

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究

孙大中 李惠民 林源贤

周慧芳 赵凤清 唐 敏

(中国地质科学院天津地质矿产研究所)



中条山既是一个典型的前寒武纪岩石出露区,又是不同类型铜矿的集中区。使用 6 种测年方法,共取得 55 个年龄数据。据此:1) 比较和讨论了不同方法测年结果的可靠性,指出在中条山单颗锆石 U-Pb 和离子探针质谱等年龄是较为可靠的;2) 用较可靠的年龄建立了年代构造格架,表明该元古宙活动带年龄正落于全球岩浆活动稀少的 2400—2000 Ma 的时限内。格架还反映了活动带的重大事件;3) 用捕获锆石年龄和亏损源铀模式年龄(TDM)

以及地球化学和地质学为依据,建立的中条山前寒武纪年代地壳结构模式,是华北克拉通的一种地壳结构模式的代表。

一、前 言

年代构造格架是用详细的年代学资料来表示某一地区构造格局和各种地质事件在时间和空间的演化过程。它是近年来兴起的一种研究前寒武纪地壳生长和演化的重要方法^[1-5]。本文对山西南部中条山前寒武系采用多种测年方法进行年龄测定,并优选其精确测年结果建立了年代构造格架,厘定了中条山元古宙的重要地质事件的时空演化关系。

然而,这种年代构造格架只反映地壳上部和表层的演化过程。能否进一步对深部地壳进行研究呢?本文将测年过程中衍生出来的深部年龄信息与地球化学资料相结合,建立了一个时间上有顺序的中条山前寒武纪年代地壳结构模式。同时提出一种用火成岩年代-地球化学作为岩石圈探针的方法。

二、地质背景和年代学研究对象

中条山是个蕴藏有丰富铜矿资源的前寒武纪岩石出露区,经多年工作,其地质轮廓和铜矿成矿作用已基本弄清^[6-8](图 1)。

本区主要为元古宙早期和中期的岩石。西侧为多期花岗质岩石侵入的含有变质岩包体的涑水杂岩带,其中包括有近期厘定的冷口变质火山岩。在东北方向出露有绛县群,下部为陆源碎屑沉积物,上部有钾质双峰式火山岩,分别赋存有横岭关型沉积铜矿和铜矿峪

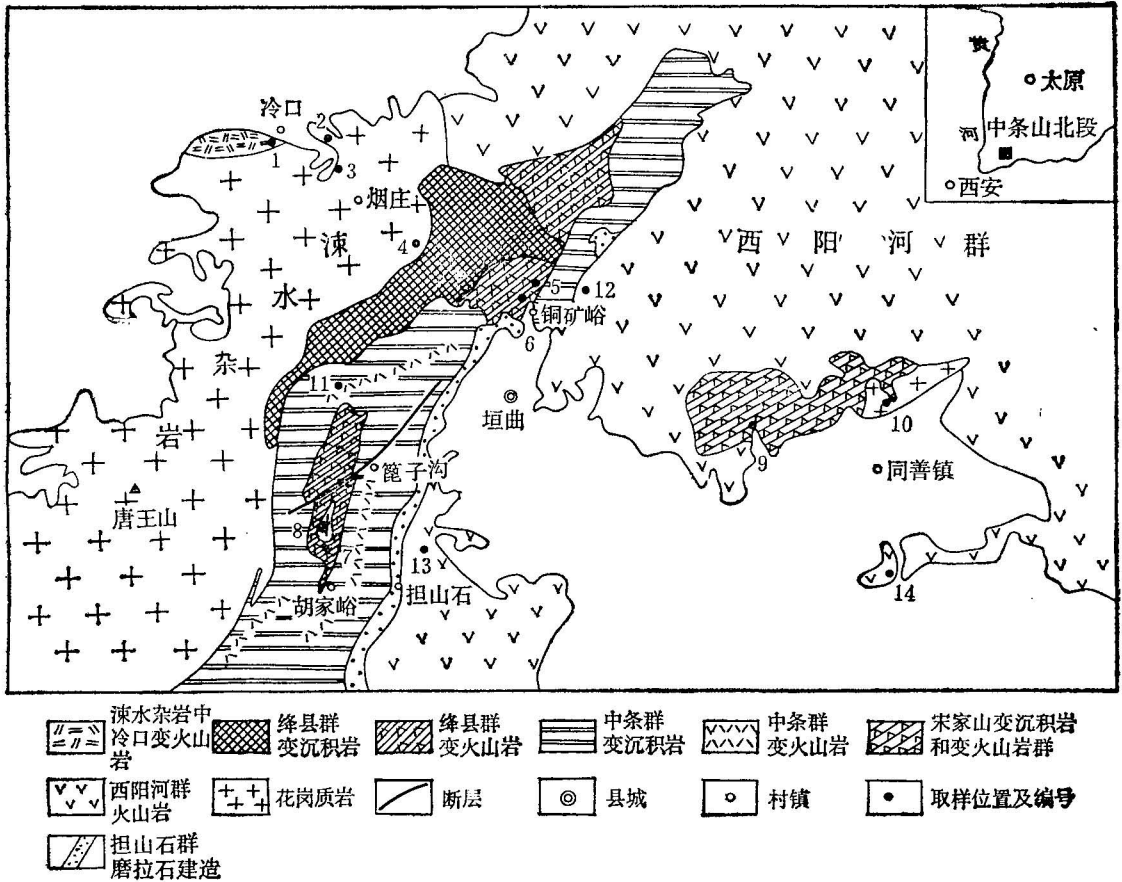


图 1 山西省中条山北段前寒武纪岩石分布图

Fig.1 Distribution of Precambrian rocks of the northern Zhongtiao Mountains, Shangxi Province

图中年龄样品取样位置及编号与表 1-4 中括弧中编号一致。

型斑岩铜矿。之后有绛县构造运动。其上有不整合覆盖的以砂岩-页岩-灰岩组合的浅水沉积，局部有火山喷出物，并出现篦子沟型内源沉积铜矿，属中条群。上述岩石均遭受中条运动第 I 幕所形成的岩层增厚及升温所引起的中低级区域变质。在中条群东侧山麓，出现以磨拉石建造为代表的担山石群，在其堆积过程中有花岗岩等侵位、地壳抬升和剥蚀并伴有区域变质作用。这是中条运动的第 II 幕，代表了本区克拉通化的终结。

西阳河群属于未变质的盖层，以大量喷出的双峰式火山岩为代表。在本区东部西阳河群中，还见有宋家山群变质的火山岩和沉积岩呈构造窗出露，它可能与绛县群大致相当。

前述地层中共有 5 套双峰式火山岩，即：涑水杂岩中的冷口变质火山岩、绛县群上部的铜矿峪变质火山岩、宋家山群绛道沟的变质火山岩、中条群下亚群中部的篦子沟变质火山岩和西阳河群大面积出露的火山岩。还有 5 期以上的花岗岩类侵入岩，即：寨子英云闪长(片麻)岩、横岭关花岗闪长岩、铜矿峪含铜石英斑岩、北峪花岗岩和烟庄钾质花岗岩

等。这些岩石在时间上和空间上的配置,对于研究本区年代构造格架提供了有利的条件。

三、测年方法和条件

对上述火成岩和变质火成岩,进行的年龄测定共采用了 6 种方法。仅对长英质岩石中锆石进行测年就有 4 种方法,如单颗锆石的 U-Pb 一致线法,单颗锆石离子探针质谱法,单颗锆石蒸发铅法和常规锆石 U-Pb 一致线法。另外两种方法是对火山岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 全岩等时线法。

所有样品的采集和矿物分选工作均由作者完成。锆石主要选取无裂纹、无包体、无蚀变和无色透明的干净锆石进行测定。其中单颗锆石 U-Pb 一致线年龄¹⁾和离子探针质谱(SHRIMP)年龄均系李惠民在 R.W. Page 和 W. Compston 博士指导下,在澳大利亚国立大学同位素实验室完成。使用的方法条件见李惠民等(1991)^[11] T.E. Krogh (1973, 1982)^[12,13] 和 W. Compston (1984)^[14] 的文章。单颗锆石蒸发铅法年龄是由 A. Kröner 在西德 Max-Planck 化学研究所测定的^[15]。使用方法见 B. Kober (1986, 1987)^[16,17] 的文章。常规锆石 U-Pb 一致线是采用 T.E. Krogh (1973)^[12] 的方法由周慧芳在天津地质矿产研究所同位素地质实验室完成的,少部分数据由北京铀矿地质研究所王文广和李子颖提供。

Sm-Nd 和 Rb-Sr 全岩等时年龄由林源贤在天津地质矿产研究所同位素地质实验室中完成。Rb-Sr 和 Sm-Nd 均采用双流程分离法在净化实验室完成。Sr 的分馏校正,因子为 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$; Nd 的分馏校正因子采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 。质谱分析在 VG-354 质谱计上进行。JMC Nd 的测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511134 \pm 0.001\%$; BCR-1 的 Nd 测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512646 \pm 0.001\%$; NBS-987 的测定值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71025$; NBS-607 的 Sr 测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.20041$ 。

四、不同方法测年结果及其对比

上述 6 种测年方法,共取得约 55 个年龄数据。其结果分别列在表 1 至表 4 中。对不同测年方法所取得年龄的比较及其意义可归纳为如下几个方面。

1. 单颗锆石测年选用成分和构造简单的颗粒,可以给出单体的年龄。特别是单颗锆石 U-Pb 测年精度可达 0.05%,为精确的测年方法。离子探针质谱测年属高科技,虽然其误差给出为 1σ ,但仍小于地质上或其它因素造成的误差。表 1 中单颗锆石 U-Pb 和离子探针质谱年龄中**有用黑体字表示者**,它们是根据地质,岩石和锆石等特征判别为岩浆结晶年龄,代表火成岩的生成年龄。其余的年龄为由深部携带上来的继承锆石或捕获锆石年龄²⁾。这两种方法所获得的同一火山岩的岩浆年龄是十分一致的,涑水杂岩中冷口变英安质凝灰岩(ZB7004)和西阳河群许山组英安斑岩(ZG096)的两种方法所得岩浆结晶年龄的结果就是如此(表 1、表 5、图 2)。对绛县群铜矿峪组变流纹质凝灰岩(ZT-7002)中单

1) 锆石颗粒细小时,用少数几颗同样的晶体测定做为一个点。

2) 5Z011, ZG727 和 ZG0843 个样品的岩石成分均为钾质较高的长英质火成岩,推测为低共熔的产物,其熔点低于锆石的熔点,所以可能是保留了原岩的继承锆石。

表 1 中条山单颗锆石 U-Pb 年龄和离子探针质谱年龄^①
 Tab. 1 U-Pb ages and ion microprobe ages of single zircons from the Zhongtiao Mountains

编 号 (同图1)	岩 石	单颗粒锆石 U-Pb 年龄(2 σ) ^②	单颗粒锆石离子探针质谱年龄 (1 σ) ^②
ZG096 (14)	西阳河群许山组英安斑岩	1826 \pm 32Ma (2 颗) 2022—2164Ma (6 颗) 2338Ma (1 颗) 2449Ma (1 颗)	1840 \pm 14Ma (16 颗) 2089 \pm 12Ma (1 颗) 2511 \pm 10Ma (1 颗)
ZC126 (11)	中条群隗子沟组变英安质凝灰岩	2059 \pm 5Ma (4 组, 无色透明, 自形, 细粒) 2176—2143Ma (2 组非常细小) 2453Ma (1 颗, 褐色、高 U)	
ZT7002 (6)	绛县群铜矿峪变流纹质凝灰岩	2166 \pm 26Ma (6 组, 自形、无色或粉红色、透明) 2455Ma (1 组, 粉红色有磨损的颗粒)	
ZG5002 (7)	铜矿峪变流纹质凝灰岩	2145 Ma[1组] 2335 Ma[1组] ~2500 Ma[2组]	2115 \pm 6Ma (14 颗) 2530 \pm 3Ma (10 颗) 2770 \pm 16Ma (1 颗)
5Z011 (5)	铜矿峪变熔结凝灰岩	2571 \pm 77Ma (7 组, 自形、无色或粉红色)	
ZG727 (10)	侵入于宋家山群的花岗岩	2485 \pm 1Ma (4 组, 浅色自形) 2535 \pm 41Ma (5 组, 高 U)	
ZG084 (9)	宋家山群绛道沟变酸性凝灰岩	2562 \pm 79Ma (5 颗) 2668 \pm 15Ma (4 颗) 2736Ma (1 颗) 2764Ma (1 颗)	} 主要为自形、少数浑圆
ZB7077 (2)	涑水杂岩中寨子英云闪长岩	2321 \pm 2Ma (6 颗, 无色、透明)	
ZB7004 (1)	涑水杂岩中冷口变英安质凝灰岩	2360 \pm 62Ma (6 组, 无色或浅粉色、自形) 2436Ma (1 组) 2508Ma (1 组, 高 U)	2330 \pm 5Ma (15 颗)
ZB7076 (3)	涑水杂岩中冷口变中基性火山凝灰岩	2349 \pm 20Ma (6 组, 细粒) 2460Ma (1 组) 2590Ma (1 组)	

① 详细资料见[11]。

② 年龄数据黑体字者代表正确的岩浆年龄, 白体字者代表由深部携带上来的继承锆石和/或捕获锆石年龄。

锆石是用 U-Pb 法测年和胡家峪附近同一岩组的变流纹质凝灰岩 (ZG5002) 中的单颗锆石是用离子探针质谱测年, 其岩浆结晶年龄也是相近的(表 1, 表 5)。由此可见单颗锆石 U-Pb 和离子探针质谱年龄的吻合性较好, 证明这两种测年结果是较为正确的年龄。

2. 单颗锆石蒸发 Pb 法, 由于该方法较简单, 控制因素少, 对 ^{204}Pb 的校正和当放射性铅丢失十分严重时, 可能对年龄测定造成误差^[11, 18]。尽管年龄值给出的误差范围小(表 2), 这只是实验误差, 不包括地质误差。表 2 与表 1 相同编号的样品, 在表 5 中可以看出单颗锆石蒸发 Pb 法年龄与正确年龄相比一般偏老。冷口变英安质凝灰岩 (ZB7004) 锆

表 2 中条山单颗锆石蒸发铅年龄^①Tab. 2 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of single zircon evaporation from the Zhongtiao Mountains

编 号	地 层	岩 石	锆石颗粒特征	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)
ZC126 (11)	中条群	篦子沟变英安 质凝灰岩	无色至粉红色,自形	2104±5
ZT7002 (6)	绛县群	铜矿峪变流纹 质凝灰岩	无色至红褐色,自形	2139±5 (3 颗) 2316±5 (1 颗)
5Z011 (5)	绛县群	”	粉红色,自形	2506±5
ZG5002 (7)	绛县群	” (南部)	{ 无色,自形 红褐色 粉红色,自形	2231±5 (2 颗) 2469±5 (1 颗) 2744±7 (1 颗) 2768±6 (1 颗)
ZB7004 (1)	涑水杂岩	冷口变英安质 凝灰岩	灰色,自形	2521±3

① 本文作者提供锆石样品, A. Kröner 进行测年。

表 3 中条山常规锆石 U-Pb 年龄

Tab. 3 U-Pb ages of conventional zircon from the Zhongtiao Mountains

编 号	地层或侵入岩	岩 石 类 型	锆石上交点年龄 (Ma)
ZG059 (12)	西阳河群 许山组	流纹岩	1829 ⁺¹⁴ -29
5Z011 (5)	绛县群 铜矿峪组	变流纹质凝灰岩	2486±13
①	烟庄花岗岩	花岗岩	1888 ⁺⁵² -47
ZG023 (4)	横岭关花岗岩	花岗岩	2231±86
②	绛县群 铜矿峪组	变石英晶屑凝灰岩	2182 ⁺¹⁵ -14
ZT7070 (5 点北)	侵入于铜矿峪 组	变石英斑岩	2195±64

① 李子颖提供。

② 引自 [20]。

石蒸发 Pb 年龄偏老为 170—200Ma; 绛县群变流纹质凝灰岩可偏老 116Ma; 中条群篦子沟变英安质凝灰岩 (ZC126) 偏老 46Ma, 而铜矿峪的变流纹质凝灰岩 (ZT7002) 中单颗锆石蒸发铅年龄与 U-Pb 年龄相近。由此可见, 锆石蒸发铅年龄还有其不稳定性。

3. 常规锆石 U-Pb 法, 由于每组锆石颗粒多达百颗以上, 难免有不同年龄锆石的混入 (表 1, 2), 这样使用该法所得年龄有时为混合年龄^[19]。因此当样品中有捕获或继承锆石时均可造成年龄偏大的趋势。如铜矿峪含铜的变石英晶屑凝灰岩, 常规锆石年龄为 $2182 \pm 15\text{Ma}$ ^[20], 含铜的石英斑岩 (ZT7070) 为 $2195 \pm 64\text{Ma}$, 均比其相邻的下部层位围岩 (ZT7002) 年龄 $2166 \pm 51\text{Ma}$ 要老, 可能就是这种原因 (表 1, 3)。而西阳河群许山组流纹岩中常规锆石年龄 (ZG059) 与其同岩组英安斑岩 (ZG096) 单颗锆石 U-Pb 和离子

表 4 中条山 Sm-Nd 和 Rb-Sr 全岩等时年龄

Tab. 4 Sm-Nd and Rb-Sr whole-rock isochron ages from the Zhongtiao Mountains

岩石③	Sm-Nd 等时年龄					Rb-Sr 等时年龄			
	年龄 (2 σ)Ma	$\Sigma Nd_{(T)}$	R	T _{DM} Ga①	样品数	年龄 (2 σ)Ma	I _{Sr}	R	样品数
西阳河群许山组火山岩 (13)		-4.1②		3.11	1	1635±6	0.7072	0.9999	9
中条群篦子沟变质火山凝灰岩 (11)	2216±29	+2.51	0.9997	2.55 -2.62	5	2088±53	0.7073	0.9988	9
绛县群铜矿峪变质双峰式火山岩 (6)	2554±35	+2.25	0.9998	2.76 -3.03	8	2393±11	0.7065	0.9998	5
宋家山群绛道沟变质火山岩 (9)	2535±19	+2.05	0.9999	2.59 -3.04	9	1394±26	0.7066	0.9995	9
漭水杂岩中冷口变质火山岩 (1)	2497±51	+2.30	0.9996	2.65 -2.73	8	2440±43	0.7031	0.9998	7
北峪奥长花岗岩 (8)						2107±59	0.7023	0.9995	7

① Ga 为10亿年的时间单位。

② 以单颗粒锆石年龄 1.83Ga 来计算。

③ 岩石栏括弧内号码与图 1 的取样位置编号相同。

表 5 中条山不同测年方法所获年龄的比较①

Tab. 5 Comparison of the ages obtained using different dating methods from the Zhongtiao Mountains

地层	岩石	常规锆石 U-Pb	蒸发 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	单颗锆石 U-Pb	离子探针质谱	Sm-Nd 全岩等时	Rb-Sr 全岩等时
西阳河群许山组	火山岩	1829±17		1826±32	1840±14		1635±6
中条群篦子沟组	火山岩		2104±5	2060±3		2216±29	2088±58
绛县群铜矿峪组	火山岩		2231±5 2139±5 2506±5	2166±26 2571±77②	2155±6	2554±35	2393±11
漭水杂岩中	英云闪长片麻岩 冷口火山岩		2521±3	2321±2 2360±62 2349±20	2333±5	2497±51	2440±43

① 黑体字的方法和年龄是比较可靠的；

② 继承锆石年龄。

探针质谱的岩浆结晶年龄相近,其原因可能是常规锆石样品中以岩浆结晶锆石占绝对优势。

4. 近年来,对全岩等时年龄的原理、方法和地质意义等方面都进行过讨论^[21-25],其中郑永飞(1989)^[26]的文章以 Rb-Sr 等时线法为例做了比较全面的讨论,揭示了等时线方法原理上和数学上可能存在的弊端,指出了视等时线形成的原因以及有关地质作用

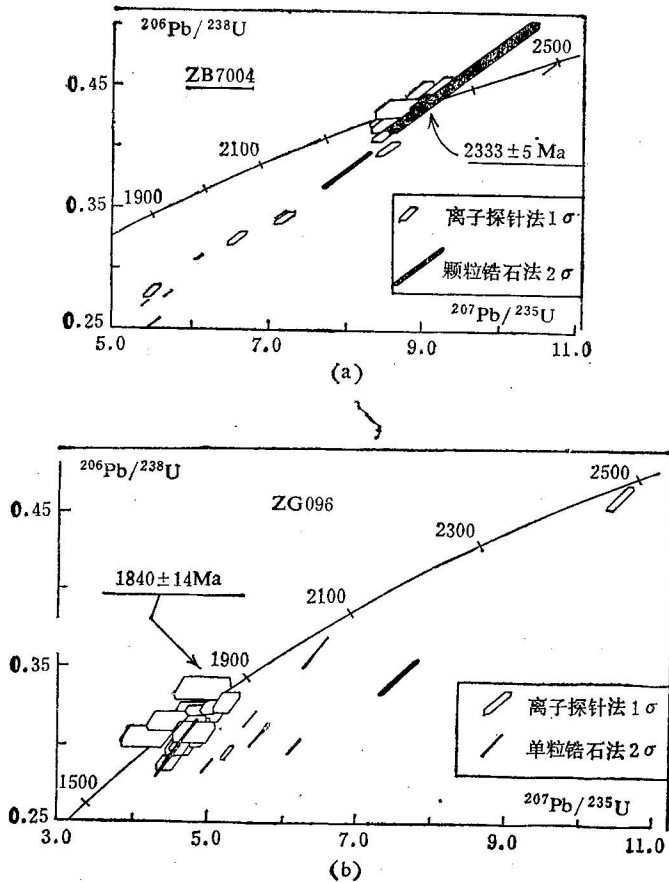


图 2 单颗粒锆石 U-Pb 法和离子探针质谱法所获岩浆年龄的一致性

Fig. 2 Diagrams showing good agreement of magmatic U-Pb ages between Single zircon and ion probe method

图中还显示有老于岩浆年龄的捕获或继承锆石年龄。上图为涑水杂岩中冷口变英安质凝灰岩 (ZB7004) 中锆石; 下图为西阳河群许山组英安斑岩 (ZG096) 中锆石年龄。(据文献[11])

对等时线的影响。表 4 所列的中条山的 Sm-Nd、Rb-Sr 全岩等时线资料表明, 其测点数、回归性和线性都相当好, 但和同岩组甚至同一地点的单颗粒锆石的正确年龄相比 (表 1、表 5), 除了西阳河群许山组火山岩的 Rb-Sr 等时年龄, 可能由于后期热扰动或蚀变出现年龄偏年轻的现象外, 其余 8 条火山岩的等时年龄均老于正确年龄。分析其主要原因有两方面: 一是所有等时线样品均为双峰式火山岩, 包括偏基性的和偏酸性的两组样品, 从成因上说它们是非严格同源的, 因此其初始的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值或初始的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值与 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值可以为近似线性相关, 相当于开始时就已存在一个等时年龄, 这样最终就形成年龄偏老的视等时线。二是由于在岩浆侵位过程中幔源的岩浆受到地壳的岩石混染, 也可以导致初始值具有线性斜率, 从而形成视年龄。从 $\Sigma\text{Nd}_{(T)}$, I_{Sr} 以及火山岩中经常有锆石捕获晶也进一步说明了地壳混染现象的存在。而 Rb-Sr 又低于 Sm-Nd 全岩等时年龄, 其原因可能是区域变质作用并未达到使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比完全均一化

的程度,仍保留有变质前的年龄因素,因此推测是叠加作用所形成的视等时线。所以在这种情况下,不能简单地把 Rb-Sr 年龄当做变质年龄。

综上所述,中条山测年结果表明,单颗锆石 U-Pb 年龄和离子探针质谱年龄,当排除其为继承或捕获锆石年龄的可能性时,应该代表岩浆结晶年龄。常规锆石 U-Pb 年龄,当没有或只有极少量继承或捕获锆石混入时,其年龄才是正确的。单颗锆石蒸发铅法年龄有时也可以取得接近正确的结果。Sm-Nd 和 Rb-Sr 全岩等时年龄由于多为视年龄,解释其地质意义时应该特别当心。从这些不同方法年龄的比较中,我们选择以单颗锆石 U-Pb 年龄和离子探针质谱年龄和其它方法中接近正确年龄的数值为主要依据,来建立中条山前寒武纪年代构造格架。

五、年代构造格架及其地质意义

以中条山北段前寒武纪地层柱和主要地质事件的演化为纵坐标,以国际前寒武纪地层分会所提出的前寒武纪划分方案和年龄为横坐标^[27],用正确年龄标定各种地质事件,从而构成一张中条山早元古代时期年代构造格架图(图 3),这一年代构造格架的地质意义有三个方面:

1. 给出中条山早元古代主要地质演化过程的重要时限。目前中条山地表出露的变质火山岩原岩和一些花岗岩的年龄主要落在 2360—2060Ma 时限范围内。近年来许多地质学家^[3,4,15,28]都提出在 2400—2000Ma 期间,地球上很少发现有岩浆活动的记录,这已成为前寒武纪地质学中引人注意的问题之一。而中条山的精确年代学的研究恰恰在时间上填补了这一“空缺”的位置,这也反映了华北克拉通在时间上的自身演化特点^[29]。

2. 精确年代学的研究明辨了一些重要地质问题。(1) 过去对涑水杂岩的认识有不同的意见:一种意见认为涑水杂岩是古老的太古宙杂岩基底,其上不整合覆盖有绛县群的沉积物(白瑾 1962^[1]);另一种意见认为涑水杂岩中的岩体部分侵入于早元古中条群中^[6,7,30]。涑水杂岩中大包体冷口火山岩(图 1)单颗锆石蒸发铅法年龄为 $2521 \pm 3\text{Ma}$, Sm-Nd 和 Rb-Sr 全岩等时年龄分别为 2497 ± 51 和 $2440 \pm 43\text{Ma}$,这样就很容易把冷口火山岩误认为是太古宙的产物^[1],但是变英安质凝灰岩中单颗锆石 U-Pb 年龄和离子探针质谱的年龄分别为 2360 ± 62 和 $2330 \pm 5\text{Ma}$ 并代表其岩浆结晶年龄,而 2436 和 2508Ma 只是深部带来的捕获锆石年龄。同时变中基性火山岩(ZB7076)用单颗锆石 U-Pb 法也获得 $2349 \pm 20\text{Ma}$ 的岩浆年龄和 2460 及 2590Ma 的捕获锆石年龄,如此之相似,从而解开了这一疑团(表 1, 表 2)。而包围或侵入于冷口火山岩的寨子英云闪长片麻岩中单颗锆石 U-Pb 年龄为 $2321 \pm 2\text{Ma}$,之后还有横岭关花岗闪长岩 $2231 \pm 86\text{Ma}$ 和烟庄花岗岩 $1888 \pm 50\text{Ma}$ 的常规锆石年龄。这样就更进一步说明涑水杂岩中有相当多的元古宙产物。(2) 对绛县群变火山岩经过反复测试证实了其岩浆结晶年龄为 2166 和 2115Ma,而中条群的变火山岩年龄为 2060Ma,这样就有理由推测造成两者之间明显不整合的绛县运动大致发生在 2100Ma。(3) 用单颗锆石 U-Pb 法和离子探针质谱法测得西阳河群许山组酸性火山岩年龄为 $1826 \pm 32\text{Ma}$ 和 $1840 \pm 14\text{Ma}$,这是华北地台的盖层

1) 未出版资料。

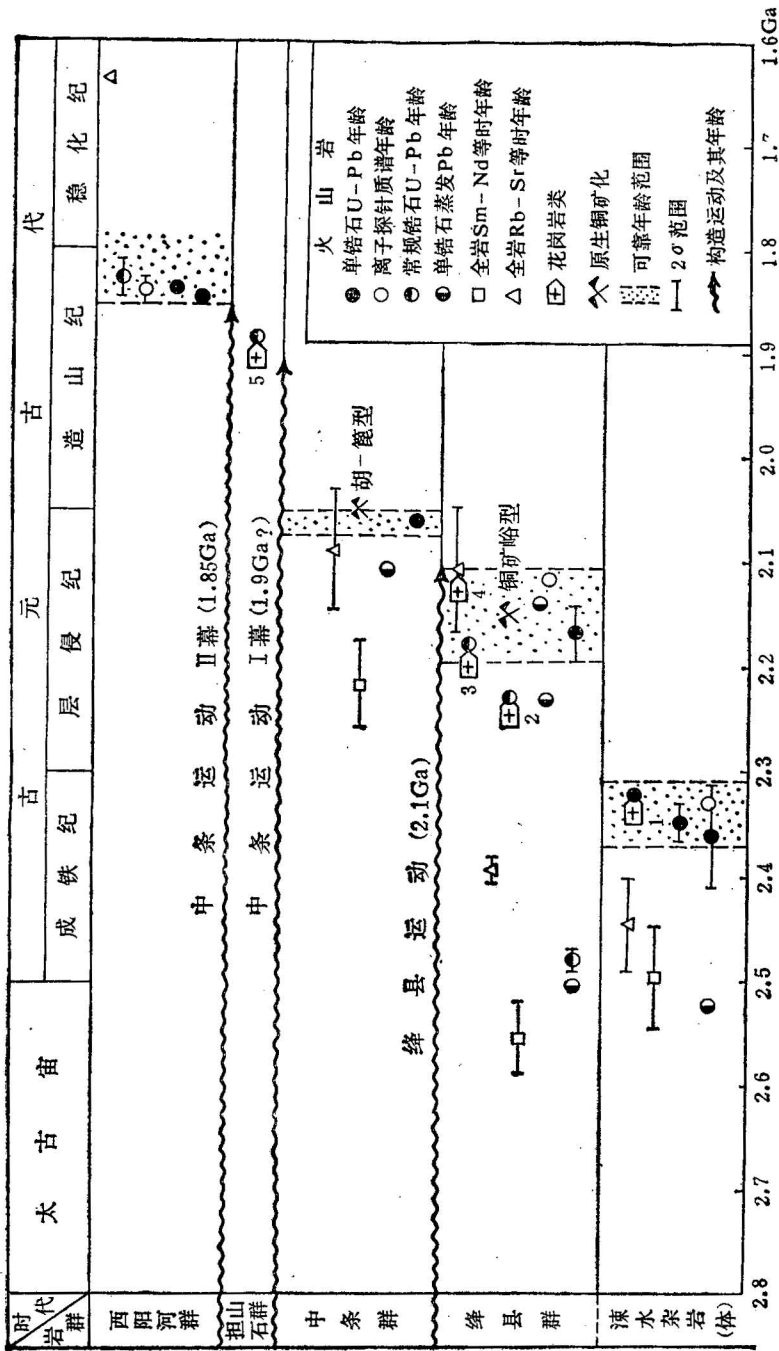


图 3 中条山早元古代构造格架

Fig. 3 Palaeoproterozoic chronotectonic framework of the Zhongtiao Mountains

图中还表示了铜矿成矿期和不同测年方法结果的比较; 1. 寨子英云闪长片麻岩; 2. 横岭关花岗岩; 3. 铜矿峪石英斑岩; 4. 北峪花岗岩; 5. 烟庄花岗岩 (据 [25] 图4, 并有补充和修改)

中最老而又可靠的年龄。这两个年龄对于厘定中条运动终结于 1850Ma, 以及推测中条运动第 I 幕可能发生于 1900Ma 左右都起到重要作用。上述这些新认识, 对今后研究华北地台的演化史将起重要的作用。

3. 把成矿期年龄作为年代构造格架的组成来探讨成矿作用的演化。铜矿峪的变质斑岩型铜矿生成于 2150Ma, 胡家峪-篦子沟型内源沉积-再造型铜矿床原生成矿年龄和赋存于篦子沟变火山岩中的铁矿形成年龄均为 2050Ma 附近。而上述铜矿又均遭受了 1900—1850Ma 中条运动时变质热液的改造, 陶铨 (1985) 用篦子沟矿坑中所取的晶质铀矿及钛铀矿所测定的 U-Pb 一致线上交点年龄为 $1830 \pm 30 \text{Ma}^{[31]}$, 可以解释为中条运动结束时变质或热侵位形成的铀矿。上述铜矿峪型铜矿和胡-篦型铜矿的原生成矿时间与国外显生宙和元古宙同类铜矿也有所不同, 表现为它的成矿时间较早。这些也是华北地台成矿期的特点。

六、研究中条山地壳结构的年代地球化学方法

对中条山除了上述年代学 and 同位素地球化学资料外, 还进行了比较详细的地球化学研究, 包括主要元素和 20 余种微量元素的测定^[10]。这些年代学和地球化学资料, 对于了解深部岩石的年龄、位置、成分和性质等特征可以提供一定的信息, 其中包括有:

1. 单颗锆石 U-Pb 法、离子探针质谱以及蒸发铅法除了取得长英质火成岩中岩浆结晶年龄外, 绝大多数样品中都还获得继承锆石或/和捕获锆石的年龄(表 1, 表 2)。如西阳河群和中条群火山岩中有下伏层位的锆石年龄为 2022—2089Ma 代表中条群的年龄, 2143—2176Ma 则应代表绛县群岩石的年龄, 2338Ma 则为涑水杂岩中部分岩石的年龄。把范围扩大到绛县群, 宋家山群和涑水杂岩岩石则可以明显地看出有大量的继承或捕获锆石年龄在 2449—2590Ma 之间, 而绛县群和宋家山群还具有 2668—2770Ma 之间的捕获锆石。这样就可以明显的看出, 除了地表出露的 1830—2360Ma 的火成岩以外, 深部还有 2450—2600Ma 和 2670—2800Ma 两个时限的长英质岩石。

2. Sm-Nd 法同样可以获得深部岩石年龄信息(表 4)。一般认为亏损源模式年龄—— $T_{DM}^{1)}$ 代表物质从亏损地幔源开始分离出来的时间, 而不管其以后经历什么变化^[32-34]。基性岩一般来自亏损地幔源, 最早分离出的基性岩可保留在深部, 这样 T_{DM} 可以大致指示同源的深部镁铁质岩石年龄。涑水杂岩中冷口火山岩的基性—中基性岩 6 个 Sm-Nd 分析样品所得的 $T_{DM} = 2650—2730 \text{Ma}$, 绛县群铜矿峪 5 件基性火山岩的 $T_{DM} = 2790—3030 \text{Ma}$, 宋家山群绛道沟 6 件基性火山岩的 $T_{DM} = 2810—3040 \text{Ma}$, 中条群篦子沟 3 件基性火山岩的 $T_{DM} = 2580—2610 \text{Ma}$ 。西阳河群许山组 1 个玄武安山岩样品的 $T_{DM} = 3110 \text{Ma}$ 。很明显深部应该有一组年龄大约为 2600—2700Ma 和另一组约为 2800—3100Ma 镁铁质岩石。加上前述的两组长英质岩石年龄, 可以得出深部 4 组有时

$$1) \quad T_{DM} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{\left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_{DM} - \left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_s}{\left(\frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_{DM} - \left(\frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_s} + 1 \right]$$

本文采用 $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{DM} = 0.51325 (\epsilon_{Nd} = +12)$, $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd}) = 0.2168^{[35]}$

序的年龄,即: 2450—2600Ma 长英质 (I), 2600—2700Ma 镁铁质 (II), 2650—2800Ma 长英质 (III) 和 2800—3100Ma 镁铁质 (IV)。它们指示太古宙地壳中的各类岩石生成的大致顺序。

3. 从理论推测和实际观察的早前寒武纪地壳结构模式,自下而上呈现的一般规律为: 下地壳的下部以基性麻粒岩为主,其上为由基性岩部分熔融形成的英云闪长岩; 上地壳可有基性火山岩和由英云闪长岩部分熔化或由沉积物熔化而生成的花岗岩^[36-39]。中条山深部岩石的年龄顺序与形成地壳的一般岩石演化序列是一致的。用微量元素来分析火成岩成因演化已有许多报道。但对于地壳结构模式,除此而外还需要考虑其来源岩石形成的深度和不同深度岩石的地球化学特征。K. C. Condie (1982)^[40], S.R. Taylor 和 S. McLennan (1985)^[41] 指出上地壳和下地壳的大半径阳离子亲石元素 (K.Rb.Th.U 等) 和稀土元素等均有差异。因此它们在岩石中的某些含量或比值可能作为岩石生成或起源深度的指示。一般说来,重熔型酸性火成岩微量元素和同位素地球化学资料可以直接指示深部地壳源岩,而对于来源于地幔的基性岩,只能从岩石演化系列角度来寻找其间标志。本区基性火山岩的稀土元素中的 Sm/Nd , La_N/Yb_N 和 Eu/Eu^* 等 (表 6) 都可以间接说明与铜矿峪和绛道沟同源的早期生成在深部的镁铁质岩石 (IV), 要比与冷口和篦子沟同源的早期生成在深部的镁铁质层 (II) 的深度要大。前者相当于下地壳,而后者可能属上地壳,同时铜矿峪和绛道沟(宋家山)基性火山岩的稀土元素图谱,不相容元素图

表 6 中条山不同基性火山岩的 Sm/Nd , La_N/Yb_N 和 Eu/Eu^* 值及其与上、下地壳的比较^①

Tab. 6 Sm/Nd , La_N/Yb_N and Eu/Eu^* ratio of different basic rocks from the Zhongtiao Mountains and their comparison between upper and lower crust

基性火山岩与地壳	Sm/Nd	La_N/Yb_N	Eu/Eu^*
冷口	0.14—0.19(5)	8.06—12.18(3)	0.90—0.98(3)
篦子沟	0.22—0.24(4)	3.97—5.45(3)	0.61—0.86(3)
铜矿峪	0.22—0.28(4)	2.58(1)	0.95(1)
绛道沟	0.21—0.31(8)	0.58—4.27(4)	0.71—1.10(4)
上地壳	0.17	9.2	0.65
下地壳	0.25	3.8	1.14

① 上、下地壳的平均比值据[41]; 火山岩 Sm/Nd 为同位素稀释法分析; La_N/Yb_N 和 Eu/Eu^* 据中子活化或等离子光谱分析; 括弧内为分析样品数。

谱^[10]以及 ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 值 (表 4) 都十分近似, 也说明其同源的可能性。根据冷口和篦子沟基性火山岩的地球化学特点推测镁铁质 (II) 带为钙碱性岩石, 另外篦子沟地表有相伴喷发的铁质层, 反映岩浆具高铁的特征。区域的西南侧运城附近太古宙岩石中有斜长角闪岩、磁铁角闪片岩和条带铁建造等出露¹⁾, 可能代表镁铁质 (II) 带的特征。根据寨子英云闪长岩、铜矿峪变质酸性火山岩的稀土和大半径阳离子亲石元素 (LILE) 地球化

1) 吕恩茂, 1982, 山西的前寒武系。第 1—264 页, 山西省地质局区域地质调查队。

学特征,可以推测长英质 III 带,主要来源于麻粒岩相的英云闪长岩(紫苏花岗岩)或来源于沉积物的熔融或部分熔融。最上部的长英质(I)带的岩石则以元古宙重熔生成的横岭关花岗岩和烟庄花岗岩为代表,其特征为过铝花岗岩, $K_2O > Na_2O$, 轻重稀土分馏低, 具负铷异常, K/Rb 比值低和 Rb/Sr 比值高, 反映其所处的部位较浅。从 $\Sigma Nd(T)$ 值和 I_{Sr} 值来看, 各期花岗岩和火山岩岩石受地壳混染程度不完全相同。另外一些地球化学特征都显示在深部各层常包含有沉积物。

4. 在中条山的西侧, 在涑水杂岩中出现了相当于深部的太古宙岩石。此外在本区西北侧汾河地堑中在曲沃和稷山附近有上升的古老块体, 甚至有麻粒岩相岩石出露。向北在霍山也有低角闪岩相到高角闪岩相的深部岩石的出露^{[1][42]}。这些地表出露的深部岩石是上述所获得的深部岩石信息的良好佐证。更加充实了年代地壳结构模式的内容和地质依据。

总之, 由单颗锆石的继承和捕获晶年龄和基性岩的 T_{DM} 能分别推测深部酸性岩和基性岩的年龄和年代顺序; 应用岩浆岩的地球化学, 特别是微量元素和同位素地球化学, 可以指示深部岩石特征, 形成深度及其成因; 同时用地表出露的深部岩石来检验这些信息。这种研究深部地质的方法称之为用火成岩年代-地球化学作为岩石圈探针法。

七、年代地壳结构模式及其意义

将上述深部地质信息结合一些概略深部地球物理资料^[43,44]可将中条山元古宙的年代地壳结构模式概括如下(图 4): 最下部镁铁质层(IV ~ 2.8—3.1Ga)主要是基性麻粒岩、片麻岩和紫苏花岗岩, 也有部分副片麻岩, 变质为麻粒岩相; 上覆长英质层(III ~ 2.65—

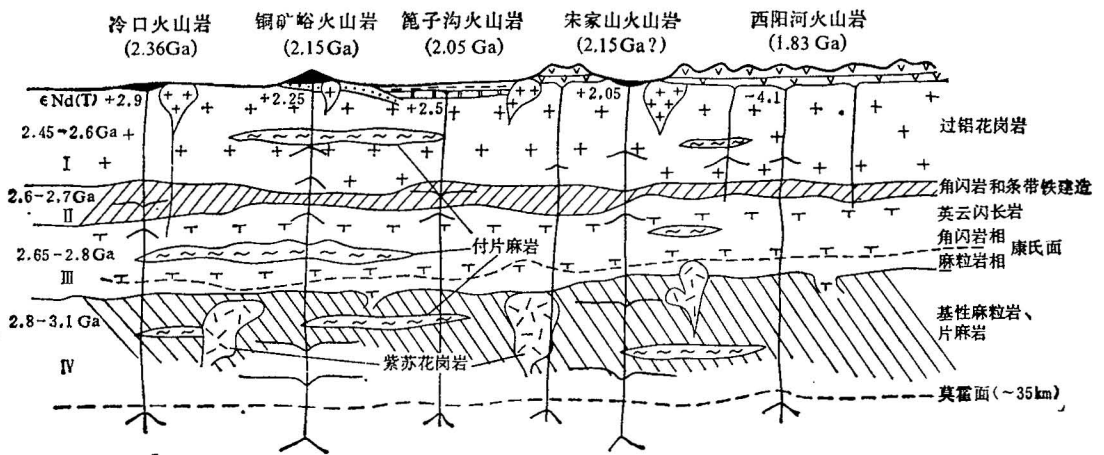


图 4 中条山早元古代年代地壳结构模式。

Fig. 4 Model of Palaeoproterozoic chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. (据 [25] 图 5, 并有修改)

1) 山西地质科学研究所变质地质图编写组, 1984, 山西省变质地质图编图与研究报告。第 1—335 页。

2.8Ga) 推测是由基性岩衍生出来的英云闪长质岩石, 亦有副片麻岩或基性岩包体, 该层下部应有一个麻粒岩相到角闪岩相过渡带, 相当于康氏面; 之上为镁铁质层 (II ~ 2.6—2.7Ga) 由高铁的斜长角闪岩局部夹条带状铁建造组成; 最上部是华北地台太古宙地区经常出现的钾质过铝花岗岩层 (I ~ 2.45—2.6Ga), 也夹副片麻岩等。

这一年代地壳结构模式的意义在于: (1) 它反映了中条山地区前寒武纪时期地壳演化的主要过程, 这些演化特点与华北地台早前寒武纪某些出露区的基本规律大体上是一致的^[49-51], 这些规律包括地壳的成熟度高、沉积物多、年代老的岩石相对变质深, 晚太古代成铁等。从地壳生长方式的角度看, 在中条山或相当的地区用垂直增长的板底垫托 (underplating) 模式来解释更为合适^[49, 51, 52]; (2) 地质演化历史时期的地壳结构对于其构造环境的推断, 越来越显现它的重要意义, 不同的地壳结构制约着不同的构造环境^[53]。中条山前寒武纪年代地壳结构模式所反映的元古宙的构造环境, 火山活动往往和张裂环境有关, 难以出现岛弧环境^[5, 54]; (3) 年代地壳结构模式提供不同岩浆源的时空演化系统及其与成矿作用的内在联系。中条山的某些重要铜 (铁) 矿床并非来自一个岩浆演化系统。这对于指导和扩大找矿很可能具有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Bridgwater, D., Keto, L., McGregor V. R. and Myers, J. S., 1976, Archean Gneiss Complex of Greenland. In A. Escher, W. S. Watt (ed), Geology of Greenland. The Geological Survey of Greenland. pp. 18-75
- [2] Page, R. W., 1988, Geochronology of Early to Middle Proterozoic Fold Belts in Northern Australian. A Review. Precambrian Res. Vol. 40/41, pp. 1-19.
- [3] Hoffman, P. F., 1988, United Plates of America, the Birth of a Craton: Early Proterozoic Assembly and Growth of Laurentia. Ann. Rev. Earth Planet Sci., Vol. 16, pp. 543-603.
- [4] Hoffman, P. F., 1989, Precambrian Geology and Tectonic History of North America. In Bally and Palmer eds: The Geology of North America-An Overview. The Geology of North America, pp. 447-512.
- [5] Cordani, V. G., Teixeira, W., Tassinari, C. C. G., Kawashita, K., Sato, K., 1988, The Growth of The Brazilian Shield, EPISODES, Vol. 11, No. 3, pp. 163-167.
- [6] 王植, 闻广, 1957, 中条山式斑岩铜矿。地质学报, 第 37 卷, 第 4 期, 第 401-415 页。
- [7] 孙大中, 石世民, 1959, 山西省中条山前寒武纪地层及构造。地质学报, 第 39 卷, 第 3 期, 第 305-317 页。
- [8] 中条山铜矿地质编写组, 1978, 中条山铜矿地质。地质出版社, 第 1-190 页。
- [9] 胡维兴, 孙大中, 1987, 中条山早元古代铜矿成矿作用与演化。地质学报, 第 61 卷, 第 2 期, 第 152-165 页。
- [10] Sun Dazhong, Hu Weixing, Tang Min, Zhao Fengqing and Condie, K. C., 1990, Origin of Late Archean and Early Proterozoic Rocks and Associated Mineral Deposits from the Zhongtiao Mountains, East-central China. Precambrian Res., Vol. 43, No. 3/4, pp. 287-306.
- [11] Li Huimin, Page, R. W., Sun Dazhong, Kröner A. W., Zhao Fengqing, Tang Min, 1991, U-Pb Zircon Geochronological Study in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province, China. Precambrian Res. (Submitted).
- [12] Krogh, T. E., 1973, A Low Contamination Method for Hydrothermal Decomposition of Zircon and Extraction of U and Pb for Isotopic Age Determination. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 37, pp. 485-494.
- [13] Krogh, T. E., 1982, Improved Accuracy of U-Pb Ages by the Creation of More Concordant Systems Using an Air Abrasion Technique. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 46, pp. 637-649.
- [14] Compston, W., Williams, I. S. and Myer, C., 1984, U-Pb Geochronology of Zircons from Lunar Breccia 73217 Using a Sensitive High Mass-resolution Ion Microprobe. Journal of Geophys. Res. Vol. 89, Supplement, pp. 525-534.
- [15] Kröner, A., Sun Dazhong, Hu Weixing and Todt, W., 1989, An Early Proterozoic Copper-bearing Magmatic Arc in North-Central China. TERRA Abstract, Vol. 1, pp. 21.

- [16] Kober, B., 1986, Whole-grain Evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Investigations on Single Zircons Using a Double-filament Ion Source. *Contrib. Mineral Petrol.*, Vol. 93, pp. 337—347.
- [17] Kober, B., 1987, Single Zircon Evaporation Combined with Pb^+ Emitter Bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age investigations Using Thermal Ion Mass Spectrometry, and Implications to Chronology. *Contrib. Mineral. Petrol.* Vol. 96, pp. 63—71.
- [18] 刘敦一, 赵敦敏, 1988, 用热离子发射质谱计测定单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. 地质论评, 第34卷, 第6期, 第496—505页.
- [19] Allègre, C. J., Albarede, F., Grunfelder M. and Kopple, V., 1974, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ — $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ — $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$, Zircon Geochronology in Alpine and Non-Alpine Environment. *Contrib. Mineral. and Petrol.* Vol. 43, pp. 163—194.
- [20] 孙海田, 葛朝华, 1990, 中条山式热液喷气成因铜矿床. 北京科学出版社, 第1—134页.
- [21] Chauvel C., Durpe B. and Jenner, G. A., 1985, The Sm-Nd Age of Kambalda Volcanics is 500Ma too old. *Earth Planet. Sci., Lett.* Vol. 74, pp. 315—324.
- [22] Claoué-Long J. C., Compston W. and Cowdan, A., 1988, The Age of the Kambalda Greenstones Resolved by Ion-microprobe: Implications for Archean Dating Methods. *Earth Planet Sci. Lett.* Vol. 89, pp. 239—259.
- [23] Bridgwater D., Rosing, M., Schiøtte L. and Austrheim, H., 1989, The Effect of Fluid-controlled Element Mobility During Metamorphic on Whole Rock Isotopes: Examples. In Bridgwater ed: *Fluid Movements-Element Transport and the Composition of the Deep Crust.* Kluwer Acad. Pub., pp. 277—298.
- [24] 江博明, 1989, 太古代岩石的定年方法和局限性的讨论. 地球化学, 1989年, 第二期, 第103—119页.
- [25] 孙大中, 1990, 前寒武纪地质年代学问题的讨论. 中国区域地质, 1990年, 第4期, 第289—300页.
- [26] Zheng Y. F., 1989, Influence of the Nature of the Initial Rb-Sr System on Isochron Validity. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, Vol. 80, pp. 1—16.
- [27] Cowie J. W., Ziegler W. and Remane, J., 1989, *Stratigraphic Commission Accelerate Progress, 1984 to 1989. Episodes*, Vol. 12, No. 2, pp. 79—83.
- [28] Condie K. C., 1988, Description, No. 217-Proterozoic Geochemistry, *Geological Correlation*, Vol. 16, pp. 51—52.
- [29] 孙大中, 1991, 中国前寒武纪地壳研究及其在地质战略上的意义. 地质科技管理, 第一期, 第18—23页.
- [30] 赵凤清, 林源贤, 李惠民, 周慧芳, 孙大中, 1990, 山西省中条山北部凉水杂岩地质年代和地质的新证据. 山西地质, (印刷中).
- [31] 陶铨, 1985, 中条山地区前寒武纪地层的时代. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 第12期, 第29—38页.
- [32] Depaolo, D. J., 1981, Neodymium Isotopes in the Colorado Front Range and Crust-mantle Evolution in Proterozoic. *Nature*, Vol. 291, pp. 193—196.
- [33] Depaolo, D. J., 1988, *Neodymium Isotope Geochemistry, An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1—187.
- [34] Jahn, B. M., Zhou, X. H., and Li, J. L., 1990, Formation and Tectonic Evolution of Southeast China: Isotopic and Geochemical Constraints. In Angelier ed: *Geodynamic Evolution of the Eastern Eurasian Margin Tectonophysics*, Vol. 183, pp. 145—160.
- [35] Jahn, B. M., Auvray, B., Cornichet, J., Bai, Y. L., Shen Q. H. and Liu, D. Y., 1987, 3.5Ga Old Amphibolites from Eastern Hebei Province, China: Field Occurrence, Petrography, Sm-Nd Isochron Age and REE Geochemistry. *Precambrian Res.* Vol. 34, pp. 311—346.
- [36] Fountain, D. M., Salisbury, M. H., 1981, Exposed Cross-sections through the Continental Crust: Implication for Crustal Structure, Petrology and Evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* Vol. 56, pp. 263—277.
- [37] Percival, J. A. and Fountain, D. M., 1989, Metamorphism and Melting at an Exposed Example of the Conrad Discontinuity, Kapuskasing Uplift, Canada. In Bridgwater ed., *Fluid Movements-Element Transport and the Composition of the Deep Crust.* Kluwer Acad. Pub., pp. 51—60.
- [38] West, G. F., 1980, Formation of Continental Crust. In Strangway ed: *The Continental Crust and its Mineral Deposits.* Geological Association of Canada, Special Paper 20, pp. 117—148.
- [39] Jahn, B. M., Auvray, B., Shen, Q. H., Liu, D. Y., Zhang, Z. Q., Dong, Y. J., Ye, X. J., Zhang, Q. Z., Cornichet J. and Mace, J., 1988, Archean Crustal Evolution in China: The Tianshan Complex, and Evidence for Juvenile Crustal Addition from Long-term Depleted Mantle. *Precambrian Res.* Vol. 38, pp. 381—403.
- [40] Condie, K. C., 1982, *Plate Tectonics and Crustal Evolution (2nd Edition)*. Pergamon Press, New York, pp. 1—310.
- [41] Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Black-

- well. Sci. Pub., Oxford. pp. 1—312.
- [42] 梁英芳, 齐元荣, 1988, 山西前长城纪变质作用. 山西地质, 第3卷, 第4期, 第335—356页。
- [43] 国家地震局深部物探成果编写组, 1986, 中国地壳上地幔地球物理探测成果. 地震出版社, 1—407页。
- [44] 赵善付, 1988, 山西省深部构造及其成矿关系初探. 山西地质, 第3卷, 第3期, 255—266页。
- [45] Sun Dazhong and Wu Changhua, 1981, The Principal Geological and Geochemical Characteristics of the Archean Greenstone-gneiss Sequences in North China. *Spec. Publs, Geol. Soc. Aust.*, Vol. 7, pp. 121—132.
- [46] 孙大中主编, 1984, 冀东早前寒武地质. 1—273页, 天津科学技术出版社。
- [47] Cheng Yuqi, Sun Dazhong and Wu Jishan, 1984, Evolutionary Mega-Cycles of the Early Precambrian Proto-North China Platform. *Journal of Geodynamics*. Vol. 1, pp. 251—277.
- [48] 孙大中, 陆松年, 1987, 华北地台的元古宙构造演化. 中国地质科学院院报, 第16号, 55—69页。
- [49] Sun Dazhong, 1989, Tectonic and Geochemical Development of Archean and Proterozoic Mobile Belts in Eastern China. *Progress in Geoscience of China (1985—1988)*, Vol. 111. pp. 131—134.
- [50] 董申保, 沈其韩, 孙大中, 卢良兆主编, 1988, 1:400万中国变质地质图及说明书. 地质出版社。
- [51] 马杏垣, 白瑾, 索书田, 劳秋元, 张家声, 1987, 中国前寒武纪构造格架及研究方法. 地质出版社, 1—130页。
- [52] Ewart, A., Baxter, K., Ross, J. A., 1980, The Petrology and Petrogenesis of the Tertiary Anorogenic Mafic Lavas of Southern and Central Queensland, Australia—Possible Implications for Crustal Thickening. *Contrib. Mineral Petrol.* Vol. 75, pp. 129—152.
- [53] Dewey, J. F., 1986, Diversity in the Lower Continental Crust. In Dawson et al. (eds), *The Nature of the Lower Continental Crust*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, No. 24, pp. 71—78.
- [54] Jia Chengzhao, 1987, Geochemistry and Tectonics of the Xionger Group in the Eastern Qinling Mountains of China—A Mid-Proterozoic Volcanic Arc Related to Plate Subduction. In Pharach et al. (eds), *Geochemistry and Mineralization of Proterozoic Volcanic Suites*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, No. 30, pp. 437—448.

PRECAMBRIAN GEOCHRONOLOGY, CHRONOTECTONIC FRAMEWORK AND MODEL OF CHRONOCRUSTAL STRUCTURE OF THE ZHONGTIAO MOUNTAINS

Sun Dazhong, Li Huimin, Lin Yunxian,
Zhou Huifang, Zhao Fengqing and Tang Min
(*Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, Tianjin*)

Abstract

Five bimodal volcanic successions and five granitic rocks of the Zhongtiao Mountains have been dated by single zircon U-Pb, ion microprobe, single zircon Pb-evaporation, conventional zircon U-Pb and Sm-Nd and Rb-Sr whole-rock isochron methods, and 55 age data have been obtained for these rocks. This combined isotopic study has enabled us to compare the reliability of the six methods as well as to constrain the age of chronotectonic framework. The results show good concordance between single zircon U-Pb and ion microprobe methods. The combination of these precise zircon U-Pb ages and a few of reliable Rb-Sr whole-rock isochron ages representing geological events permits constructing a perfect chronotectonic framework of the mobile belts and defining the ages of the Jiangxian movement (2100 Ma) and Zhongtiao movement (1900—1850 Ma). The age of 1850 Ma is a benchmark for division between the basement and cover for the North China Craton. It is particularly interesting that the ages of igneous rocks and their associated copper deposits fall in a time span (2400—2000 Ma) during which global magmatic records are lacking.

Xenocrystal and inherited zircon U-Pb ages for the abovementioned igneous rocks can be

usually obtained by the three single zircon U-Pb methods that might constrain the age of felsic rocks at depths. The Nd model age (T_{DM}) of basic rocks can be used to infer the age of initial separation of deep mafic rocks from depleted mantle. The characteristics of deep rocks and their positions can be studied by major and trace elements and Nd and Sr isotopic geochemistry. This comprehensive study is called a probe for the lithosphere using igneous rocks and it can give a model of chronocrustal structure of the mobile belt, which has been proved by geological observation from surrounding high-grade terrains.

作者简介

孙大中, 1932年出生, 1955年毕业于北京地质学院。现任中国地质科学院天津地质矿产研究所研究员, 同位素地质研究室主任, 中国地质学会前寒武纪地质专业委员会主任委员。长期从事前寒武纪地质学和地球化学等研究。通讯地址: 天津市河东区大直沽8号路4号天津地质矿产研究所; 邮政编码: 300170。