马瑞士等, 1993, 1997; Carroll AR *et al.*, 1995; Allen MB *et al.*, 1993; 李锦轶等, 2002; Xiao WJ *et al.*, 2004; Xia LQ *et al.*, 2004)。但是对东天山地区的地质演化至今未取得统一认识,如对俯冲带极性、古亚洲洋最终闭合带和时间等的认识,特别是对古亚洲洋的最终闭合时间的认识上存在重大分歧(马瑞士等, 1997; Xia LQ *et al.*, 2004; Xiao WJ *et al.*, 2004; Zhou MF *et al.*, 2004),如部分学者认为该地区在晚石炭世一早二叠世大洋才闭合(Xiao WJ *et al.*, 2004)。

在晚石炭世一早二叠世,东天山地区地质活动非常强烈,表现为强烈的岩浆作用、集中的成矿作用和大型走滑作用等(Qin KZ *et al.*, 2003; 李华芹等, 1998, 2004; Xiao WJ *et al.*, 2004; Zhang LC *et al.*, 2005; 韩宝福等, 2004; 毛景文等, 2002)。如石英滩与火山相关的金矿;西凤山与花岗岩有关的金矿等;三岔口斑岩铜矿;大规模剪切成矿作用(如康古尔金矿)和基性-超基性岩浆型铜镍矿等(图1)。特别是沿大断裂线性分布基性-超基性岩体,不但规模大,而且保存完好,是研究晚石炭世一早二叠世东天山地区构造环境的关键之一。

东天山地区的基性-超基性岩体主要包括沿康古尔塔格断裂带展布的黄山-镜儿泉基性-超基性杂岩体带和沿阿齐库都克-沙泉子断裂带展布的白石泉基性-超基性杂岩体带(图1)。前人在这些基性-超基性岩体的成因和形成环境的认识上仍存在较大差异,如(1)蛇绿岩型(马瑞士等, 1993; 白云来, 2000); (2)造山后伸展(何国琦等, 1994; 毛景文

等, 2002; Zhou MF *et al.*, 2004; 韩宝福等, 2004; 吴华等, 2005); (3)阿拉斯加型岩体(刘德权等, 1983; 胡受奚等, 1990; Xiao WJ *et al.*, 2004)。为了验证该矿床赋矿岩体的时代和成矿地球化学特征,并进一步探讨该矿床的成矿大地构造背景,笔者挑选了白石泉基性-超基性杂岩体的辉长岩中的锆石进行 LA-ICP-MS 年代学研究,并对辉长岩和橄榄岩进行地球化学分析研究,以期厘定该矿床的成岩成矿时限和成矿构造环境,讨论古亚洲洋的闭合及区域大地构造意义。

## 1 地质背景

白石泉铜镍矿点位于哈密市南东 170km 处,位于中天山地块(胡霁琴等, 1986; 胡受奚等, 1990; 顾连兴等, 1990)北缘,阿齐库都克-沙泉子断裂带南侧。中天山地块主要出露一套中元古宙中深变质岩系-主体为一套片岩、片麻岩及薄层大理岩。在这套变质岩中还发育了元古代(张遵忠等, 2005b)和早古生代侵入岩(张遵忠等, 2004; 李伍平等, 2001)以及晚古生代一早中生代的花岗质侵入岩类(顾连兴等, 2003; 张遵忠等, 2005a)。

白石泉铜镍矿点紧邻中天山,北为阿齐库都克-沙泉子断裂带,该断裂带被认为是中天山与觉罗塔格岛弧带的缝合带(Windley BF *et al.*, 1990; 马瑞士等, 1993; Xiao WJ *et al.*, 2004)。中元古代变质岩主要出露于矿区中部及南部(图2),是区内基性-超基性杂岩体的直接围岩。该基性-超基性杂岩体的北部,为一套绿泥石英片岩、绢云母石英片岩、石英岩和大理岩;局部还有一些早古生代地层出露。在矿区以北特别是阿齐库都克-沙泉子断裂带以北所出露的大量石炭纪火山-沉积岩属于觉罗塔格晚古生代岛弧(马瑞士等,

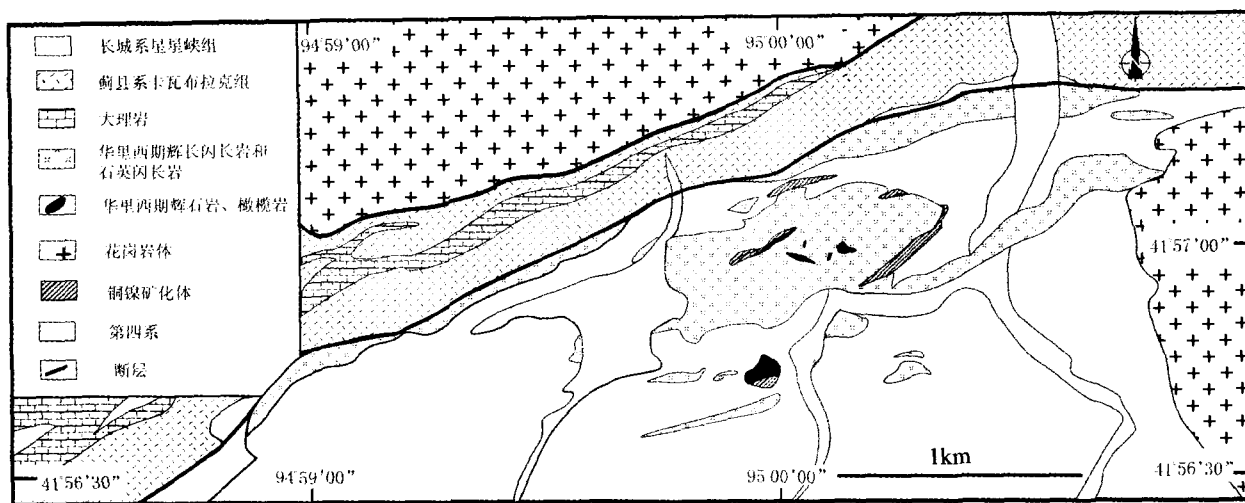


图2 白石泉铜镍矿区地质图(根据吴华等, 2005 和 Chai F *et al.*, 2005)

Fig.2 Geological Sketch of the Baishiquan Cu-Ni deposit (Modified after Wu H *et al.*, 2005 and Chai F *et al.*, 2005)

1993; 姬金生等, 1994; 顾连兴等, 1990; Xiao WJ *et al.*, 2004; 马瑞士等, 1993)。与阿齐库都克-沙泉子断裂带平行的 NEE 向次级断裂控制了白石泉岩体的侵位。

尽管从新疆第六地质大队 2002 年发现白石泉铜镍硫化物矿床以来, 已经受到地质学界的广泛关注, 并取得了有关矿床地质特征、矿床地球化学、成岩成矿时代等方面的研究成果(吴华等, 2005; Chai F *et al.*, 2005), 如吴华等(2005)用锆石 SHRIMP 方法所获得的石英闪长岩 ( $285 \pm 10\text{Ma}$ )、辉长闪长岩 ( $284 \pm 9\text{Ma}$ ) 和辉长岩 ( $284 \pm 8\text{Ma}$ ), 同时 Chai F *et al.* (2005) 地球化学研究表明白石泉岩体具有幔源特征和受到了俯冲物质污染特征, 但是前人多将其归结为后碰撞成岩成矿环境(吴华等, 2005)。这与基本上同时代、发育于其北部的黄山-镜儿泉阿拉斯加型岩体所代表的俯冲环境显然不相协调(Xiao WJ *et al.*, 2004)。

## 2 岩体和矿化特征

白石泉基性-超基性岩体近椭圆形, 长 1.6km, 宽 0.4km, 面积约 0.8km<sup>2</sup>, 由闪长岩、辉长岩、苏长岩、角闪岩、辉石岩和橄辉岩组成的同源、同期、不同阶段侵入的基性-超基性侵入岩体, 其中闪长岩分布面积占总出露面积的 95% 以上。岩体分两期侵入, 其中基性岩先期侵入, 超基性岩稍晚侵入。超基性岩与中基性岩之间具有明显界线, 而其他岩相之间界线不明显。岩体与围岩具明显的侵入接触关系, 见有角岩化, 围岩蚀变具硅化、绿泥石化, 岩体边部可见围岩捕虏体。

铜镍硫化物矿体主要赋存于超基性岩和超基性岩与围岩的接触带中, 矿体形态多为条带状和脉状。矿石主要矿物为黄铜矿、自然铜、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、辉铜矿、褐铁矿等, 脉石矿物为橄辉石、辉石、长石、蚀变矿物(纤闪石、蛇纹石

等)等。矿石构造为稀疏浸染状、块状—准块状、网脉状—脉状, 以稀疏浸染状为主。矿体平均品位为: Cu 0.12% ~ 0.14%、Ni 0.12% ~ 0.157%、Co 0.10% ~ 0.103% (吴华等, 2005)。

## 3 样品采集与描述

锆石样品选自重约 10kg 的辉长岩。该辉长岩具辉长结构, 有一定的铜镍矿化, 表面有轻微孔雀石化, 镜下可见辉石有轻微的绿泥石化。用于化学分析的样品 11 个, 其中 8 个是辉长岩, 其余 3 个为橄辉岩。辉长岩样品新鲜, 风化和蚀变都很弱, 镜下辉石表面有轻微的绿泥石化, 样品具辉长结构。橄辉岩在矿区地表出露为球状, 镜下可见风化蚀变强烈, 个别橄辉石晶体核部保存完好, 周围为蛇纹石化或绿泥石化环带。辉石表面绿泥石化和闪石化严重, 为板状, 样品具网状结构。

## 4 样品处理

采用人工重砂、重液、电磁仪等方法, 从辉长岩样品中分离出 300 余颗锆石, 然后在双目显微镜下挑出无色透明、无裂痕、无包体的晶体 50 余颗, 将之粘在双面胶上, 浇注环氧树脂, 待其固化后, 用砂纸将锆石磨平, 并出露 1/3 ~ 1/2, 然后抛光, 再进行锆石的光学、CL 显微图像及 LA-ICP-MS 分析。锆石的 CL 图片分析在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室 Cameca 电子探针仪器上完成(分析电压为 50kV, 电流为 15nA)。

锆石 U-Pb 年龄测定和数据处理按袁洪林(2003)报道的

流程进行。测定工作在西北大学大陆动力学教育部重点实验室的 Perkin Elmer/SCIEX 公司生产的 Elan6100DRC 型四极杆 ICP-MS 仪器和德国 MicroLas 公司的 GeoLas2000M 激光剥蚀系统的联机上完成。激光束斑直径 30nm, 采用 He 作为剥蚀物载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化, 采样方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式。每完成 4~5 个测点, 即加测标样一次。在所测锆石样品分析点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作外标, 元素含量采用 NIST SRM610 作外标, <sup>29</sup>Si 作内标, 年龄计算及谱和图绘制用 Isoplot (ver 2.0) 完成。

常量和微量元素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室测定。常量元素的测定采用 X-射线荧光光谱法 (XRF): 首先称取 0.6g 样品, 然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片, 最后在 Shimadzu XRF-1700/1500 上采用外标法测定氧化物含量, 分析误差优于 5%。微量元素测定采用 ICP-MS 法: 首先称取 40mg 样品和国家标准 (GRS1、GRS2、GRS3) 用酸溶法制成溶液, 然后在 ICP-MS Element II 上进行测定。其精度为: 元素含量大于  $10 \times 10^{-6}$

的精度优于 5%, 而小于  $10 \times 10^{-6}$  的精度优于 10%。

## 5 分析结果

### 5.1 定年结果

由白石泉辉长岩锆石 CL 图像 (图 3) 可以看出, 该岩相锆石颗粒较小, 大多数呈短柱状或近圆形, 少量呈长柱状。短柱状锆石长短轴比值介于 1.25~1.5 之间 (图 3)。锆石晶形好, 成分单一, 具有岩浆型锆石韵律环带, 因此为单一岩浆成因。对 24 粒锆石的分析结果见表 1 和图 4。所测得的 Pb/U 年龄比较集中 (表 2), <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围在  $242 \pm 1$  Ma ~  $286 \pm 2$  Ma 之间, 落在 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U - <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 等时线图上 (图 4), 少数偏离等时线。15 号可能是打到裂隙上导致年龄偏小; 2 和 4 号年龄稍微偏离了其它数据, 可能是有少量的放射性铅丢失; 13 和 21 号处于谱和线下方可能是由于后期地质作用导致放射性 Pb 丢失而造成的。有 17 颗落在谱和线上的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为  $281.2 \pm 0.9$  Ma (MSWD = 1.7, 95% 可信度), 即早二叠世。

表 1 白石泉杂岩体锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测定结果

Table 1 U-Pb LA-ICP-MS dating results for zircon grains from the Baishiquan complex

样品点	元素含量 ( $\times 10^{-6}$ ) 及比值				同位素质比						年龄 (Ma)					
	总 Pb	Th	U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$
BSQ1	52.98	117	252.9	0.46	0.05184	0.0008	0.31714	0.004	0.04436	0.0002	278	20	280	3	280	1
BSQ2	40.16	99.88	190.9	0.52	0.05207	0.0009	0.31201	0.005	0.04346	0.0003	288	25	276	4	274	2
BSQ3	88.3	40.69	453.2	0.09	0.05015	0.0008	0.30613	0.004	0.04427	0.0002	202	21	271	3	279	1
BSQ4	118.3	369.8	569.5	0.65	0.05168	0.0007	0.30876	0.003	0.04333	0.0002	271	15	273	3	273	1
BSQ5	71.25	166.3	342.1	0.49	0.05078	0.0008	0.30804	0.004	0.04399	0.0002	231	18	273	3	278	1
BSQ6	55.39	127.1	263.3	0.48	0.05036	0.0008	0.30922	0.004	0.04453	0.0003	212	22	274	3	281	2
BSQ7	58.89	182.5	267.1	0.68	0.05247	0.001	0.32591	0.005	0.04504	0.0003	306	26	286	4	284	2
BSQ8	76.98	361.6	341.7	1.06	0.05105	0.0008	0.3135	0.004	0.04453	0.0002	243	18	277	3	281	1
BSQ9	116.3	619.7	504.6	1.23	0.05325	0.0008	0.32736	0.004	0.04458	0.0002	339	15	288	3	281	1
BSQ10	131.6	397.8	608.9	0.65	0.05146	0.0011	0.32172	0.006	0.04534	0.0003	261	30	283	5	286	2
BSQ11	79.58	318.2	361.7	0.88	0.05206	0.0008	0.32078	0.004	0.04468	0.0002	288	21	283	3	282	1
BSQ12	98.44	272.4	466.1	0.58	0.05	0.0007	0.30824	0.003	0.04471	0.0002	195	16	273	3	282	1
BSQ13	9.295	25.81	41.07	0.63	0.06012	0.0027	0.35552	0.015	0.04288	0.0005	608	72	309	11	271	3
BSQ14	84.26	323.8	388.9	0.83	0.04992	0.0008	0.30817	0.004	0.04477	0.0003	191	21	273	3	282	2
BSQ15	346	2732	1717	1.59	0.05154	0.0006	0.27155	0.002	0.03821	0.0002	265	8	244	2	242	1
BSQ16	38.27	96.75	181.3	0.53	0.05279	0.0012	0.32435	0.007	0.04455	0.0003	320	36	285	5	281	2
BSQ17	38.04	96.84	178.2	0.54	0.04821	0.0009	0.30071	0.005	0.04523	0.0003	110	25	267	4	285	2
BSQ18	56.89	145.5	272	0.53	0.05318	0.0011	0.32501	0.006	0.04432	0.0003	336	30	286	5	280	2
BSQ19	67.86	264.5	309.3	0.86	0.04892	0.0007	0.30567	0.004	0.04531	0.0002	144	18	271	3	286	1
BSQ20	86.12	351.2	398.5	0.88	0.04993	0.0007	0.30778	0.003	0.0447	0.0002	192	16	272	3	282	1
BSQ21	54.15	119.6	262.9	0.46	0.05894	0.0012	0.35323	0.006	0.04346	0.0003	565	28	307	5	274	2
BSQ22	57.75	266.2	264	1.01	0.04979	0.0008	0.30346	0.004	0.0442	0.0002	185	22	269	3	279	1
BSQ23	49.2	208.3	222.7	0.94	0.05128	0.001	0.31748	0.005	0.04489	0.0003	253	28	280	4	283	2
BSQ24	33.44	128.3	152	0.84	0.04988	0.001	0.30942	0.005	0.04498	0.0003	189	30	274	4	284	2

表2 白石泉杂岩体常量(wt%)、微量( $\times 10^{-6}$ )分析测试结果

Table 2 The major, trace element results of the Baishiquan complexes

样品	辉长岩								辉石橄辉岩		
	BSQ-01	BSQ-02	BSQ-5	BSQ-6	BSQ-07	BSQ-8	BSQ-13	BSQ-14	BSQ-11	BSQ-12	BSQ-20
SiO <sub>2</sub>	48.78	49.01	48.75	49.20	48.23	49.30	48.54	48.29	38.45	39.29	38.62
TiO <sub>2</sub>	0.43	0.32	0.35	0.36	0.43	0.36	0.46	0.50	0.16	0.28	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.99	18.22	17.06	18.07	17.55	17.98	17.28	17.94	4.67	4.18	5.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.62	6.82	7.16	6.51	7.29	6.50	7.13	6.68	13.44	14.48	13.37
MnO	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.16	0.16	0.16
MgO	10.24	9.91	10.81	10.12	10.78	9.95	10.76	10.75	31.53	30.57	31.05
CaO	10.18	10.17	10.12	10.10	10.04	10.03	9.64	10.52	2.52	2.42	2.63
Na <sub>2</sub> O	2.92	2.93	2.68	2.86	2.57	2.89	2.63	2.57	0.24	0.30	0.27
K <sub>2</sub> O	0.34	0.33	0.30	0.32	0.34	0.28	0.30	0.39	0.06	0.07	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06
LOI	1.82	1.85	2.00	2.08	2.17	2.07	2.38	1.98	8.63	7.68	8.42
TOTAL	99.47	99.72	99.40	99.78	99.57	99.52	99.27	99.78	99.92	99.48	99.94
Mg <sup>#</sup>	75.39	74.22	74.94	75.49	74.55	75.20	74.93	76.12	82.29	80.70	82.14
Li	8.77	9.03	8.79	12.33	11.78	11.37	11.58	11.48	3.60	3.47	2.36
Be	0.36	0.51	0.43	0.42	0.40	0.34	0.27	0.26	0.27	0.26	0.66
Sc	19.25	17.43	18.72	19.29	19.74	18.42	19.57	16.56	6.60	8.43	7.76
Ga	12.89	13.38	12.19	13.25	12.53	12.83	12.64	13.79	5.43	5.33	6.38
Rb	6.43	5.77	5.52	5.66	5.83	4.53	5.14	6.62	-0.39	-0.42	-0.25
Sr	441	464	405	450	406	448	417	435	69	69	64
Y	8.12	7.07	7.49	7.59	8.16	7.56	8.84	9.16	3.89	4.77	4.39
Zr	33.87	32.25	31.55	34.43	33.95	29.76	34.75	43.24	29.12	25.88	27.18
Nb	1.88	1.68	1.62	1.73	1.77	1.51	1.75	1.94	1.67	1.77	1.77
Cs	2.56	1.87	1.95	2.41	2.05	1.91	2.01	1.46	0.46	0.48	0.45
Ba	80.86	74.37	71.41	84.30	72.09	68.55	127.28	108.81	36.66	40.40	55.76
La	5.15	5.12	4.50	5.23	4.91	4.47	5.07	4.92	4.02	3.76	4.01
Ce	10.29	10.27	8.71	10.11	9.98	8.60	10.31	10.16	7.56	7.47	7.85
Pr	1.66	1.49	1.44	1.56	1.56	1.34	1.64	1.66	1.12	1.18	1.20
Nd	7.57	6.57	6.64	6.74	7.11	6.21	7.44	7.81	4.50	5.15	4.93
Sm	1.73	1.50	1.50	1.49	1.67	1.51	1.83	1.86	0.89	1.23	1.05
Eu	0.71	0.65	0.61	0.62	0.66	0.59	0.65	0.74	0.24	0.30	0.28
Gd	1.79	1.41	1.53	1.50	1.63	1.48	1.81	1.93	0.79	1.00	0.90
Tb	0.28	0.22	0.23	0.23	0.27	0.24	0.29	0.31	0.11	0.14	0.13
Dy	1.64	1.35	1.43	1.43	1.55	1.44	1.78	1.84	0.61	0.85	0.77
Ho	0.32	0.27	0.29	0.28	0.31	0.29	0.37	0.38	0.13	0.17	0.15
Er	0.86	0.74	0.80	0.76	0.86	0.78	1.00	1.05	0.37	0.50	0.42
Tm	0.13	0.11	0.13	0.12	0.13	0.12	0.15	0.16	0.07	0.09	0.07
Yb	0.81	0.70	0.75	0.76	0.80	0.76	0.94	1.02	0.43	0.53	0.48
Lu	0.12	0.10	0.10	0.11	0.12	0.10	0.14	0.15	0.06	0.07	0.07
Hf	0.94	0.94	0.87	0.95	0.96	0.84	1.03	1.24	0.71	0.72	0.68
Ta	0.09	0.15	0.09	0.15	0.18	0.12	0.13	0.14	0.13	0.11	0.12
Ti	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.08	0.05	0.09	0.04
Pb	6.48	7.23	6.72	7.10	6.84	7.95	7.98	5.79	1.70	2.00	1.38
Bi	0.13	0.18	0.19	0.12	0.32	0.18	0.21	0.11	0.14	0.32	0.16
Th	0.39	0.57	0.38	0.45	0.42	0.39	0.76	0.52	0.63	0.52	0.54
U	0.12	0.19	0.15	0.15	0.16	0.18	0.18	0.17	0.32	0.36	0.19
V	95	57	85	77	85	68	73	52	22	43	18
Cr	495	569	512	544	620	630	752	816	2409	2638	2456
Co	87	62	69	121	49	111	39	36	115	142	113
Ni	1760	1617	1817	2333	695	2782	1818	238	1289	2140	1332
Cu	1010	803	1729	1030	605	3201	519	31	37	376	52
Zn	92	87	93	110	63	123	101	57	125	153	138
ΣREE	33.03	30.48	28.67	30.93	31.55	27.91	33.41	33.99	20.89	22.46	22.32
LREE/HREE	4.57	5.23	4.45	4.96	4.57	4.37	4.16	3.97	7.17	5.69	6.45
Eu <sup>#</sup>	1.22	1.33	1.23	1.25	1.21	1.19	1.08	1.19	0.86	0.80	0.86
Ce/Ce <sup>*</sup>	0.84	0.89	0.82	0.84	0.86	0.84	0.86	0.85	0.84	0.85	0.85
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.29	4.95	4.03	4.65	4.13	3.94	3.64	3.25	6.28	4.82	5.64

Mg<sup>#</sup> = Mg / (Mg + Fe); Ce/Ce<sup>\*</sup> = 2 \* Ce<sub>N</sub> / (La<sub>N</sub> + Pr<sub>N</sub>); Eu<sup>#</sup> = 2 \* Eu / (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>); FeO<sup>T</sup> = 0.9Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

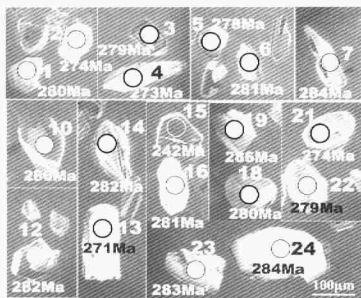


图3 白石泉铜镍矿锆石 CL 照片

Fig. 3 CL images of typical zircon grains from the Baishiquan Cu-Ni deposit

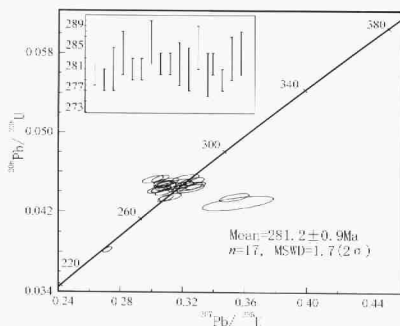


图4 白石泉铜镍矿床矿化辉长岩锆石 U-Pb 一致曲线图

Fig. 4 Concordia U-Pb diagram of LA-ICP-MS analyses of zircon from the mineralized gabbros of the Baishiquan Cu-Ni Orefield

## 5.2 常量元素

辉长岩和橄辉岩样品的常量元素和微量元素测量数据(表2)表明,其 $\text{SiO}_2$ 含量在38.45%~49.3%,具有较低的 $\text{TiO}_2$ (0.16%~0.50%)、 $\text{MnO}$ (0.1%~0.16%)和 $\text{K}_2\text{O}$ (0.06%~0.39%)含量;高的 $\text{MgO}$ (9.91%~31.53%)和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (6.5%~14.48%)含量,并具有高的 $\text{Mg}^\#$ (74.22~83.29)值。由于矿物分离结晶导致了样品成分有规律的变化(图5), $\text{MgO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 成负相关,这是橄辉石和熔铁矿的分离结晶造成的; $\text{CaO}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 成正相关,这是由于随着 $\text{SiO}_2$ 的富集,单斜辉石和长石含量增高的缘故; $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 与 $\text{SiO}_2$ 成正相关,是由于它们的不相容性造成的。

在全碱- $\text{SiO}_2$ (TAS)图解上(图6),样品落在亚碱性系列

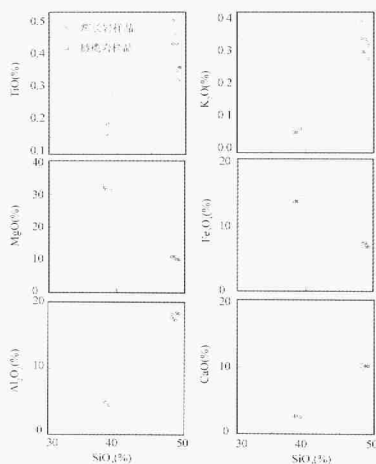
图5 白石泉杂岩体常量元素氧化物与 $\text{SiO}_2$ 相关图

Fig. 5 Variation of major oxides versus silica diagrams of the Baishiquan complex

区域。在 $\text{AFM}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{FeO} - \text{MgO})/(\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ 代替 } \text{FeO})$ 图解上(图6)的投点表明岩石化学成分在结晶过程中具有向钙碱性方向演化的特征。

## 5.3 微量元素

岩浆分离结晶对元素的分配有很大的影响,如(图7),辉石橄辉岩样品中的 $\text{Co}$ 、 $\text{Ni}$ 含量普遍较高,这是在分离结晶过程中橄辉石聚集而造成的。在辉长岩中 $\text{Co}$ 、 $\text{Ni}$ 含量变化大,可能与样品中存在硫化物有关。 $\text{Cr}$ ( $495 \times 10^{-6} \sim 2638 \times 10^{-6}$ )和 $\text{V}$ ( $18 \times 10^{-6} \sim 95 \times 10^{-6}$ )与 $\text{SiO}_2$ 或负相关(图7),这可能与镁铁质岩石中辉石的晶出有关。

样品的稀土总含量偏低(表2), $\sum \text{REE}$ 在( $20.89 \times 10^{-6} \sim 33.99 \times 10^{-6}$ )。稀土元素球粒陨石标准化分配曲线为轻微富集型(图8), $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 为3.97~7.17,  $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 为3.25~6.28。同时还存在 $\text{Ce}$ 的轻微负异常,其 $\text{Ce}^*/\text{Ce}^\#$ (0.82~0.89),这是由于源物质的加入而造成的(Hole MJ et al., 1984)。同时辉长岩和橄辉岩样品的稀土分配曲线存在差异,总体来说,橄辉岩的稀土分配曲线偏低,但是它们之间最大的差别是 $\text{Eu}$ 的异常,辉长岩的 $\text{Eu}$ 相对于 $\text{Sm}$ 和 $\text{Gd}$ 有轻微的富集,其 $\text{Eu}^\#$ 在1.08~1.33,而橄辉岩 $\text{Eu}$ 相对于 $\text{Sm}$ 和 $\text{Gd}$ 有轻微的负异常,其 $\text{Eu}^\#$ 在0.80~0.86,这是岩浆分离过程中,长石在晚期岩相中富集而造成的。

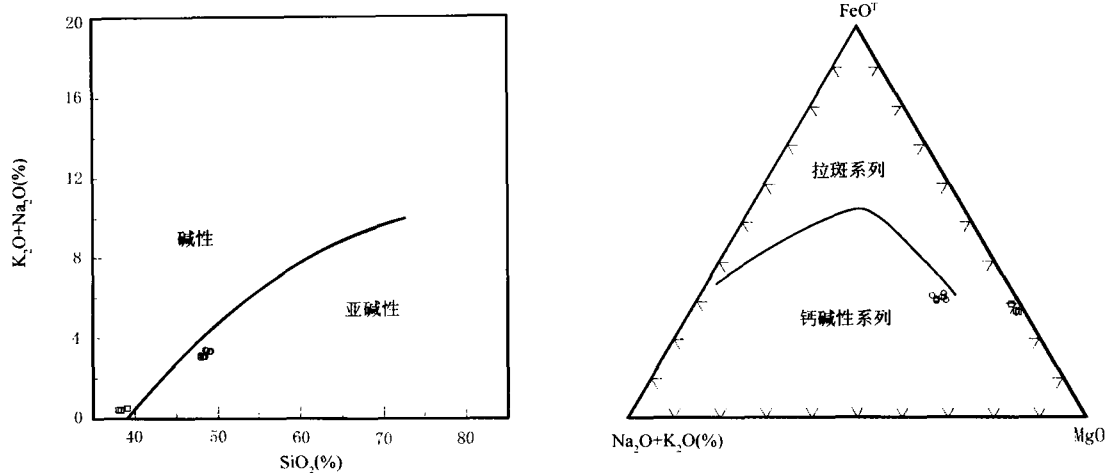


图6 白石泉杂岩体全碱-硅图解(TAS)和AFM图( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}$ ) ( $\text{FeO}^{\text{T}} = 0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (据 Irvine TN and Baragar WRA, 1971)

Fig. 6 Total alkali versus silica diagram and AFM ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}$ ) diagram for the Baishiquan complex (after Irvine TN and Baragar WRA, 1971)

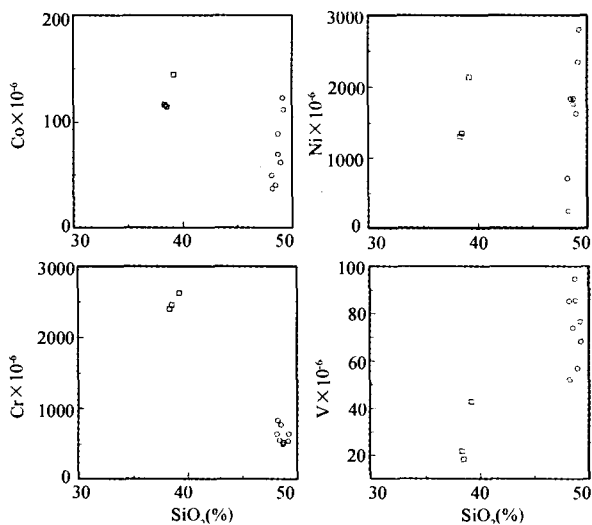


图7 白石泉杂岩体微量元素与  $\text{SiO}_2$  的相关图  
Fig. 7 Selected trace elements versus  $\text{SiO}_2$  diagrams of the Baishiquan complex

样品的微量元素(表2)总体上表现为样品的大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Sr)、LREE 和高场强元素(如 U、Pb)相对富集,而高场强元素(Th、Nb、Ta、Ti)相对亏损(图8)。同时辉长岩和橄辉岩样品的稀土配分曲线也存在差异,其主要差异表现为:大离子亲石元素表现了截然不同的分配特征,如辉长岩样品的 Ba 相对 Rb 和 Th 富集, K 相对 U 和 Nb 富集, Sr 相对 Nd 富集;而橄辉岩全部样品的 Rb 含量非常低(接近于零), Ba 相对 Th 亏损, K 相对 U 和 Nb 亏损, Sr 相对 Pb 和 Nd 亏损;其它元素曲线两个系列之间大致平行,辉石

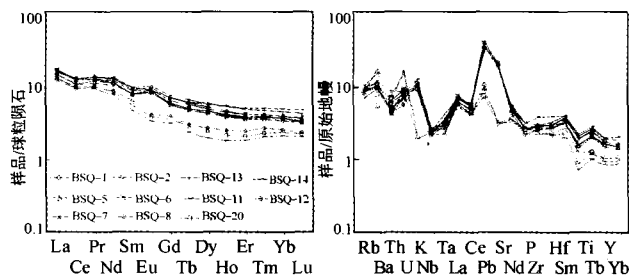


图8 白石泉杂岩体稀土(REE)球粒陨石标准化配分图(a)和不相容元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔标准值引自 Boynton WV, 1984 和 Sun SS et al., 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle (PM)-normalized spider diagrams of trace elements (b) for the Baishiquan complex (The chondrite values after Boynton WV (1984) and PM values after Sun SS et al. (1989))

橄辉岩的分配曲线稍低。这些特征反映了大离子亲石元素在岩浆分离结晶晚期相中的富集,岩浆期后热液蚀变或风化作用可能也有一定的影响。

## 6 讨论

### 6.1 成岩年龄

由锆石 CL 图像可以看出锆石具有岩浆成因锆石的韵律环带,成因单一,同时所测定锆石的  $\text{Th}/\text{U} > 0.4$ , 这些表明测

得年龄应代表成岩年龄。本研究测得辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为  $281.2 \pm 0.9$  Ma, 这一年龄与吴华等 (2005) 获得该岩体的锆石 SHRIMP 年龄基本一致, 反映了白石泉基性-超基性杂岩体的成岩年龄, 即早二叠世。

## 6.2 成岩成矿环境

白石泉基性-超基性杂岩体侵入于中天山岛弧带北缘, 其样品具有高 Mg、Cr 和  $Mg^{\#}$  特征 (表 2), 表明白石泉含铜镍矿杂岩体具有幔源特征 (Wilson M, 1989; Cox KG *et al.*, 1980), 同时 Chai F *et al.* (2005) 获得岩体氧同位素比值为 2.5 ~ 6.0, 也证实了这一点 (Ripley E *et al.*, 1999)。

然而, 样品具有较低的  $TiO_2$  (0.16% ~ 0.50%) 含量和 Ce 负异常 (表 2), 具有大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、Sr)、LREE 和高场强元素 (U、Pb) 相对富集, 而高场强元素 (Th、Nb、Ta、Ti) 相对亏损的特征, 这些都是岛弧岩浆所具有的特征 (Thompson RN *et al.*, 1984; Cox KG, 1980; Hole MJ *et al.*, 1984)。如图 9 样品在 2Nb-Zr/4-Y 构造环境判别图解样品投影在板内和岛弧区, 而在 Hf/3-Th-Nb/16 构造判别图解上投影于岛弧区。这表明白石泉基性-超基性杂岩体为岛弧岩浆岩, 岩浆上升过程中可能同化了少量地壳物质。

阿拉斯加型基性-超基性杂岩体是一种环带状侵入岩体, 一般来说, 这种侵入体岩性包括纯橄岩、橄辉岩、辉石岩、角闪辉岩、辉长岩等 (Taylor PH, 1967; Moores EM, 1973; Irvine TN, 1974; Snoke AW *et al.*, 1981; Nixon GT *et al.*, 1990; Keozhinskas PK *et al.*, 1993; Tistl M, *et al.*, 1994; Fershtater GB *et al.*, 1997; Helmy HM *et al.*, 2003; Xiao WJ *et al.*, 2004)。阿拉斯加型基性-超基性岩体以体积小、以椭圆或近圆形出露和呈线性分布为特征, 延伸长度可达 1000km (如阿拉斯加和乌拉尔)。阿拉斯加型基性-超基性杂岩体产于岛弧或弧前环境, 虽然各个岩体的具有不同的初始岩浆, 但是它们的共性就是初始岩浆为幔源岩浆, 而且受地壳物质的改造非常有限。白石泉基性-超基性岩体的岩石组合、体积、地表形态、结构和分布等地质特征以及具有幔源和岛弧岩浆岩的地球化学特征, 都表明该岩体应该为阿拉斯加型基性-超基性杂岩体 (Taylor PH, 1967; Irvine TN, 1974; Moores EM, 1973; Murry CG, 1972; Helmy HM *et al.*, 2003), 即处于岛弧或活动陆缘环境。这与黄山-镜儿泉基性超基性岩体具有相似成因 (刘德权等, 1983; 胡受奚等, 1990; Xiao WJ *et al.*, 2004)。

Xiao WJ *et al.* (2004) 认为古亚洲洋在东天山地区的闭合时间为晚石炭世—早二叠世。在这期间, 东天山地区存在与俯冲相关的岩浆活动与成矿作用, 如三岔口斑岩铜矿 (李华芹等, 2004), 黄山-镜儿泉阿拉斯加型岩体带。白石泉杂岩体年代学结果和地球化学研究进一步表明东天山地区在晚石炭世—早二叠世依然存在俯冲造山作用, 即古亚洲洋还没有闭合

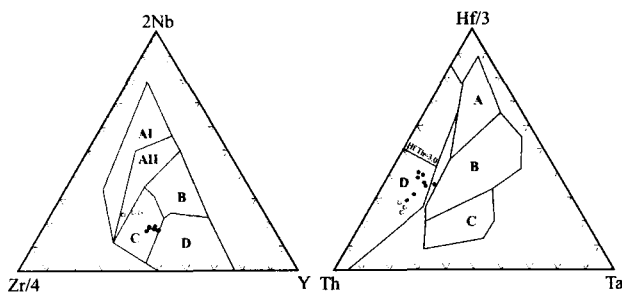


图 9 白石泉杂岩体 Zr-Nb-Y 判别图 (Meschede M, 1986) 和 Hf-Th-Ta 判别图 (Wood AD, 1980)

(其中 Zr-Nb-Y 判别图中: AI 区为板内碱性玄武岩, AII 区为板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩, B 区为 E 型 MORB, C 区为板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩, D 区为 N 型 MORB 玄武岩和火山弧玄武岩。其中 Hf-Th-Ta 判别图中, A 区为 N 型 MORB, B 区为火山弧玄武岩, C 区为碱性板内玄武岩, D 区为岛弧拉斑玄武岩 ( $Hf/Th > 3.0$ ) 和钙碱性玄武岩 ( $Hf/Th < 3.0$ ))

Fig. 9 Zr-Nb-Y and Hf-Th-Ta discrimination diagram for the Baishiquan complex (after Meschede M, 1986 and Wood AD, 1980) (The fields of the Zr-Nb-Y discrimination diagram are defined as follows: AI, within-plate alkali basalts; AII, within-plate alkali basalts and within-plate tholeiites; B, E-type MORB; C, within-plate tholeiites and volcanic-arc basalts; D, N-type MORB and volcanic-arc basalts. The fields of the Hf-Nb-Y discrimination diagram are defined as follows: A, N-type MORB; B, E-Type MORB and Within-plate tholeiites; C, alkaline within-plate basalts; D, volcanic arc basalts Island-arc tholeiites plot in the field D where  $Hf/Th > 3.0$  and calc-alkaline basalts where  $Hf/Th < 3.0$ )

## 7 结论

白石泉含铜镍硫化物基性-超基性岩体的年代学研究表明确其形成于早二叠世。其地球化学研究表明白石泉基性-超基性杂岩体为同源岩浆分离结晶的产物。同时岩石地球化学表明该岩体产于岛弧或活动陆缘环境, 这说明东天山地区在晚石炭世—早二叠世依然存在俯冲作用, 古亚洲洋还没有闭合。晚石炭世—早二叠世, 在俯冲作用下, 俯冲物质加入导致地幔发生部分熔融形成了幔源高 Mg 玄武岩浆房。同时岛弧带局部地区发生的走滑断裂作用为岩浆提供了侵位空间, 即沿康古尔和阿齐库都克-沙泉子断裂带。在构造作用下岩浆沿断裂带上侵就位, 即形成了白石泉和黄山-镜儿泉基性-超基性岩带, 并伴随有大量 Cu-Ni 硫化物矿床形成。

致谢 研究工作得到了西北大学大陆动力学重点实验室柳小明和第五春容、中国科学院地质与地球物理研究所李禾、靳新娣和李红艳, 以及刘传周和万家亮的帮助。两位审稿人提出了批评和建设性意见。一并表示感谢。



## References

- Allen MB and Windley BF. 1993. Evolution of the Turfan basin, Chinese central Asia. *Tectonics*, 12: 889 - 896
- Bai YL. 1993. Geological-geochemical characteristics and tectonic significance of the ophiolite blocks in Huangshan area, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 11(1): 34 - 42 (in Chinese)
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite study. In: Henderson P (ed). *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 63 - 114
- Carroll AR, Graham SA, Hendrix MS, Ying D and Zhou D. 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China; sedimentary record of the northern Tarim, northern Turpan, and southern Junggar Basins. *GSA Bulletin*, 107: 571 - 594
- Cox KG. 1980. A model for flood basalt volcanism. *Journal of Petrology*, 21: 629 - 650
- Coleman RG. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8: 621 - 635
- Chai F, Zhang Z, Mao JW, Dong L, Wu H and Mo X. 2005. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China. In Mao J and Bierlein FR (eds). *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, 12: 1293 - 1296
- Fershtater GB, Montero P, Borodina NS, Pushkarev EV, Smirnov VN and Bea F. 1997. Uralian magmatism; an overview. *Tectonophysics*, 276: 87 - 266
- Gu LX and Yang H. 1990. Rb-Sr Geochronology of granites in the east section of the Mid-Tianshan belt and its tectonic evolution. *Journal of the Guilin Institute of Technology*, 10(1): 49 - 55 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Gou XQ, Zhang ZZ, Wu CZ, Liao JJ, Yang H, Yin L and Min MZ. 2003. Geochemistry and petrogenesis of a multi-zoned high Rb and F granite in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 585 - 600 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the mafic-ultramafic complexes from the Halatongke and Huangshandong Cu-Ni sulfide deposits, Xinjiang Province, and their tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 49: 2324 - 2328 (in Chinese)
- He GQ, Li MS, Liu DQ and Zhou NH. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. *Xinjiang People's Pub. House & Education*, 1 - 437 (in Chinese)
- Hellmy HM and El Mahallawi MM. 2003. Gabbro Akarem mafic-ultramafic complex, Eastern Desert, Egypt: A late Precambrian analogue of Alaskan-type complexes. *Mineralogy and Petrology*, 77: 85 - 108
- Hu AQ, Zhang ZG, Liu JY, Peng JH, Zhang JB, Zhao DJ, Yang SZ and Zhou W. 1986. U-Pb age and evolution of Precambrian metamorphic rocks of middle uplift zone, eastern Tianshan, China. *Geochemica*, (1): 23 - 35 (in Chinese with English abstract)
- Hu SX, Guo JC, Gu LX, Zhou SZ, Yan ZF, Yang H, Wang JZ and Liu YD. 1990. Important role and geological characteristic of Caledonian orogenic belt in Tianshan tectonic frame. *Geology Science Xinjiang* (1), Beijing: Geological Publish House, 32 - 46 (in Chinese)
- Hole MJ, Saunders AD, Marriner GF and Tarney J. 1984. Subduction of pelagic sediments; Implication for the origin of Ce-anomalous basalts from the Mariana island. *Journal of the Geological Society, London*, 141: 453 - 472
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8: 523 - 548
- Irvine TN. 1974. Petrology of the Duke island ultramafic complex southeastern Alaska. *Geological Society of America, Memori*, 138: 1 - 237
- Ji JS, Tao HX and Yang XK. 1994. Geochemical characteristics of volcanic rocks within different tectonic settings in the central part of east Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4): 297 - 304 (in Chinese with English abstract)
- Kepezhinakas PK, Taylor RN and Tannka H. 1993. Geochemistry of plutonic spinels from the north Kamchatka Arc: comparisons with spinels from other tectonic settings. *Mineral Magazine*, 57: 575 - 589
- Li HQ, Xie CF and Chang HL. 1998. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in Northern Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Chen FW, Lu YF, Yang HM, Guo J and Mei YP. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and strontium isotopes of mineralized granitoid in the Sanchakou copper polymetallic deposit, East Tianshan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 191 - 195 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Wang KZ, Li WQ, Guo HC, Song B, Wang Y, Mo SG, Zhao ZR, Zhou ZX and Pan CY. 2002. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in Eastern Tianshan Mountains, NW, China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 295 - 301 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Wang T, Li JB, Kang X, Yu FS, Han QJ and Ma ZP. 2001. The U-Pb Age of Zircon from Late Caledonian granitoids in Hongliuhe area, east Tianshan Mountains, northwest China and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 121 - 128 (in Chinese with English abstract)
- Liu QD. 1983. Plate tectonics and distribution of mineral resources. *Northwestern Geology*, 4(2): 1 - 12 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Yang JM, Qu WJ, Du AD, Wang ZL and Han CM. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance. *Mineral Deposits*, 21(4): 323 - 330 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. The tectonic framework and crust evolution in Eastern Tianshan. Nanjing: Press of Nanjing University, 1 - 219 (in Chinese)
- Ma RS, Shu LS and Sun J. 1997. Tectonic evolution and Metallogeny of eastern Tianshan Mountains. Beijing, Geological Publishing House, 202 (in Chinese)
- Moores EM. 1973. Geotectonic significance of ultramafic rocks. *Earth Science Reviews*, 9: 241 - 258
- Murray CG. 1972. Zoned ultramafic complexes of the Alaskan type: Feeder pipes of andesitic volcanoes; *Geological Society of America, Memoir*, 132: 313 - 335
- 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
- Nixon GT, Cabri LJ and Laflamme JHG. 1990. Platinum-group-element mineralization in lode and placer deposits associated with the Tulameen Alaskan-type complex. *British Columbia. Canadian Mineralogist*, 28: 503 - 535
- Qin KZ, Zhang LC, Xiao WJ, Xu XW, Yan Z and Mao JW. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenetic evolution of the eastern Tianshan Mountains, northwestern China. In: Mao JW, Goldfarb R, Seltmann R, Wang DH, Xiao WJ and Hart C (eds). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. IAGOD Guidebook Series 10: CERCAMS/NHM London, 227 - 248
- Ripley E, Park YR and Naldrett AJ. 1999. Sulfur and oxygen isotopic evidence of country rock contamination in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada. *Lithos*, 47: 53 - 68

- Snoke AW, Quick JE and Bowman HR. 1981. Bear Mountain igneous complex, Klamath Mountains, California: an ultrabasic to silica calc-alkaline suite. *Journal of Petrology*, 22: 501 - 552
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. In: Saunders AD & Norry MJ. (eds.), *Magma-tism in ocean basins*. Geological Society London Special Publication, 42: 313 - 345
- Taylor HP Jr. 1967. The zoned ultramafic complexes of southeastern Alaska; In: Wyllie P J (ed). *Ultramafic and related rocks*. Wiley, New York, 97 - 121
- Tistl M, Burgath KP, Hohendorf A, Kreuzer H, Munoz R and Salinas R. 1994. Origin and emplacement of Tertiary ultramafic complexes in northwest Columbia: Evidence from geochemistry and K-Ar, Sm-Nd, and Rb-Sr isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 126:41 - 59
- Thompson RN, Morrison MA, Hندی GL and Parry SJ. 1984. An assessment of the relative roles of a crust and mantle in magna genesis; an elemental approach. *Phil. Trans. R. Society London*, A310: 549 - 590
- Wu H, Li HQ, Mo XH, Chen FW, Lu YF, Mei YP and Deng G. 2005. Age of the Baishiqun mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*. 79(4): 498 - 502 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 464
- Windley BF, Allen MB, Zhang C, Zhao ZY and Wang GR. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. *Geology*, 18: 128 - 131
- 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 and Planetary Science Letters*, 50:11 - 30
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implication for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370 - 395
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwest China. *GSA Bulletin*, 116: 419 - 433
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. LA-ICP-MS zircon U-Pb Dating and REE analysis of the Cenozoic intrusion in northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1511 - 1520 (in Chinese)
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwestern China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233 - 257
- Zhang LC, Xiao WJ and Qin KZ, Qu WJ and Du AD. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. *Mineralium Deposita*, 39: 960 - 969
- Zhang ZZ, Gu LX, Yang H, Wu CZ, Wang YX and Min MZ. 2004. Characteristics and genesis of the Chengjiangian gneissic granites in the east section of the Middle Tianshan Mountain areas; Taking the Tianhudong granite as an example. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 595 - 608 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Li WQ, Xi AH and Wang S. 2005a. Zircon SHRIMP dating of the Weiya intrusion eastern Tianshan Mountains and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 530 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Yang H, Wu CZ, Wang YX and Min MZ. 2005b. Characteristics and genesis of the Pingdingshan mega-augen gneissic granite in the eastern Tianshan Mountain areas. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 889 - 908 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献
- 白云来. 1993. 新疆黄山地区蛇绿岩的地质、地球化学特征及构造意义. *新疆地质*, 11(1): 34 - 42
- 白云来. 2000. 新疆哈密黄山-镜儿泉山镍铜成矿体系的地质构造背景. *甘肃地质学报*, 9(2): 1 - 7
- 顾连兴, 杨浩. 1990. 中天山东段花岗岩类铷-年代学及其构造演化. *桂林冶金地质学院学报*, 10(1): 49 - 55
- 顾连兴, 苟晓琴, 张遵忠等. 2003. 东天山一个多相带高铷氟花岗岩的地球化学及成岩作用. *岩石学报*, 19(4): 585 - 600
- 胡霄琴, 张振根, 刘菊英等. 1986. 天山东段隆起带前寒武纪变质岩系时代及演化 - 据 U-Pb 年代学. *地球化学*, 1: 23 - 35
- 胡受奚, 郭继春, 顾连兴等. 1990. 加里东造山带在天山构造格架中的重要地位及其构造地质特征. *新疆地质科学*, 第一辑: 32 - 46
- 何国琦, 李茂松, 刘德权等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1 - 437
- 韩宝福, 宋彪, 陈立辉等. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿床铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 49: 2324 - 2328
- 姬金生, 陶洪祥, 杨兴科. 1994. 东天山中段不同构造环境火山岩地球化学特征. *岩石矿物学杂志*, 13(4): 297 - 304
- 刘德权. 1983. 新疆板块构造与矿产分布, 西北地质, 4(2): 1 - 12
- 李华芹, 谢才富, 常海亮等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. *地质出版社*, 63 - 206
- 李华芹, 陈富文, 路远发等. 2004. 东天山三岔口铜矿区岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及铷同位素地球化学特征研究. *地球学报*, 25(2): 191 - 195
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅等. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘探. *新疆地质*, 20: 295 - 301
- 李伍平, 王涛, 李金宝等. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球学报*, 22(3): 121 - 128
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京大学出版社. 1 - 225
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐等. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地址出版社, 1 - 202
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊等. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球化学意义. *矿床地质*, 21(4): 323 - 330
- 吴华, 李华芹, 莫新华等. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及地质意义. *地质学报*, 79(4): 498 - 502
- 袁洪林, 吴福元, 高山等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 48: 1511 - 1520
- 张遵忠, 顾连兴, 杨浩等. 2005. 中天山平顶山巨眼球状片麻状花岗岩特征及成因. *岩石学报*, 21(3): 889 - 908
- 张遵忠, 顾连兴, 杨浩等. 2004. 中天山东段澄江期片麻状花岗岩特征和成因-以天湖东岩体为例. *岩石学报*, 20(3): 595 - 608
- 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志等. 2005. 东天山尾亚岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *地质学报*, 79(4): 530