

黄山-镜儿泉铜镍成矿带地层时代的厘定 及其地质意义探讨

邓宇峰^{1, 4)}, 宋谢炎²⁾, 颀炜³⁾, 袁峰^{1, 4)}, 赵照明⁵⁾, 韦帅¹⁾, 祝近近³⁾, 康健²⁾,
王开元²⁾, 梁庆林²⁾, 陈列锰²⁾, 于宋月²⁾

- 1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥工业大学矿床成因与勘查技术研究中心(ODEC), 合肥, 230009;
- 2) 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550081;
- 3) 河海大学海洋学院, 南京, 210098;
- 4) 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 合肥, 230009;
- 5) 哈密市和鑫矿业有限公司, 新疆哈密, 839000

内容提要:本文对东天山黄山-镜儿泉岩浆铜镍硫化物成矿带原来古生物地层学方法厘定的早石炭统干墩组和晚石炭统梧桐窝子组的碎屑锆石进行了激光等离子质谱(LA-ICP-MS)U-Pb年代学研究。干墩组碳质板岩、变质砂岩和变质长石石英砂岩中的碎屑锆石U-Pb年龄分别为301~491 Ma、307~426 Ma和313~461 Ma,最年轻锆石的加权平均值分别为307.1±3.7 Ma、310.4±2.2 Ma、315.0±10 Ma,表明干墩组最大沉积年龄为晚石炭世。而梧桐窝子组变质砂岩和变质凝灰岩的碎屑锆石年龄为384~448 Ma和393~448 Ma,最年轻锆石的加权平均值分别为386.5±5.8 Ma、394.6±4.5 Ma,确定其最大的沉积年龄为早一中泥盆世。这与近年来对侵位于这些地层的火成岩体的锆石U-Pb年龄一致,说明康古尔-雅满苏岛弧带至少从中泥盆世就开始发育。中一下泥盆统梧桐窝子组与上石炭统干墩组地层之间上泥盆统一下石炭统地层厚度约为10 km,说明侵位于这两套地层中的含铜镍硫化物镁铁-超镁铁岩体分别代表了岩浆通道系统的深部岩浆通道和浅部岩浆房,整个岩浆通道系统的纵向规模大约为10 km。

关键词:黄山-镜儿泉成矿带;岩浆铜镍矿床;梧桐窝子组;干墩组;碎屑锆石U-Pb年龄

黄山-镜儿泉成矿带位于中亚造山带北天山造山带东段,东西长约500km,自20世纪80年代以来,已经勘探查明大型岩浆铜镍矿床4处,中小型矿床3处,铜镍矿化点多处,是世界上规模最大的造山带型铜镍硫化物成矿带(Qin Kezhang et al., 2003; Song Xieyan et al., 2013, 2018)。

20世纪70年代区域地质填图及科研工作根据古生物地层学方法厘定黄山-镜儿泉成矿带干墩组和梧桐窝子组分别为下石炭统和上石炭统(1:20万烟墩幅区调报告,新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Li Dehui et al., 1989)。然而,最近的锆石

U-Pb年代学研究表明,尽管黄山东和黄山等岩体的形成年龄(269~287 Ma)与干墩组沉积时代是协调的;但侵位于梧桐窝子组的中酸性岩体年龄介于239~386 Ma之间,镁铁-超镁铁岩体年龄介于274.5~389 Ma之间(图1c; Zhou Taofa et al., 2010; San Jinzhu et al., 2010; Sun Tao et al., 2010; Qin Kezhang et al., 2011; Wang Guoqiang et al., 2012; Zhao Yun et al., 2018),却老于梧桐窝子组沉积时代。由于区域性大范围地层对比受褶皱、断裂等构造影响较大,古生物化石不仅具有穿时性,其定年的准确性还会受到当时古生物鉴定技术

注:本文为国家自然科学基金项目(编号U1803113,41630316,41672069)联合资助的成果。

收稿日期:2020-10-27;改回日期:2020-11-23;网络发表日期:2021-01-07;责任编辑:毕献武;责任编辑:李曼。

作者简介:邓宇峰,男,1983年生。副教授,从事镁铁-超镁铁岩岩石学及相关矿床研究,Email: dyfeng_214@sina.com。通讯作者:宋谢炎,男,1962年生。研究员,从事岩浆矿床研究,Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn。

引用本文:邓宇峰,宋谢炎,颀炜,袁峰,赵照明,韦帅,祝近近,康健,王开元,梁庆林,陈列锰,于宋月. 2021. 黄山-镜儿泉铜镍成矿带地层时代的厘定及其地质意义探讨. 地质学报, 95(2):362~376. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021203.
Deng Yufeng, Song Xieyan, Jie Wei, Yuan Feng, Zhao Zhaoming, Wei Shuai, Zhu Jinjin, Kang Jian, Wang Kaiyuan, Liang Qinglin, Chen Liemeng, Yu Songyue. 2021. Determination of sedimentary ages of strata in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 95(2):362~376.

手段的限制,所以,根据古生物地层学方法厘定的沉积时代可能存在不确定性。因此,本次研究利用 LA-ICP-MS 方法对干墩组和梧桐窝子组岩石的碎屑锆石进行了 U-Pb 年龄分析,目的是准确厘定它们的沉积年龄,为正确认识康古尔-雅满苏岛弧构造演化历史、构建黄山-镜儿泉成矿带岩浆铜镍矿床的成矿岩浆通道系统提供可靠依据。

1 区域地质概况

中亚造山带位于东欧、西伯利亚、塔里木-华北克拉通之间,是全球最大且持续时间最长的显生宙增生型造山带(Jahn et al., 2000; Xiao Wenjiao et al., 2008; Chen Zhenyu et al., 2019; 图 1a)。北天山岛弧系位于中亚造山带南部,夹于准噶尔地块与中天山地体之间,以乌鲁木齐为界可以分为西段和东段。北天山岛弧系东段从北往南由哈尔力克岛弧、博格达弧间盆地、大南湖岛弧和康古尔-雅满苏岛弧组成(Xiao Wenjiao et al., 2004; 图 1b)。其中康古尔-雅满苏岛弧带南侧以阿其克库都克断裂为界与中天山地体相邻,北侧以康古尔断裂为界与大南湖岛弧带接壤。

迄今为止在康古尔-雅满苏岛弧带北部发现的大型岩浆铜镍硫化物矿床有:黄山东、黄山西、黄山南和图拉尔根,中小型铜镍矿床有:香山、土墩、葫芦,构成了东西长约 500 km 的黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带(图 1c),这些矿床镍总储量约 100 万 t,铜总储量约 52t(表 1, Qin Kezhang et al., 2003; Liu Dequan et al., 2005)。最新的同位素年代学研究表明,含矿岩体中铜镍矿化镁铁-超镁铁岩相主要形成于 280~285 Ma,而不含矿的辉长岩相的年龄既可能早于 285 Ma,也可能晚于 280 Ma(表 1)。

黄山-镜儿泉成矿带主要的地层包括干墩组和梧桐窝子组,它们分别产于干墩断裂的南侧和北侧。赋存于干墩组地层中岩浆铜镍矿床包括土墩、黄山、黄山南和黄山东矿床,含矿岩体主要呈岩盆状、漏斗状;而侵位于梧桐窝子组地层中的岩浆铜镍矿床主要为图拉尔根、葫芦、香山矿床,除葫芦岩体为岩盆状之外,其他含矿岩体主要呈岩墙状(表 1, 图 1c, San Jinzhu et al., 2010; Deng Yufeng et al., 2015; 2017; Mao Yajing et al., 2015)。

前人主要依据地层中珊瑚化石(Yuanophyllum, Ncoclisiophyllum, Carcinophyllum 等)和地层的区域对比将干墩组和梧桐窝子组分别厘定为下石炭统和上石炭统(图 1c; 1:20 万烟墩

幅区调报告, Li Dehui et al., 1989)。侏罗纪的砂岩、砾岩夹石膏和泥岩不整合覆盖在石炭纪地层之上,缺失了上石炭统、二叠系和三叠系(图 2)。然而,近年来 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,不少侵位于梧桐窝子组地层的中酸性岩体和镁铁-超镁铁岩体却形成于泥盆纪(370~389 Ma)(图 1c, Zhou Taofa et al., 2010; San Jinshu et al., 2010; Sun Tao et al., 2010; Wang Guoqiang et al., 2012; Song Xieyan et al., 2013; Zhao Yun et al., 2018)。因此,梧桐窝子组和干墩组时代需要重新认识。

2 康古尔-雅满苏岛弧带主要地层描述

康古尔-雅满苏岛弧带主要地层包括梧桐窝子组、雅满苏组、干墩组、侏罗系和第四系(图 1c, 图 2)。梧桐窝子组主要分布于该岛弧带北缘干墩断裂与康古尔断裂之间;干墩组主要分布于岛弧带中部,干墩断裂和雅满苏断裂之间;雅满苏组则广泛分布于雅满苏断裂和阿其克库都克断裂之间(Luo Ting et al., 2016);侏罗纪地层仅在岛弧带东北角出露。干墩组与梧桐窝子组以干墩断裂为界(图 3),干墩组和雅满苏组之间则以雅满苏断裂为界,均呈断层接触关系。岛弧带北缘可见侏罗纪煤窑沟组与泥盆纪梧桐窝子组地层呈断层接触(1:20 万烟墩幅区调报告)。

梧桐窝子组总体为一套火山-沉积建造,在黄山-镜儿泉成矿带西部,从下至上为浅变质的玄武质凝灰岩、角斑质粗凝灰岩和硅质凝灰岩(图 2, Cao Rui et al., 2018)。向东火山岩的比例逐渐降低,并发生绿片岩相变质。在图拉尔根矿区附近梧桐窝子组下部为变质凝灰岩夹板岩,上部主要为变质砂岩、云母片岩和板岩,厚度最大超过 5000 m(图 2, 图 3b, Cao Rui et al., 2012)。图拉尔根含矿岩体侵位于变质凝灰岩中,而葫芦岩体侵位于变质砂岩、云母片岩和板岩中(San Jinzhu et al., 2010; Tang Dongmei et al., 2014; Zhao Yun et al., 2018)。

雅满苏组主要为一套中-酸性海相火山岩和碎屑岩,下部为粉砂岩夹凝灰岩、火山角砾岩、安山岩、英安岩和少量玄武岩和流纹岩,上部为灰黑色粉砂岩夹棕黄色泥岩、灰岩、凝灰岩、流纹岩、英安岩、安山岩和玄武岩,总厚度大于 5000 m(1:20 万烟墩幅区调报告)。东部以火山熔岩为主,西部火山碎屑岩增多(Hou Tong et al., 2014; Luo Ting et al., 2016)。

表1 黄山-镜儿泉成矿带镁铁-超镁铁岩体地质特征和年龄统计表

Table 1 Statistical table of the geological characteristics and age of the mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan-Jingerquan mine ratlization belt

地层	岩体	岩体形态	金属储量(品位)	年龄(Ma)	岩性	是/否含矿	方法	文献来源
干墩组	黄山东	地表露头呈菱形,纵向剖面呈漏斗状	Ni:36万t(0.4%) Cu:17万t(0.2%)	284.2±2.0	斜长二辉橄辉岩	是	LA-ICP-MS	课题组未发表数据
				282.7±1.4	辉长苏长岩	是	LA-ICP-MS	课题组未发表数据
				281.4±2.2	斜长橄辉辉石岩	是	SIMS	Mao Yajing et al., 2018
				274.0±3.0	橄辉苏长岩	否	SHRIMP	Han Baofu et al., 2004
				280.3±1.9	橄辉辉长岩	否	SIMS	Mao Yajing et al., 2018
				274.5±3.6	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS	Wang Bo et al., 2014
				271.2±3.8	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS	
				268.2±2.1	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS	
				267.0±2.1	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS	
				278.5±2.1	橄辉辉长岩	否	LA-ICP-MS	He Yunpeng et al., 2019
	278.1±1.9	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS				
	279.6±1.9	辉长闪长岩	否	LA-ICP-MS				
	277.0±1.1	角闪辉长岩	否	LA-ICP-MS	Chen Jiping et al., 2016			
	黄山	地表露头呈蝌蚪状,纵向剖面呈漏斗状	Ni:32万t(0.45%) Cu:20万t(0.23%)	280.5±1.9	二辉橄辉岩	是	SHRIMP	课题组未发表数据
				283.8±3.4	辉长岩	否	SIMS	Qin Kezhang et al., 2011
				269.0±2.0	闪长岩	否	SHRIMP	Zhou Meifu et al., 2004
				284.5±2.5	辉长岩	否	LA-ICP-MS	Gu Lianxing et al., 2006
	黄山南	地表露头呈椭圆形,纵向剖面呈岩盆状	Ni:12万t(0.4%) Cu:3万t(0.1%)	284.1±2.3	二辉橄辉岩	是	SHRIMP	课题组未发表数据
282.5±1.4				辉长岩	否	SIMS	Zhao Yun et al., 2015	
278.0±2.0				辉长岩	否	SIMS	Mao Yajing et al., 2016	
270.0±5.0				辉长岩	否	SHRIMP	Song Xieyan et al., 2013	
二红洼	地表露头呈椭圆形,纵向剖面呈岩盆状	—	283.1±1.5	橄辉辉长岩	否	LA-ICP-MS	Sun Tao et al., 2013	
土墩	地表露头呈椭圆形,纵向剖面呈岩盆状	Ni:1.5万t(0.3%) Cu:0.3万t(0.2%)	282.8±1.7	二辉橄辉岩	是	SHRIMP	课题组未发表数据	
			280.0±3.0	辉长岩	否	SHRIMP	Song Xieyan et al., 2013	
红柳沟	地表露头呈椭圆形	—	281.4±2.3	辉长岩	否	SHRIMP	课题组未发表数据	
梧桐窝子组	图拉尔根	地表露头呈岩脉状,纵向剖面呈岩墙状	Ni:10.96万t(0.45%) Cu:6万t(0.2%)	300.5±3.2	辉长岩	否	SHRIMP	San Jinzhu et al., 2010
				357.5±2.5	辉长岩	否	SHRIMP	San Jinzhu et al., 2010
梧桐窝子组	图拉尔根	地表露头呈岩脉状,纵向剖面呈岩墙状	Ni:10.96万t(0.45%) Cu:6万t(0.2%)	281.0±2.2	二辉橄辉岩	是	SHRIMP	课题组未发表数据
				葫芦	地表露头呈椭圆形,纵向剖面呈岩盆状	Ni:8.02万t(0.5%) Cu:3.96万t(0.25%)	282.9±1.8	辉石岩
	274.5±3.9	辉长闪长岩	否				LA-ICP-MS	Sun Tao et al., 2010
	282.3±1.2	辉长岩	否				SIMS	Han Chunming et al., 2013
	381.6±1.3	层状角闪辉长岩	否				SIMS	
	377.0±3.0	层状辉长岩	否				SIMS	Zhao Yun et al., 2018
	388.6±2.7	岩墙状辉长岩	否				SIMS	
	香山	地表露头呈带状,纵向剖面呈岩墙状	Ni:4万t(0.5%) Cu:2万t(0.25%)	279.6±1.1	角闪辉长岩	否	SIMS	Han Chunming et al., 2010
				278.6±1.8	钛铁辉长岩	否	SIMS	Xiao Qinghua et al., 2010
				283.2±2.1	辉长岩	否	SIMS	Li Dedong et al., 2012
285.0±1.1				辉长岩	否	LA-ICP-MS	Chen Jiping et al., 2016	
红石岗	地表露头呈椭圆形	—	280±1	辉长岩	否	LA-ICP-MS	Shuai Zhen et al., 2019	
红石岗北	地表露头呈椭圆形	—	276.1±5.4	橄辉辉长岩	否	LA-ICP-MS	Wang Yalei et al., 2017	
四顶黑山	地表露头呈椭圆形	—	320.9±3.0	辉长岩	否	LA-ICP-MS	Wang Guoqiang et al., 2012	
马蹄	地表露头呈马蹄状	—	281.8±2.2	二辉橄辉岩	否	SHRIMP	课题组未发表数据	
咸水泉	地表露头呈岩墙状	—	380.4±3.3	辉长岩	否	SHRIMP	课题组未发表数据	
串珠	地表露头呈串珠状	—	—	—	—	—	Li Dehui et al., 1989	

在黄山东铜镍矿床以东,干墩组下部为一套碳质板岩、粉砂质板岩夹大理岩,上部为变质砂岩、变质长石石英砂岩、变质砂砾岩夹硅质岩薄层(图2,图3a),东部出现少量火山碎屑岩,总厚大于

4800余米(1:20万烟墩幅区调报告)。由于干墩组褶皱非常发育,其地层层序还需进一步的工作加以确定。

侏罗纪地层主要包括砂岩、砾岩夹石膏和泥岩。

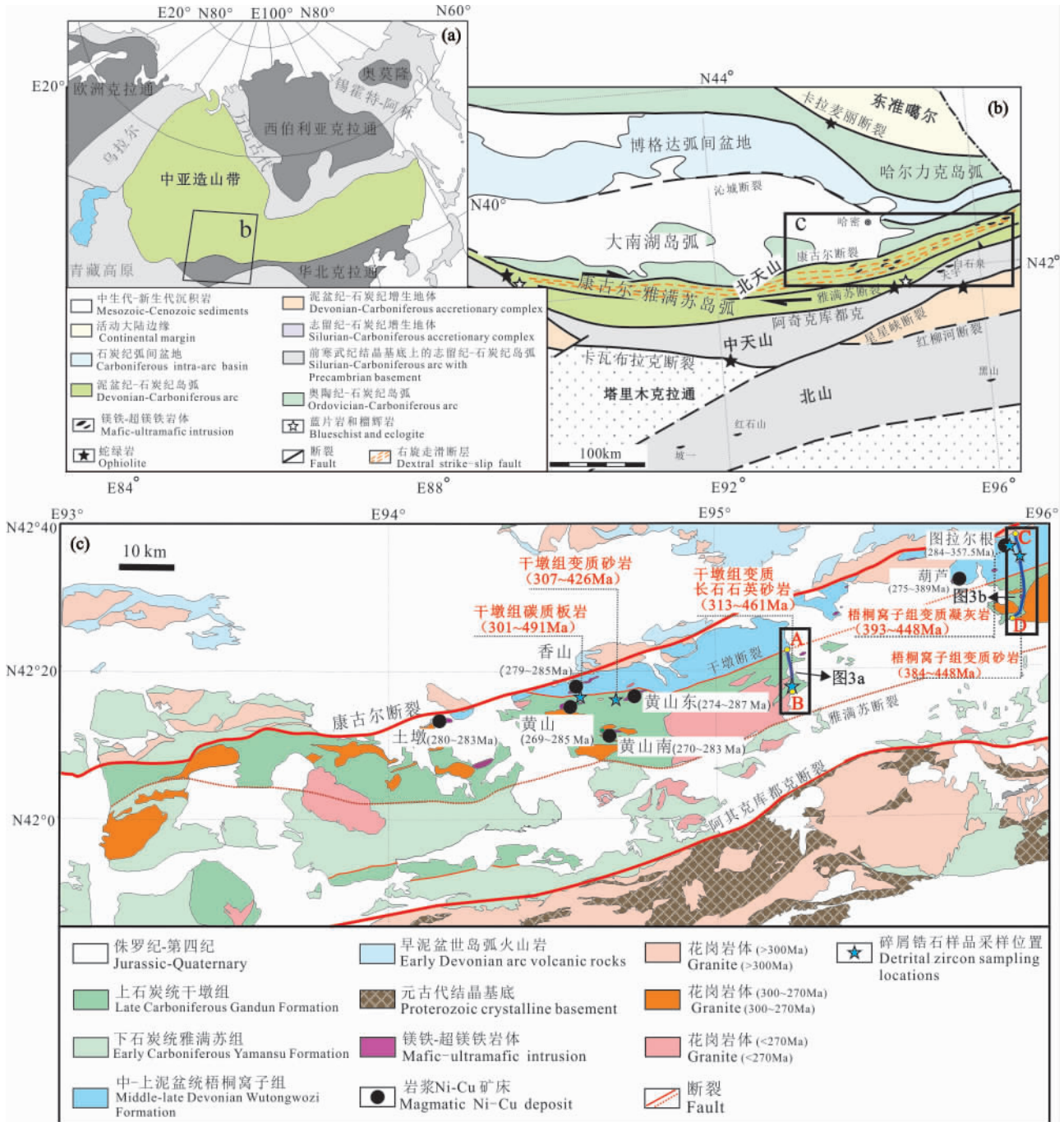


图 1 (a)-中亚造山带位置图(据 Jahn et al., 2000);(b)-北天山地质图(据 Xiao Wenjiao et al., 2004; Song Xieyan et al., 2011);(c)-黄山-镜儿泉成矿带岩浆铜镍矿床分布图(据 Deng Yufeng et al., 2011a, 2012b, 2014)

Fig 1 (a)-Location of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) (from Jahn et al., 2000); (b)-tectonic domains at southern margin of CAOB in NW China (from Xiao Wenjiao et al., 2004; Song Xieyan et al., 2011); (c)- the distribution diagram of the magmatic Ni-Cu deposits in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt (from Deng Yufeng et al., 2011a, 2012b, 2014)

第四纪地层主要由砾岩、盐渍化亚沙土和亚黏土、冲积-洪积层组成。

3 干墩组和梧桐窝子组主要岩石特征

本次研究对黄山东矿床以东 50 km 的干墩组

地层以及图拉尔根矿床以东 3 km 处的梧桐窝子组地层分别进行了长约 6 km 和 20 km 的路线剖面观察,对主要岩性进行了镜下鉴定。

干墩组碳质板岩:呈灰黑色,微细鳞片变晶结构,板状构造,主要矿物包括方解石(10%~25%)、

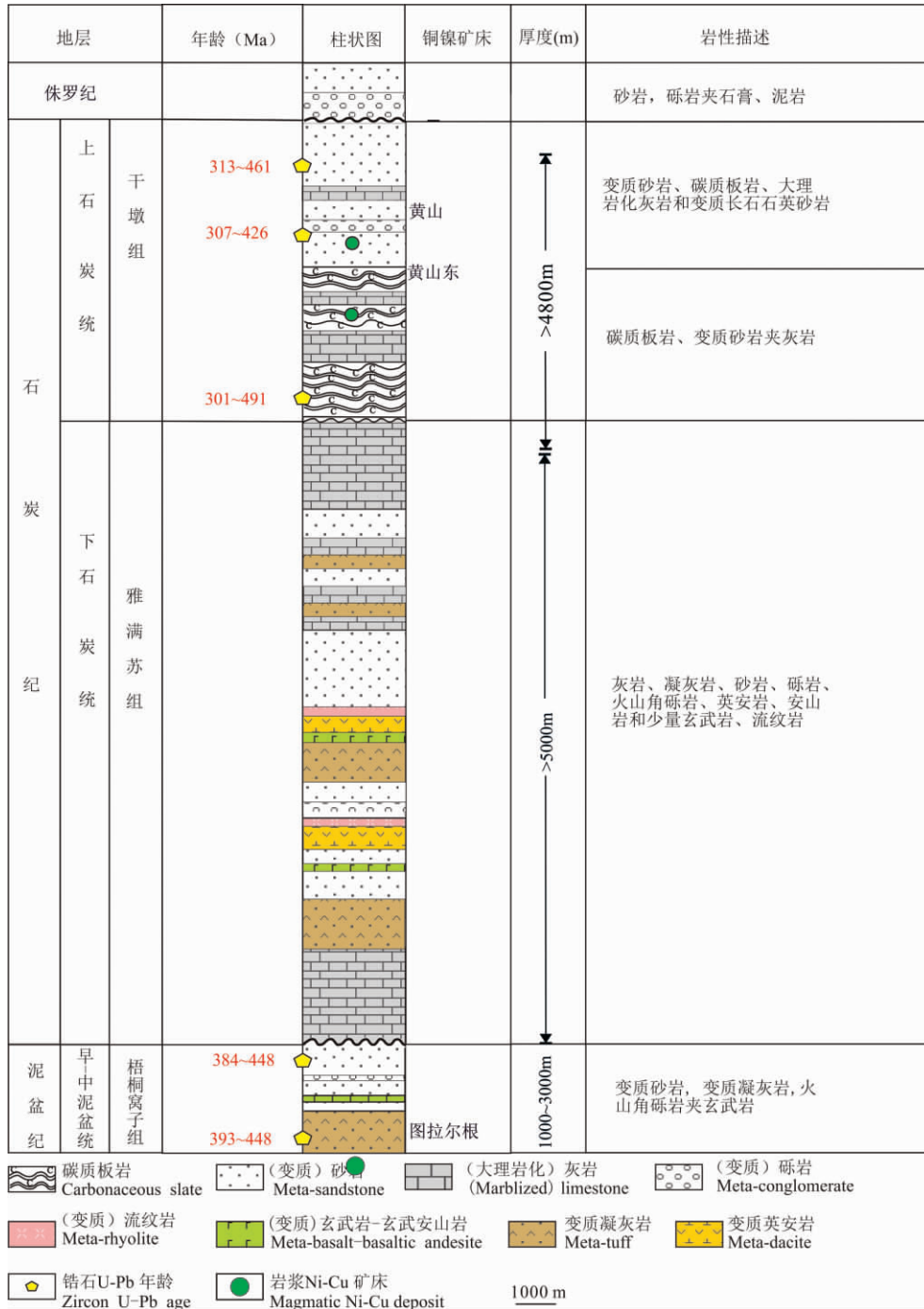


图2 黄山-镜儿泉成矿带及附近地层柱状图(据 1:20 万烟墩幅地质图及 Li Dehui et al., 1989, 根据本次研究获得的碎屑锆石 U-Pb 年龄修改)

Fig. 2 The stratigraphic column of the Huangshan-Jingerquan mineralization belt and its adjacent region (modified from the 1:200000 geological map of the Yandun region, Li Dehui et al., 1989 and the U-Pb age of detrital zircons in this study)

白云母(10%~15%)和石英(10%~15%),微细鳞片状黑云母和白云母集合体及富碳隐晶质的不均匀分布显示变余层理(图 4a)。

干墩组变质长石英砂岩:灰白色,变余砂状结构,块状构造。主要矿物包括斜长石(20%~30%)、钾长石(10%~20%)和石英(50%~60%),此外含

有少量白云母(~5%)(图 4b)。

干墩组变质砂岩:灰白色,变余砂状结构,块状构造,主要由石英(80%~90%)和白云母(10%~20%)组成,石英经历区域变质作用,有次生增大现象(图 4c)。

梧桐窝子组变质凝灰岩:灰白色,岩屑有砂岩岩

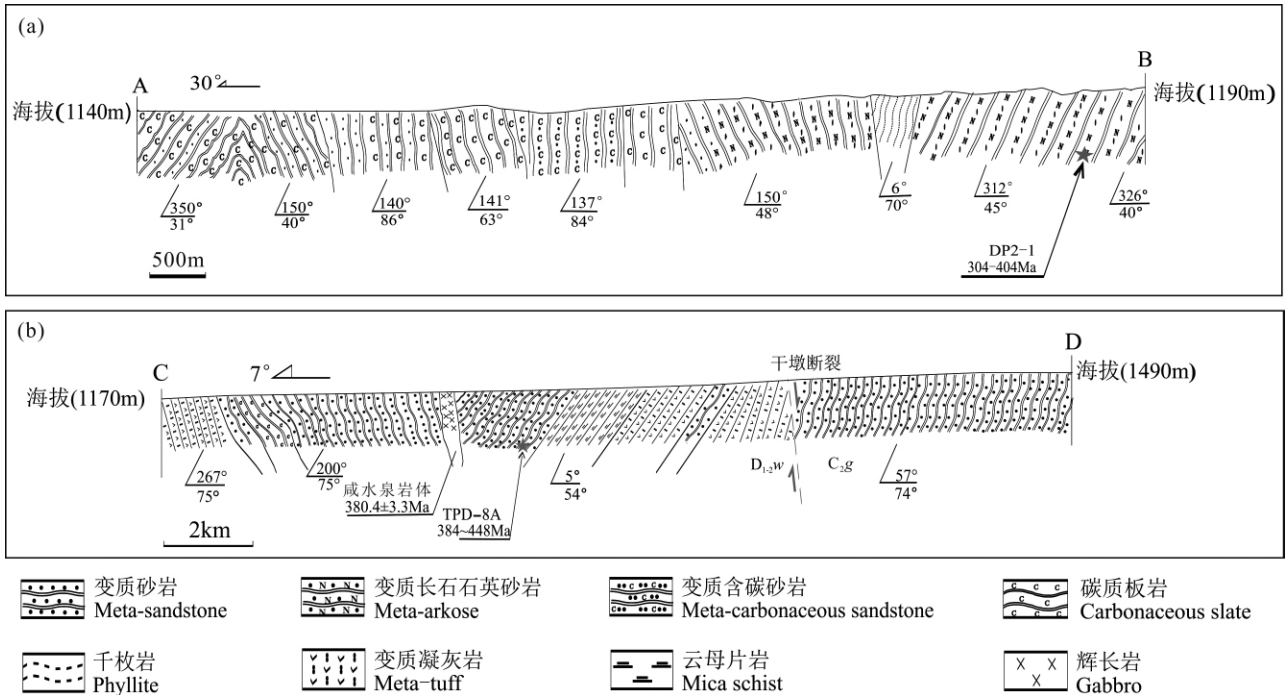


图 3 (a)-干墩组地层剖面图;(b)-梧桐窝子组-干墩组综合地层剖面图(据本次研究路线观察对 1 : 20 万烟墩幅地质图修正)

Fig. 3 (a)-Stratigraphic section of the Gandun Formation; (b)-comprehensive stratigraphic section of the Gandun Formation and Wutongwozi Formation (modified from the 1 : 200000 geological map of the Yandun region and the observation of this geological survey)

D_{1-2w}—梧桐窝子组; C_{2g}—干墩组; 咸水泉岩体年龄数据来自课题组未发表数据

D_{1-2w}—Wutongwozi Formation; C_{2g}—Gandun Formation; the age of the Xianshuiquan mafic intrusion is from our unpublished data

屑和安山岩岩屑, 大小为 100~1000 μ m; 晶屑有石英和长石晶屑, 大小为 50~500 μ m(图 4d)。

梧桐窝子组变质砂岩: 灰白色, 细粒变晶结构, 块状构造, 主要矿物为石英(95%~98%), 其次有少量的白云母和黑云母(2%~5%, 图 4e)。

糜棱岩见于镁铁-超镁铁岩体边缘, 如黄山岩体和图拉尔根岩体的外接触带。以图拉尔根岩体外接触带的糜棱岩为例, 岩石中碎斑成分为石英和斜长石, 颗粒呈不规则圆形或椭圆形, 粒径为 0.1~0.5 mm, 斜长石中脆性裂隙发育; 基质主要由细粒的白云母、长石和石英等组成。流动矿物带处于残留的斜长石和石英颗粒之间, 其排布与糜棱岩的面理一致(图 4f)。糜棱岩可能是由于镁铁-超镁铁岩与地层之间存在明显物性差异, 区域走滑作用使围岩发生动力变质作用而形成。

4 样品采集和分析方法

为了准确测定黄山—镜儿泉成矿带中主要地层干墩组和梧桐窝子组的沉积年龄, 本次研究采集了干墩组和梧桐窝子组中不同类型的碎屑岩挑选锆石, 包括干墩组的 3 件样品分别采自在黄山东岩体

以东 50 km 地层剖面南端的变质长石石英砂岩(DP2D-1)、黄山东岩体以西 500 m 处的变质砂岩(DP1-A)、以及干墩断裂南侧的碳质板岩(DP1D-3)(图 1c, 图 3a)。梧桐窝子组的 2 件样品分别采自图拉尔根矿床以东 3 km 地层剖面中段的变质砂岩(TPD-8a, 图 3b)以及在图拉尔根矿区的 ZK1501 钻孔中变质凝灰岩(1501D-1)。

用于碎屑锆石定年的样品重量为 4~8 kg, 样品经机械破碎, 人工分选出锆石, 每个样品分选出的锆石颗粒为 300 至数千颗不等(表 2)。将待测的锆石颗粒制成环氧树脂圆片, 抛光后进行显微结构观察及年龄的测定。锆石挑选、制靶以及阴极发光图像分析在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。

锆石 U-Pb 同位素含量测定在合肥工业大学 LA-ICP-MS 实验室完成, 测定分析采用激光剥蚀束斑直径为 32 μ m, 选用标准锆石 91500 作为计算 U-Pb 同位素年龄外标以及 SRM 610 作为计算元素含量的外标。并每隔 8 个样品分析点测一次标准样品, 每隔 16 个点进行仪器最佳化, 确保标样和样品的仪器条件完全一致, 测试的流程参见 Ning Siyuan et al. (2017)和 Wang Fangyue et al. (2017)。锆石测试原

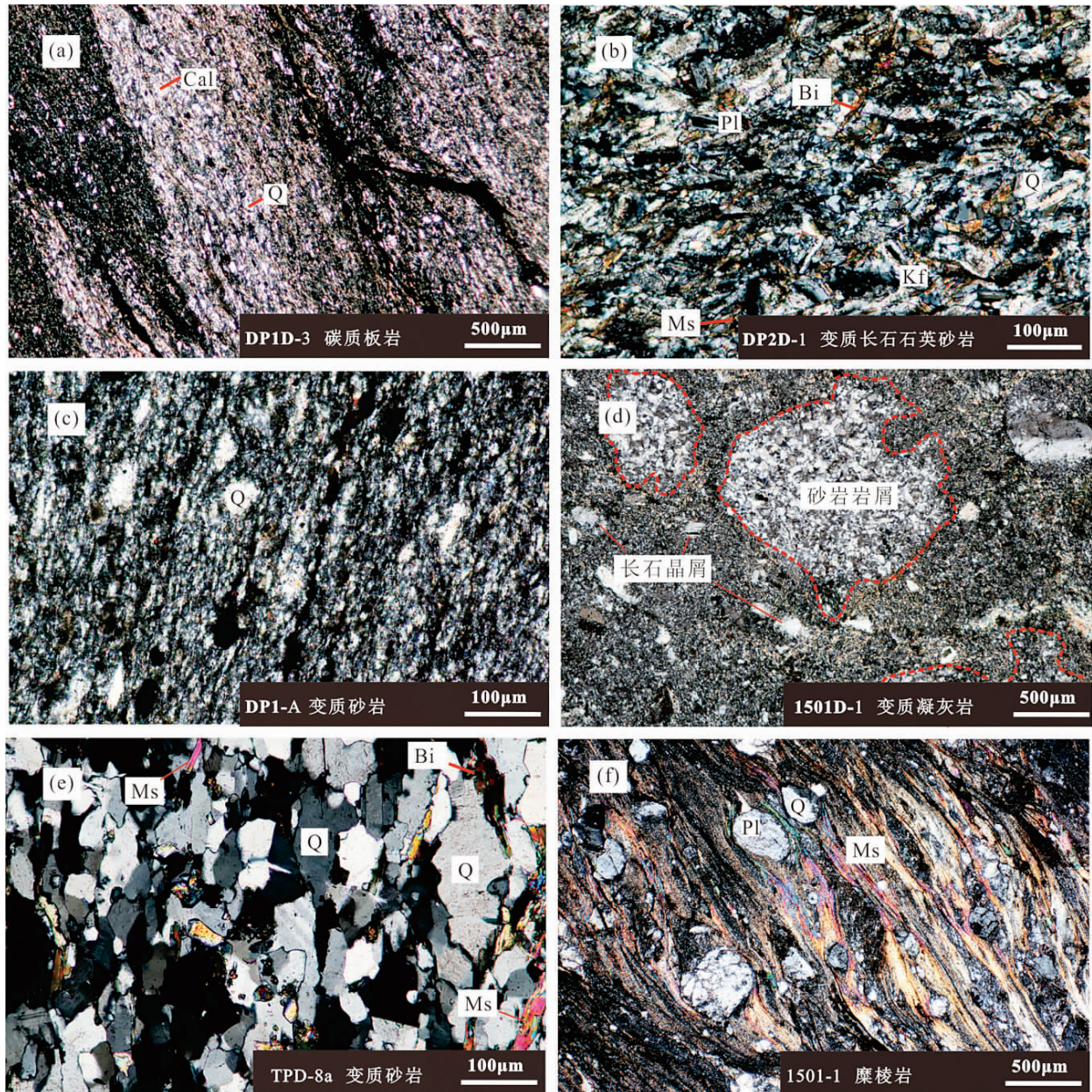


图4 干墩组和梧桐窝子组岩石镜下显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of the rocks from the Gandun Formation and Wutongwozi Formation

(a)—干墩组碳质板岩;(b)—干墩组变质长石石英砂岩;(c)—干墩组变质砂岩;(d)—梧桐窝子组变质凝灰岩中砂岩岩屑和长石晶屑;(e)—梧桐窝子组变质砂岩;(f)—梧桐窝子组糜棱岩显微照片;Pl—斜长石;Q—石英;Kf—钾长石;Ms—白云母;Bi—黑云母;Cal—方解石
(a)—The carbonaceous slate in the Gandun Formation; (b)—meta-arkose in the Gandun Formation; (c)—meta-sandstone in the Gandun Formation; (d)—lithic sandstone and feldspar crystal pyroclast in meta-tuff of the Wutongwozi Formation; (e)—meta-sandstone in the Wutongwozi Formation; (f)—the photomicrograph of the mylonite in the Wutongwozi Formation; Pl—plagioclase; Q—quartz; Kf—potash feldspar; Ms—muscovite; Bi—biotite; Cal—calcite

始数据的处理采用 ICPMS DataCal(V8.6 版)软件,并用 Anderson 方法进行普通铅校正,年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2001)。

5 分析结果

本次研究碎屑锆石 CL 图像显示,多数锆石具

有典型的岩浆成因环带,个别锆石具有核边结构(图5)。本次研究中的碎屑锆石所显示的以上特征表明,绝大多数锆石为岩浆锆石,代表其岩浆作用年龄。个别具有核边结构的锆石仅对边部进行了测量,以避免继承锆石对于岩浆结晶年龄测试结果的影响。将其中谐和度小于 90%, 1σ 大于 45 的数据

表 2 干墩组和梧桐窝子组碎屑锆石样品锆石挑选情况统计

Table 2 Statistics of detrital zircon separation from the Gandun Formation and Wutongwozi Formation

序号	样号	地层	岩性	经度	纬度	样品重量(kg)	锆石数量(颗)
1	DP1D-3	干墩组	碳质板岩	N42°16'23"	E94°33'32"	5.6	390
2	DP1-A		变质砂岩	N42°16'21"	E94°42'52"	8	500
3	DP2D-1		变质长石石英砂岩	N42°19'8"	E95°11'46"	4.8	500
4	TPD-8a	梧桐窝子组	变质砂岩	N42°35'24"	E95°55'52"	7	1000
5	1501D-1		变质凝灰岩	N42°37'48"	E95°52'12"	5	300

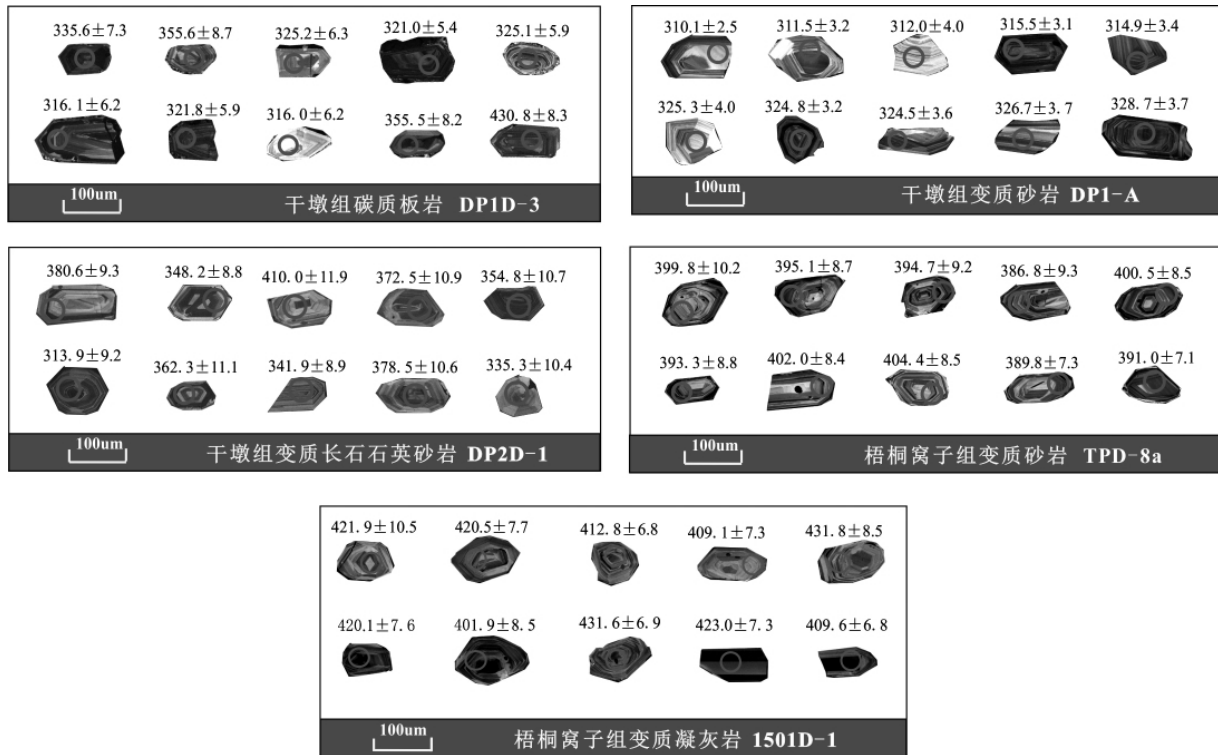


图 5 干墩组和梧桐窝子组碎屑锆石阴极发光和年龄图

Fig 5 The cathodoluminescence photograph and ages of detrital zircons of rocks in the Gandun Formation and Wutongwozi Formation

去除, 获得 435 个谐和年龄, 其特征介绍如下:

干墩组碳质板岩(DP1D-3)进行了 94 颗锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 79 个谐和年龄, 锆石年龄可分为 301~368 Ma(68 颗)、393~456 Ma(10 颗) 两组, 另有 1 颗锆石年龄为 491±11.8 Ma, 主峰值为 320 Ma, 弱峰值为 350 Ma 和 430 Ma, 最年轻的 10 颗锆石加权平均年龄为 307.1±3.7 Ma(图 6a, b)。

干墩组变质砂岩(DP1-A)进行了 105 颗锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 91 个谐和年龄, 锆石年龄可分为 307~330 Ma(86 颗)、372~373 Ma(2 颗)、425~426 Ma(3 颗), 主峰值为 315 和 330 Ma, 弱峰值为 370 和 425 Ma, 最年轻的 10 颗锆石加权平均年龄为 310.4±2.2 Ma(图 6c, d)。

干墩组变质长石石英砂岩(DP2D-1)进行了 99

颗锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 79 个谐和年龄, 锆石年龄可分为 313~414 Ma(78 颗), 另有 1 颗锆石年龄为 461±12 Ma, 主峰值为 330 和 380 Ma, 弱峰值为 315, 400 和 460 Ma, 3 颗最年轻的锆石加权平均年龄为 315.0±10 Ma(图 6e, f)。

梧桐窝子组变质砂岩(TPD-8A)进行了 100 颗锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 93 个谐和年龄, 锆石年龄可分为 384~448 Ma(93 颗), 主峰值为 400 Ma, 最年轻的 10 颗锆石加权平均年龄为 386.5±5.8 Ma(图 7a, b)。

梧桐窝子组变质凝灰岩(1501D-1)进行了 100 颗锆石 U-Pb 年龄分析, 获得 93 个谐和年龄, 锆石年龄可分为 393~448 Ma(93 颗), 主峰值为 410 Ma, 最年轻的 10 颗锆石加权平均年龄为 394.6±4.5 Ma(图 7c, d)。

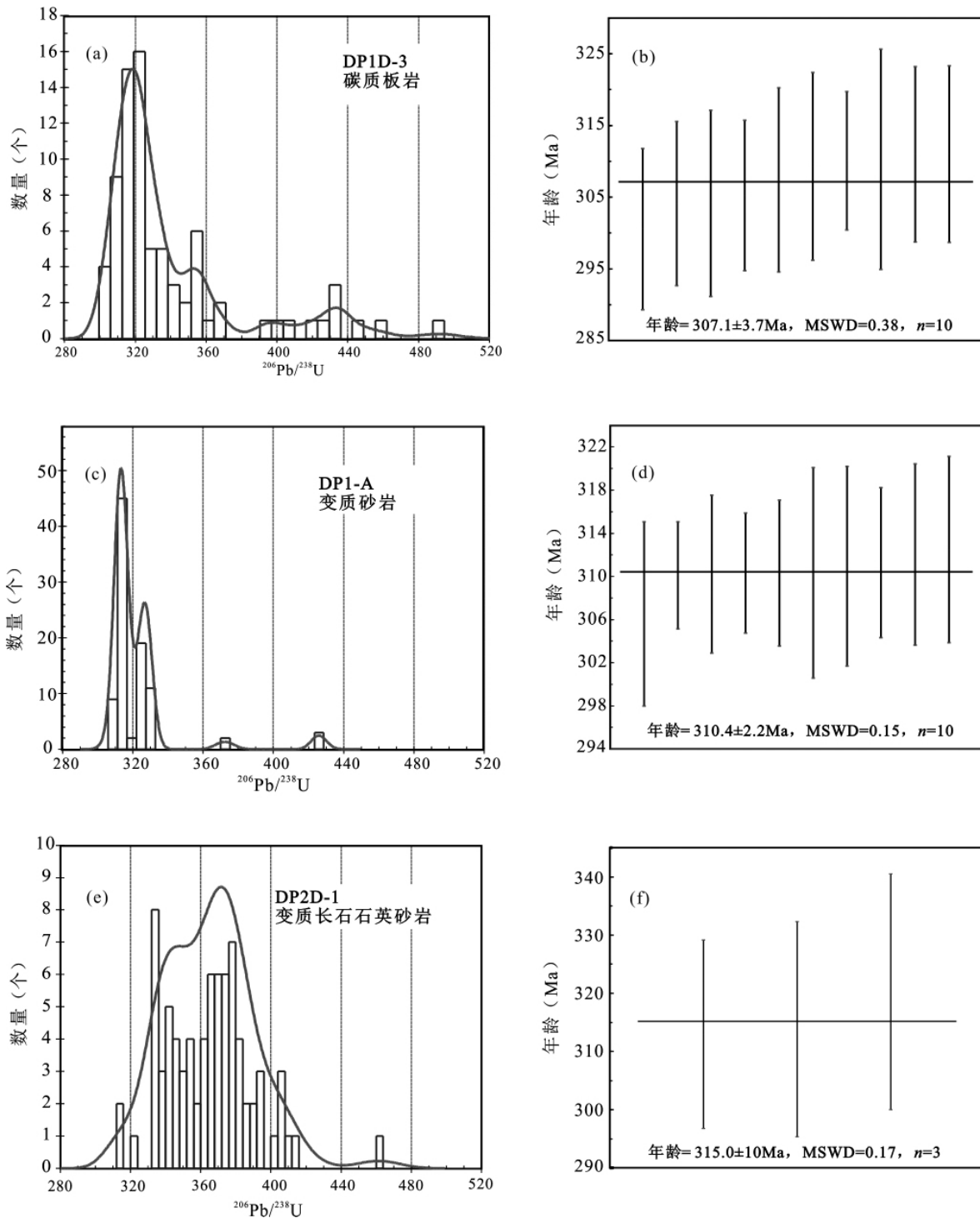


图6 干墩组碳质板岩(a,b)、变质砂岩(c,d)、变质长石石英砂岩(e,f)碎屑锆石年龄谱图

Fig. 6 Relative probability plots of U-Pb ages for concordant detrital zircons from carbonaceous slate (a, b), meta-sandstone (c, d), meta-arkose (e, f) in the Gandun Formation

6 讨论

6.1 干墩组及梧桐窝子组沉积时代的重新厘定

虽然黄山-镜儿泉成矿带地层岩石发生了绿片岩相的区域变质作用(图3),但是绿片岩相变质作

用的最高温度为 600°C ,而锆石中Pb的扩散封闭温度高达 900°C ,因此,区域变质作用不会改变锆石的U-Pb同位素年龄(Lu Fengxiang et al., 2002; Wu Yuanbao et al., 2004)。锆石的阴极发光图像表明锆石很好地保留了清晰的震荡环带,而且锆石 LA-

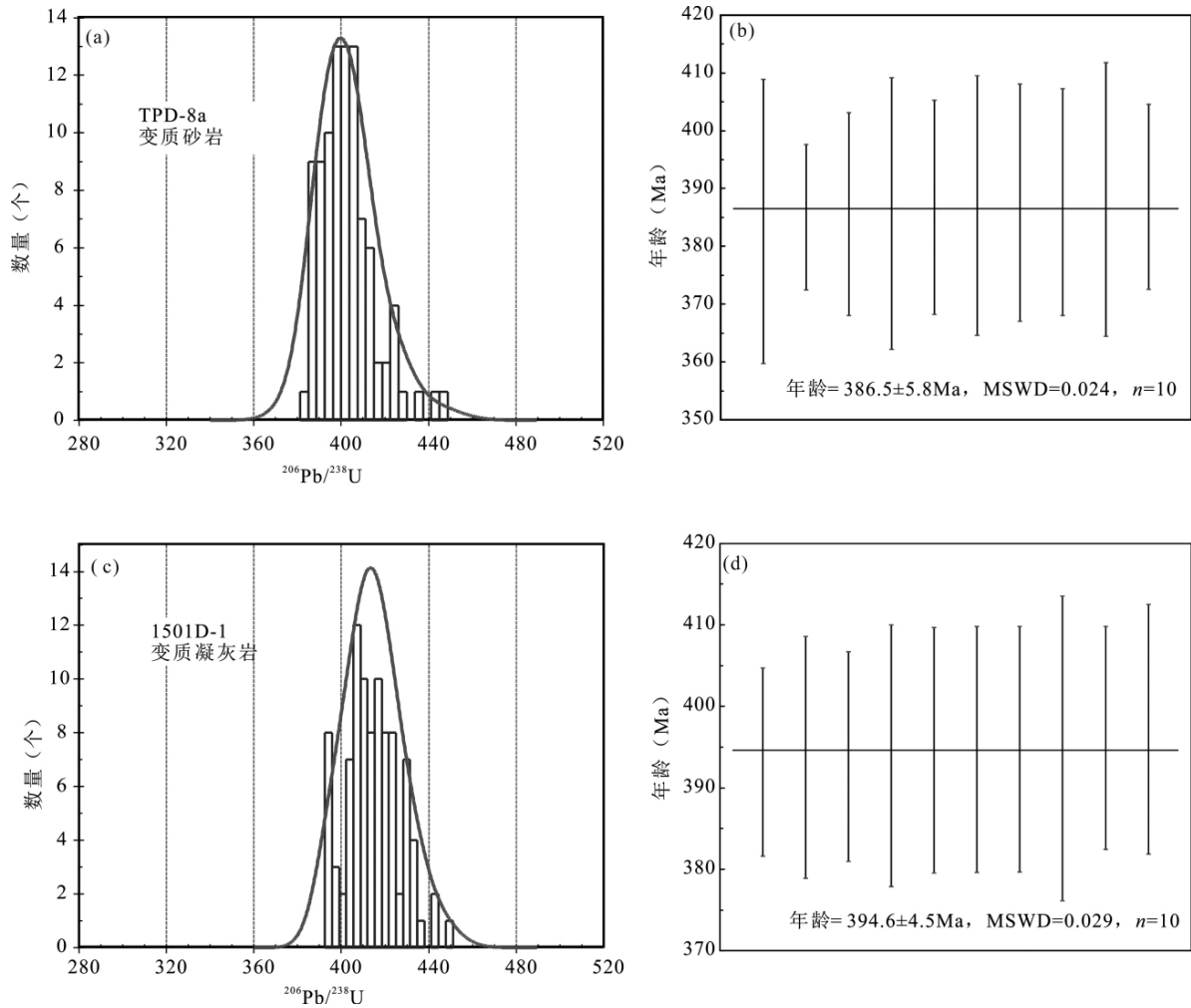


图 7 梧桐窝子组变质砂岩(a, b)和变质凝灰岩(c, d)碎屑锆石年龄谱图

Fig. 7 Relative probability plots of U-Pb ages for concordant detrital zircons from the meta-sandstone (a, b) and meta-tuff (c, d) in the Wutongwozi Formation

ICP-MS 测试获得的 Th/U 比值为 0.26~1.33, 谐和度大于 90% (附表 1-5, 图 5), 也表明锆石 U-Pb 同位素体系没有受区域变质作用影响。本次研究利用样品中最年轻并且年龄较为集中的 3~10 颗碎屑锆石, 计算加权平均年龄作为地层的最大沉积年龄, 比利用最年轻的单颗碎屑锆石年龄作为地层沉积年龄更具有统计学意义, 能更可靠地反映地层的沉积年龄 (Dickinson and Gehrels, 2009)。

干墩组碳质板岩、变质砂岩、变质长石石英砂岩的最年轻碎屑锆石的 U-Pb 同位素年龄加权平均值分别为 307.1 ± 3.7 Ma、310.4 ± 2.2 Ma、315.0 ± 10 Ma (图 6), 表明干墩组最大沉积年龄为晚石炭世, 并非早石炭世, 这个结果与 Chen Zhenyu et al (2019) 测得 317 Ma 是吻合的。这个结论与侵入干墩组中酸性及镁铁-超镁铁岩体的年龄没有矛盾。例如: 黄山花岗岩体中钾长花岗岩锆石 LA-ICP-MS

U-Pb 年龄为 288 ± 11 Ma (Zhou Taofa et al., 2010), 黄山、黄山东等镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄为 269~284 Ma (表 1, 图 1c)。

梧桐窝子组变质砂岩和变质凝灰岩中最年轻锆石的加权平均值分别为 386.5 ± 5.8 Ma、394.6 ± 4.5 Ma (图 7), 说明其最大沉积年龄为早一中泥盆世, 而非石炭纪。这与梧桐窝子组内分布的晚泥盆世中酸性侵入岩和中泥盆世镁铁-超镁铁岩体的年龄吻合。例如: 近年来锆石 U-Pb 年代学研究表明, 侵入梧桐窝子组的四顶黑山黑云母花岗岩、咸水泉花岗闪长岩和镜儿泉花岗岩年龄为分别为 386 ± 5、369.5 ± 5.6、376.9 ± 3.1 Ma (Li Yaping et al., 2006; Tang Junhua et al., 2007; Zhou Taofa et al., 2010); 葫芦岩体层状角闪辉长岩和岩墙状辉长岩的年龄为 377~389 Ma, 图拉尔根二号岩体辉长岩的年龄为 357.5 ± 2.5 Ma (San Jinzhu et al.,

2010; Zhao Yun et al., 2018, 表 1)。这些侵入岩年龄的最新结果为梧桐窝子组形成于早一中泥盆世提供了有力的支持。这是我们重新厘定黄山-镜儿泉成矿带及附近地层柱状图的依据(图 2)。

6.2 梧桐窝子组沉积时代的区域地质意义

前人认为康古尔-雅满苏岛弧带只有石炭纪和二叠纪地层,以此推测该地区俯冲作用是从石炭纪开始(Luo Ting et al., 2016; Cao Rui et al., 2018)。然而,本次研究厘定梧桐窝子组变质凝灰岩形成于早一中泥盆世,表明康古尔-雅满苏岛弧带从早一中泥盆世开始有火山活动。研究区内 370~389 Ma 中酸性-超镁铁岩侵入岩及火山岩的地球化学特征说明它们与俯冲作用有关(Tang Junhua et al., 2007; Zhao Yun et al., 2018; Chen Zhenyu et al., 2019),表明该岛弧带俯冲作用至少从中泥盆世就开始发育。Chen Zhenyu et al. (2019)最近在康古尔-雅满苏岛弧中部干墩组变质长石石英砂岩地层中也发现了 311.2~2884 Ma 的碎屑锆石,锆石 Hf 同位素特征与大南湖岛弧明显不同,而与中天山陆块相似。因此,我们认为康古尔-雅满苏岛弧代表了中天山地块北侧的陆缘增生弧,沉积物主要来源于中天山陆块的剥蚀。

由于康古尔断裂带两侧地体的地球物理性质明显不同(Li Dehui et al., 1989),大南湖岛弧带与康古尔-雅满苏岛弧带晚古生代成矿作用类型明显不同,断裂带附近发育有康古尔塔格蛇绿岩(Wang Jingbin et al., 2006; Li Wenqian et al., 2008),因此被认为是康古尔-雅满苏岛弧带与大南湖岛弧带之间的缝合带(Chen Zhenyu et al., 2019)。大南湖岛弧带发育晚奥陶世-志留世(422~453 Ma)与俯冲作用有关的安山岩、流纹岩、闪长岩和花岗岩(Li Wei et al., 2016; Zhang Yunying et al., 2018; Du Long et al., 2018; Sun Yan et al., 2019; Zhao Hao et al., 2020),并且研究区发现晚奥陶世-早石炭世斑岩铜矿床(322~450 Ma; Zhang Lianchang et al., 2006; Sun Yan et al., 2018),都说明大南湖岛弧带的形成可能始于晚奥陶世。

因此,尽管康古尔断裂南北两侧的康古尔-雅满苏和大南湖岛弧的形成均与北天山洋的双向俯冲有关,但大南湖岛弧的形成早于康古尔-雅满苏岛弧的形成。

6.3 黄山-镜儿泉成矿带岩浆通道系统的构建

岩浆通道成矿模型于 20 世纪 90 年代由 Naldrett et al. (1995)提出,认为岩浆铜镍硫化物成

矿的关键过程包括:幔源镁铁质岩浆上升进入地壳后,同化混染深部的壳源硫,导致岩浆中硫化物熔离;这些硫化物被快速上升的岩浆携带到岩浆通道突然变宽或者转折部位,岩浆流速降低导致硫化物沉降聚集成矿(Song Xieyan et al., 2010; Barnes et al., 2016)。

由于黄山-镜儿泉成矿带北部的梧桐窝子组与南部的干墩组为断层接触(图 1c),它们之间晚泥盆世和早石炭世地层的缺失应该是干墩断裂活动造成的。由于研究区覆盖较厚,干墩断裂的产状和性质不明(1:20 万烟墩幅区调报告)。近年来的区域应力分析以及走滑剪切变形作用形成的糜棱岩全岩⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年代学研究表明,康古尔-黄山韧性剪切带的变形主要发生在 300~240 Ma,在此之后区域构造应力性质发生了改变(Xu Xingwang et al., 2003; Chen Wen et al., 2005; Branquet et al., 2012)。Sr-Nd 同位素特征表明 275~208 Ma 的过铝质花岗岩形成于伸展环境,与幔源岩浆的底侵有关(Gu Lianxing et al., 2006; Tang Junhua et al., 2007)。因此,黄山-镜儿泉成矿带在 300~240 Ma 以受压扭性应力控制为主,在 240 Ma 之后可能逐渐变为伸展背景。根据干墩断层两侧地层时代的新老关系和该区域构造应力状态的转换,我们推测干墩断裂发生于 240 Ma 以后的伸展背景,是向南倾的正断层,其活动使上盘的上石炭统干墩组地层的下移,后期剥蚀作用导致泥盆系梧桐窝子组出露地表。

早一中泥盆世梧桐窝子组与晚石炭世干墩组之间的晚泥盆世-早石炭世地层厚度,可以用来估计黄山-镜儿泉成矿带岩浆通道系统的规模。根据康古尔-雅满苏岛弧带 1:20000 区域地质报告,下-中泥盆统地层约 1500 m,上泥盆统地层缺失;下石炭统雅满苏组厚度约为 5000 m,中上石炭统地层厚度约为 4800 m。由上述资料推算上石炭统干墩组与中一下泥盆统梧桐窝子组之间的地层总厚度大约 10 km。尽管仅根据这些地层厚度并不能准确估算两套地层中含矿岩体侵位的深度,但是可以大致推测梧桐窝子组与干墩组含矿岩体之间的深度范围约为 10 km。因此,在黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带中,图拉尔根、香山等侵入于泥盆系梧桐窝子组的岩墙状矿化岩体代表了深部的岩浆通道,而黄山、黄山东等侵入于下石炭统干墩组地层规模较大的岩盆状或漏斗状含矿岩体则代表了岩浆通道系统上部的岩浆房。由于干墩组地层上部为变质砂岩,下部为碳

质板岩,从围岩的深度来推出侵位于碳质板岩中的黄山东岩体的侵位深度应该稍大于侵位于变质砂岩中的黄山岩体(图 2),两个岩体不存在空间叠置关系。这种特点与加拿大 Voisey's Bay 成矿系统非常相似(Lightfoot and Evans-Lamswood, 2015)。不同深度岩浆通道系统上含矿岩体几何形态特征的差异很可能与不同深度围岩压力条件不同有关,较浅部位围岩压力较小,更有利于规模较大岩浆房的形成。

7 结论

(1) 黄山-镜儿泉成矿带梧桐窝子组和干墩组地层最大的沉积年龄分别为早—中泥盆世和晚石炭世。

(2) 北天山洋向南的俯冲以及康古尔-雅满苏岛弧带的岩浆活动至少始于中泥盆世。

(3) 对于黄山-镜儿泉成矿带而言,成矿岩浆通道系统在深部以岩墙为主,形成了侵位于梧桐窝子组地层中的图拉尔根、香山等岩墙状含矿岩体,葫芦岩体那样的岩盆较少;而岩浆通道系统的上部则以形成规模较大的漏斗状含矿岩体为主,如黄山东、黄山、黄山南等含矿岩体。这很可能与不同深度围岩压力条件有关。

致谢: 本次研究的野外工作得到了哈密和鑫矿业有限公司朱学峰工程师的大力支持,新疆地矿局第六地质大队邓刚总工程师和李卫东高级工程师对本文的写作给予了宝贵的建议,实验分析得到了合肥工业大学资源与环境工程学院汪方跃老师的帮助。非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。

References

Barnes S J, Cruden A R, Arndt N, Saumur B M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits: *Ore Geology Reviews*, 76: 296~316.

Branquet Y, Gumiaux C, Sizaret S, Barbanson L, Wang B, Cluzel D, Li G, Delaunay A. 2012. Synkinematic mafic/ultramafic sheeted intrusions: emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt (Eastern Tianshan, NW China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 240~257.

Cao Rui, Muhetaer Zari, Chen Bin, Li Dewei, Cao Fugen, Liu Demin. 2012. Geochemistry and Sr-Nd isotopic characteristics of the Carboniferous volcanic rocks from the Eastern Tianshan suture zone and tectonic implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 400~409 (in Chinese with English abstract).

Cao Rui, Muhetaer Z, Nijat A, Cai Hongming, Wang Dunke. 2018. Geochemistry and Sr-Nd isotope composition of Carboniferous volcanic rocks of the Jueltage Orogenic belt: implications for the tectonic evolution of Eastern Tianshan, China. *International Geology Review*, 60(1): 43~56.

Chen Jiping, Luo Ting, Wang Hui, Liao Qunan, Zhang Xionghua, Chen Enke, Wang Jiejie, Meng Qinyu, Liu Xiaoming. 2016. Zircon Hf isotope characteristics and source of mafic-ultramafic intrusions in Huangshan region, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 49(4): 51~61 (in Chinese with English abstract).

Chen Wen, Sun Shu, Zhang Yan, Xiao Wenjiao, Wang Yitian, Wang Qingli, Jiang Lifeng, Yang Junta. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Qiugemingtashi-Huangshan ductile shear zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 790~804 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhenyu, Xiao Wenjiao, Windley B F, Schulmann K, Mao Qigui, Zhang Zhiyong, Zhang Jien, Deng Chen, Song Shuaihua. 2019. Composition, provenance and tectonic setting of the Southern Kangurtag accretionary complex in the Eastern Tianshan, NW China: implications for the late Paleozoic evolution of the North Tianshan Ocean. *Tectonics*, 38(8): 2779~2802.

Deng Yufeng, Song Xieyan, Chen Liemeng, Cheng Songlin, Zhang Xinli, Li Jun. 2011a. Features of the mantle source of the Huangshan Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3640~3652 (in Chinese with English abstract).

Deng Yufeng, Song Xieyan, Jie Wei, Cheng Songlin, Li Jun. 2011b. Petrogenesis of the Huangshandong Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, Northern Tianshan, Xinjiang: evidence from major and trace elements and Sr-Nd Isotope. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1435~1452 (in Chinese with English abstract).

Deng Yufeng, Song Xieyan, Chen Liemeng, Zhou Taofa, Pirajno F, Yuan Feng, Xie Wei, Zhang Dayu. 2014. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts. *Ore Geology Reviews*, 56: 181~198.

Deng Yufeng, Song Xieyan, Hollings P, Zhou Taofa, Yuan Feng, Chen Liemeng, Zhang Dayu. 2015. Role of asthenosphere and lithosphere in the genesis of the Early Permian Huangshan mafic-ultramafic intrusion in the Northern Tianshan, NW China. *Lithos*, 227: 241~254.

Deng Yufeng, Song Xieyan, Hollings P, Chen Liemeng, Zhou Taofa, Yuan Feng, Xie Wei, Zhang Dayu, Zhao Bingbing. 2017. Lithological and geochemical constraints on the magma conduit systems of the Huangshan Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Mineralium Deposita*, 52: 845~862.

Dickinson W R, Gehrels G E. 2009. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1): 115~125.

Du Long, Long Xiaoping, Yuan Chao, Zhang Yunying, Huang Zongying, Sun Min, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao. 2018. Early Paleozoic dioritic and granitic plutons in the Eastern Tianshan Orogenic belt, NW China: constraints on the initiation of a magmatic arc in the southern Central Asian Orogenic Belt. *J. Asian Earth Sci.* 153, 139~153.

Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, Wang Xiyin, Tang Junhua, Wang Chuansheng, Xi Aihua, Zheng Yuanchuan. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103~1120 (in Chinese with English abstract).

Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Li Zonghuai. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and geology of Kalatongke-Huangshan mafic-ultramafic complex, Xinjiang, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324~2328.

Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Ao Songjian, Zhang Jien, Qu Wenjun, Du Andao. 2010. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: constraints on the timing and genesis of the mineralization. *Lithos*, 120(3-4): 547~562.

- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Su Benxun, Sakyi P A, Ao Songjian, Wan Bo, Zhang Jien, Zhang Zhiyong. 2013. SIMS U-Pb zircon dating and Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni deposit, eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt, and its geological significance. *Journal of Geosciences*, 58: 251~270.
- He Yunpeng, Sun Jinggui, Wang Zhongyu. 2019. Petrogenesis and mineralization of the Huangshandong mafic-ultramafic intrusion in eastern Tianshan, NW China. *Geological Journal*, 54: 3786~3802.
- Hou Tong, Zhang Zhaochong, Santosh M, Encarnacion J, Zhu Jiang, Luo Wenjuan. 2014. Geochronology and geochemistry of submarine volcanic rocks in the Yamansu iron deposit, Eastern Tianshan Mountains, NW China: constraints on the metallogenesis. *Ore Geology Reviews* 56: 487~502
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82~92.
- Li Dedong, Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Long Lingli, Liao Zhen. 2012. The timing order of mineralization and diagenesis for Xiangshan complex rocks, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2103~2112 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenqian, Ma Huadong, Wang Rang, Wang He, Xia Bin. 2008. SHRIMP dating and Nd-Sr isotopic tracing of Kangguertage ophiolite in eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 773~780 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Chen Junlu, Dong Yunpeng, Xu Xueyi, Li Zhipei, Liu Xiaoming, He Dengfeng. 2016. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian ocean; zircons U-Pb geochronological and geochemical evidence from the Kalatang high-Mg andesites, East Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 505~521 (in Chinese with English abstract).
- Li Yaping, Sun Guihua, Li Jinyi, Wang Yanbin, Xu Xin, He Guoqi, Jia Jindian. 2006. Devonian granite on the eastern margin of the Tuha basin in the East Tianshan, Xinjiang, China and its tectonic implication. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 932~936 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C, Evans-Lamswood D. 2015. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. *Ore Geology Reviews*, 64: 354~386.
- Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 2005. Copper Deposits and Nickel Deposits in Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1~360 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Sang Longkang. 2002. Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1~346 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/EX, version 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley, California, pp. 1~55.
- Luo Ting, Liao Qunan, Zhang Xionghua, Chen Jiping, Wang Guocan, Huang Xing. 2016. Geochronology and geochemistry of Carboniferous metabasalts in eastern Tianshan, Central Asia: evidence of a back-arc basin. *International Geology Review*, 58(6): 756~772.
- Mao Yajing, Qin Kezhang, Li Chusi, Tang Dongmei. 2015. A modified genetic model for the Huangshandong magmatic sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, western China. *Mineralium Deposita*, 50: 65~82.
- Mao Yajing, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Feng Hongye, Xue Shengchao. 2016. Crustal contamination and sulfide immiscibility history of the Permian Huangshannan magmatic Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 22~37.
- Mao Yajing, Qin Kezhang, Tang Dongmei. 2018. Revisiting the age and emplacement process of the Huangshandong Ni-Cu deposit in the Central Asian Orogenic belt, northwestern China: Implications for multiple magma extractions from a short-lived staging magma chamber. *Lithos*, 320~321: 583~591.
- Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C, Kunilov V A, Gorbachev N S, Doherty W, Johan J. 1995. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: their formation in conduits for flood basalt volcanism. *Trans Inst Mining Metal* 104: B18~B36
- Ning Siyuan, Wang Fangyue, Xue Weidong, Zhou Taofa. 2017. Geochemistry of the Baoshan pluton in the Tongling region of the Lower Yangtze River Belt. *Geochimica*, 46(5): 397~412 (in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, Xu Xingwang, Yan Zheng, Mao Jinwen. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China. In: Mao J W, Goldfarb R, Seltmann R, Wang D H, Xiao W J, Hart C (eds) *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. London: IAGOD Guidebook Series, 10: 227~248.
- Qin Kezhang, Su Benxun, Sakyi P A, Tang Dongmei, Li Xianhua, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-Bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): constraints on a ca. 280 Ma mantle plume. *American Journal of Science*, 311(3): 237~260.
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, Tang Dongmei, Su Benxun, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping. 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulaergen large Cu-Ni district and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3027~3035 (in Chinese with English abstract).
- Shuai Zhen, Chen Hongjun, Qian Zhuangzhi, Xu Gang, Feng Yanqing, Duan Jun, Ren Meng. 2019. Genesis and Cu-Ni metallogenetic potential of Hongshigang mafic-ultramafic intrusion in East Tiashan, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 156~169 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Xie Wei, Deng Yufeng, Crawford A J, Zheng Wenqin, Zhou Guofu, Deng Gang, Chen Songlin, Li Jun. 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 127: 128~143.
- Song Xieyan, Chen Liemeng, Deng Yufeng, Xie Wei. 2013. Syncollisional tholeiitic magmatism induced by asthenosphere upwelling owing to slab detachment at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society, London*, 170: 941~950.
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, He Ke, Sun Yali, Wang Jianzhong, Xia Mingzhe. 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3339~3349 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Li Chusi, Xia Mingzhe, Yang Suhong. 2013. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes. *Lithos*, 182~183: 185~199.
- Sun Yan, Wang Jingbin, Li Yuechen, Wang Yuwang, Yu Mingjie, Long Lingli, Lü Xiaoqiang, Chen Lei. 2018. Recognition of Late Ordovician Yudai porphyry Cu (Au, Mo) mineralization in the Kalatag district, Eastern Tianshan terrane, NW China: constraints from geology, geochronology, and petrology. *Ore Geology Reviews*, 100: 220~236.
- Sun Yan, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Long Longli, Mao Qigui, Yu Mingjie. 2019. Ages and origins of granitoids from the Kalatag Cu cluster in Eastern Tianshan, NW China: constraints on Ordovician-Devonian arc evolution and porphyry Cu fertility

- in the Southern Central Asian orogenic belt. *Lithos* 330~331; 55~73.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Su Benxun, Sakyi P A, Mao Yajing, Xue Shengchao. 2014. Petrogenesis and mineralization of the Hulu Ni-Cu sulfide deposit in Xinjiang, NW China: constraints from Sr-Nd isotopic and PGE compositions. *International Geology Review*, 56: 711~733.
- Tang Junhua, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, San Jinzhu, Wang Chuansheng, Liu Sihai, Li Guangrong. 2007. Peraluminous granite in Huangshan-Jingerquan area of eastern Tianshan: geochemistry, mineralogy and geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 921~946 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bo, Cluzel D, Jahn B M, Shu Liangshu, Chen Yan, Zhai Yazhong, Branquet Y, Barbanson L, Sizaret S. 2014. Late paleozoic pre- and syn-kinematic plutons of the Kangguer-Huangshan shear zone: inference on the tectonic evolution of the eastern Chinese North Tianshan. *American Journal of Science*, 314: 43~79.
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Chen Shoubo, Zhang Jiangwei, Li Kan, You Minxin. 2017. Petrogenesis and metallogenic potential analysis of mafic intrusion in the Hongshigangbei Ni-Cu sulfide mineralization in East Tianshan, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 776~791 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 15: 1554~1569.
- Xiao Qinghua, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, Sun He, San Jinzhu, Cao Mingjian and Hui Weidong. 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni-Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: Evidences from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 503~522 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Sun Shu, Li Jiliang. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(04): 370~395.
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Lin Shoufa, Chen Hanlin, Li Zilong, Li Jiliang, Sun Shu. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2~4): 102~117.
- Xu Xingwang, Ma Tianlin, Sun Liqian, Cai Xiping. 2003. Characteristics and dynamic origin of the large-scale Jiaoluoage ductile compressional zone in the eastern Tianshan Mountains, China. *Journal of Structural Geology*, 25: 1901~1915.
- Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, Qin Kezhang, Zhang Qi. 2006. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41: 188~200.
- Zhao Hao, Liao Qunan, Li Sanzhong, Xiao Dian, Wang Gguocan, Guo Ruilu, Xue Zhuqing, Li Xiyao. 2020. Early Paleozoic tectonic evolution and magmatism in the Eastern Tianshan, NW China: evidence from geochronology and geochemistry of volcanic rocks. *Gondwana Research*, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.12.016>
- Zhao Yun, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Yang Yongqiang, Ke Junjun. 2015. Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-untamafic intrusion, Eastern Tianshan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 155~172.
- Zhao Yun, Xue Chunji, Symons D, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, Yang Yongqiang, Zu Bo. 2018. Temporal variations in the mantle source beneath the Eastern Tianshan nickel belt and implications for Ni-Cu mineralization potential. *Lithos*, 314~315: 597~616.
- Zhou Meifu, Leshner C M, Yang Zhengxi, Li Jianwei, Sun Min. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan District, eastern Xinjiang, northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209(3-4): 233~257.
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Dayu, Fan Yu, Liu Shuai, Peng Mingxing, Zhang Jianzhen. 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, Eastern tianhan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478~502 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈继平, 罗婷, 王晖, 廖群安, 张雄华, 陈恩科, 王杰杰, 孟秦宇, 柳小明. 2016. 新疆黄山镁铁-超镁铁岩带锆石 Hf 同位素特征及源区性质探讨. *西北地质*, 49(4): 51~61.
- 曹锐, 木合塔尔, 扎日, 陈斌, 李德威, 曹福根, 刘德民. 2012. 东天山板块缝合带石炭纪火山岩地球化学和 Sr-Nd 同位素特征及其大地构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 400~409.
- 陈文, 孙枢, 张彦, 肖文交, 王义天, 王清利, 姜立丰, 杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. *地质学报*, 79(6): 790~804.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列猛, 程松林, 张新利, 李军. 2011a. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究. *岩石学报*, 27(12): 3640~3652.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 颜炜, 陈松林, 李军. 2011b. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆源区特征研究. *地质学报*, 85(9): 1435~1452.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 郝爱华, 郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5): 1103~1120.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-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(22): 2324~2328.
- 李德惠, 周守云, 殷定泰, 竺国强, 蒋寄云, 等. 1989. 黄山铜镍成矿带地质、地球物理和地球化学综合研究及找矿靶区优选报告. 新疆 305 项目组报告, 1~418.
- 李德东, 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 廖震. 2012. 新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序. *岩石学报*, 28(7): 2103~2112.
- 李文铅, 马华东, 王冉, 王核, 夏斌. 2008. 东天山康古尔塔格蛇绿岩 SHRIMP 年龄、Nd-Sr 同位素特征及构造意义. *岩石学报*, 24(4): 773~780.
- 李玮, 陈隽璐, 董云鹏, 徐学义, 李智佩, 柳小明, 何登峰. 2016. 早古生代古亚洲洋俯冲记录: 来自东天山卡拉塔格高镁安山岩的年代学, 地球化学证据. *岩石学报*, 32(2): 505~521.
- 李亚萍, 孙桂华, 李锦轶, 王彦斌, 徐新, 何国琦, 贾金典. 2006. 吐哈盆地东缘泥盆纪花岗岩的确定及其地质意义. *地质通报*, 25(8): 932~936.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床. 北京: 地质出版社, 1~360.
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 1~346.
- 宁思远, 汪方跃, 薛伟栋, 周涛发. 2017. 长江中下游铜陵地区宝山岩体地球化学研究. *地球化学* 46(5), 397~412.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 肖庆华, 刘平平. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 26(10): 3027~3035.
- 师震, 陈宏骏, 钱壮志, 徐刚, 冯延清, 段俊, 任萌. 2019. 东天山红石岗镁铁-超镁铁质岩体成因及铜镍成矿潜力. *地球科学与环境学报*, 41(2): 156~169.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颜炜, 陈列猛, 于宋月, 梁庆林. 2018. 新疆黄山—镜儿泉铜镍成矿带岩浆作用与区域走滑构造的关系. *地球科学与环境学报*, 40(5): 505~519.
- 宋谢炎, 肖家飞, 朱丹, 朱维光, 陈列猛. 2010. 岩浆通道系统与岩

- 浆硫化物成矿研究新进展. 地学前缘, 17(1): 153~163.
- 孙涛, 钱壮志, 汤中立, 姜常义, 何克, 孙亚莉, 王建中, 夏明哲. 2010. 新疆葫芦铜镍矿床锆石 U-Pb 年代学、钍族元素地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 26(11): 3339~3349.
- 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 三金柱, 汪传胜, 刘四海, 张光辉. 2007. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因. 岩石学报, 23(8): 1803~1820.
- 汪方跃, 葛黎, 宁思远, 聂利青, 钟国雄, White N. 2017. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用. 岩石学报 33, 3422~3436.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 余吉远, 武鹏. 2012. 甘肃新疆交界地区四顶黑山镁铁质-超镁铁质岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 地质通报, 31(12): 2046~2051.
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23~31.
- 王亚磊, 张照伟, 陈寿波, 张江伟, 李侃, 尤敏鑫. 2017. 新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析. 地质学报, 91(4): 776~791.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 新疆地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~841.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 曹明坚, 惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据. 岩石学报, 26(2): 503~522.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究. 岩石学报, 26(2): 478~502.

Determination of sedimentary ages of strata in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt and its geological significance

DENG Yufeng^{1, 4)}, SONG Xieyan^{*2)}, JIE Wei³⁾, YUAN Feng^{1, 4)}, ZHAO Zhaoming⁵⁾,
WEI Shuai¹⁾, ZHU Jinjin³⁾, KANG Jian²⁾, WANG Kaiyuan²⁾,
LIANG Qinglin²⁾, CHEN Liemeng²⁾, YU Songyue²⁾

1) Ore Deposits and Exploration Centre, School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009; 2) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002; 3) College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, 210098;

4) Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei, 230009;

5) Hexin Mining Co. LTD, Hami, Xinjiang, 839000

* Corresponding author: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

Abstract

U-Pb ages of the detrital zircons from Gandun and Wutongwozi Formations along the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu metallogenic belt were determined using LA-ICP-MS (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry). The U-Pb ages of detrital zircon from the Gandun carbonaceous slate, meta-sandstone, and meta-arkose are 301~491 Ma, 307~426 Ma and 313~461 Ma, respectively. The weighted mean ages of the youngest zircons of these three samples are 307.1 ± 3.7 Ma, 310.4 ± 2.2 Ma, 315.0 ± 10 Ma, respectively, indicating that the maximum sedimentary age of the Gandun Formation is Late Carboniferous. The U-Pb ages of detrital zircons from the Wutongwozi metasandstone and meta-tuff are 384~448 Ma and 393~448 Ma, respectively. The weighted mean ages of the youngest zircons of the two samples are 386.5 ± 5.8 Ma and 394.6 ± 4.5 Ma, respectively, suggesting a sedimentary event in the Early-Middle Devonian. This is consistent with recent zircon U-Pb ages of the plutons emplaced in the Wutongwozi Formation. The new U-Pb ages of the detrital zircons from the Gandun and Wutongwozi Formations demonstrated that the subduction along the Kanguer-Yamansu arc belt was initiated in the Middle Devonian. The Upper Devonian-Lower Carboniferous strata between the Wutongwozi and Gandun Formations are ~10 km thick. This implies that the magma conduit system for the Ni-Cu sulfide mineralization extended at least 10 km in vertical direction; the Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions emplaced in the Wutongwozi and Gandun Formations represent magmatic conduit in the depths and the magma chambers in the shallow levels, respectively.

Key words: Huangshan-Jingerquan mineralization belt; magmatic Cu-Ni deposit; Wutongwozi Formation; Gandun Formation; detrital zircons U-Pb age