

97-110

碧口地体同位素地质年代学及其意义

秦克令 何世平 宋述光

(中国地质科学院西安地质矿产研究所, 西安, 710054)

p597

内容摘要 碧口群分布于陕、甘、川交界处摩天岭区, 为一套海相火山-沉积岩系, 变质可达绿片岩相。它呈东宽西窄的楔形地体分布于扬子板块、松潘-甘孜褶皱系与秦岭褶皱系等三个一级大地构造单元之间, 均以断裂相接, 是一个中晚元古代运移地体, 于晋宁运动晚期拼贴于扬子板块北缘。笔者用锆石 U-Pb 及 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等多种同位素地质定年方法, 对碧口地体主要成岩时代、变质时代、中酸性岩侵入时代及构造运动时代等主要地质事件进行了定年研究, 初步建立了碧口群同位素地质年表, 为研究碧口地体构造演化提供了重要的同位素地质年代数据。

关键词 碧口地体 地质事件 同位素地质定年

地质年代学 碧口群

“七五”期间, 笔者对碧口地体主要地质事件进行了定年研究, 并初步建立了该区的同位素地质年表。

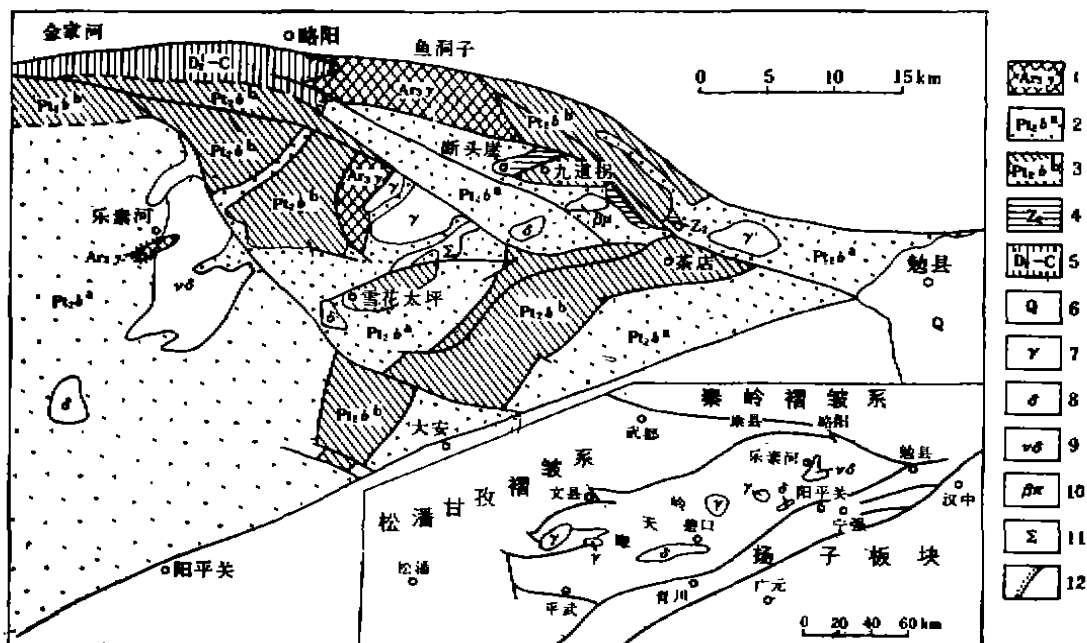


图 1 陕、甘、川交界处摩天岭区东部(勉略宁区)地质略图

Fig.1 Geological sketch map of eastern Motianling area (Mian-Lue-Ning) of the juncture of Shaanxi, Gansu and Sichuan Provinces

1. 鱼洞子群; 2. 碧口群下亚群; 3. 碧口群上亚群; 4. 上震旦统含磷酸盐岩系; 5. 中泥盆统一石炭系; 6. 第四系; 7. 花岗岩; 8. 闪长岩; 9. 辉长闪长岩; 10. 蚀变辉绿岩; 11. 超基性岩; 12. 地層不整合界線

收稿日期: 1992-04-15. 李纪良编辑。

第一作者简介: 秦克令, 男, 生于1937年, 1962年毕业于长春地质学院, 副研究员, 从事同位素地质及区域矿产研究。

1 碧口群同位素地质年表的建立

碧口群为一套巨厚的海相火山-沉积岩系地层,变质可达绿片岩相,分布于陕、甘、川交界处的摩天岭区(图1),已有40余年的研究历史。它以东宽西窄的楔形地体嵌于扬子板块、松潘—甘孜褶皱系和秦岭褶皱系等3个一级大地构造单元之间,均以大断裂为界。由于地质构造复杂、缺少生物化石等原因,其层序、时代问题一直没有解决。60年代初出版的1:20万碧口幅与略阳幅在宝鸡—成都铁路沿线的接图部位上,地质界线相接较好,但地层时代不同。同一套碧口群火山岩系,在略阳幅定为下元古代,而碧口幅则定为下古生代。对碧口群总体构造形态的认识分歧也较大。甘肃的地质工作者认为碧口群的最下部层位分布在陕西境内,而陕西的则认为分布在甘肃境内。因此甘、陕两省地质工作者所建立的地层层序矛盾较大。上述表明,碧口群研究的主要矛盾是地质构造事件的确认及其准确定年问题。笔者研究了碧口群的总体构造形态,找到了碧口群的古老基底,剥开了碧口群的上覆构造层,重新划分厘定了碧口群,将广义的碧口群解体为3部分:下伏基底——晚太古代鱼洞子群^[1,2,3,4],中元古代碧口群(狭义);上覆上震旦统一寒武统。对上述3个构造层的沉积建造、变质建造及岩浆建造中保存有各种地质事件记录的地质体进行同位素地质定年研究,获得碧口群地质年表如表1所示

2 锆石U-Pb年代学与碧口群老基底的发现

以一坝河片理化砾岩中选获的锆石所测得的2280 Ma^[5]年龄值为线索,发现了碧口群的古老基底——晚太古代鱼洞子群。

2.1 一坝河片理化砾岩提供的年代信息

陕西省地矿局第二地质队研究勉县茶店北一坝河地区碧口群上亚群底部片理化砾岩的含金性时,把砾岩进行全岩碎样,在淘选金矿的同时也选出了锆石(砾石及胶结物中的锆石),经咸阳核工业部203所进行锆石U-Pb同位素年龄测定(单点锆石U-Pb测定),获2280 Ma年龄值。

被测锆石样代表了砾岩沉积来源区所有母岩的综合年龄^[6],说明一坝河砾岩沉积时物质来源区老地层较多。经岩石薄片研究,发现砾岩的砾石及胶结物中均有锆石。而砾石中的锆石主要产于混合花岗岩的砾石中,均为浑圆状,浅紫玫瑰色。追索该砾岩的接触关系,发现其不整合于碧口群下亚群变质火山岩系之上。砾岩向上与含叠层石白云岩系为过渡关系。从剖面的岩性特点、叠层石化石属种组合及不整合接触关系可知,该套地层应相当于碧口群上亚群。此砾岩的砾石成分复杂,有变质火山岩、混合花岗岩及磁铁石英岩等砾石。在碧口地体东部的勉略宁区,所有含叠层石白云岩系均不整合覆于碧口群下亚群变质火山岩系之上。可以推断,一坝河砾岩沉积时的物源区普遍分布有变质火山岩、混合花岗岩及磁铁石英岩等老地层,其总体年龄的平均值约为2200 Ma。

表1 碧口群地质年表

Tab. 1 Chart of geologic time of the Bikou Group

代	纪	地方性名称	主要岩性	地质时代(Ma, 本文测定)		
				成岩	变质	侵入岩
元 古 代	古生代	干沟组	含炭板岩、硅质岩夹白云岩透镜体。见海綿骨针、三叶虫须刺	551±20		
	晚元古代	临江组	白云岩、硅质条带白云岩、微晶灰岩、硅质灰岩、下部夹粉砂板岩及硅质条带灰岩			
	中元古代	碧口群	上岩组 含叠层石白云岩(Pt ₂ b ^{b-2}) 下岩组 海相火山碎屑岩, 重力流相(Pt ₂ b ^{b-1})	1 565±16	1 044±22	
			上岩组 海相火山碎屑岩、重力流相(Pt ₂ b ^{a-3})			
			中岩组 海相火山岩(Pt ₂ b ^{a-2})			
			下岩组 海相火山碎屑岩(Pt ₂ b ^{a-1})			
	早元古代					
晚太古代		鱼洞子群	斜长角闪岩、浅粒岩、绿泥阳起片岩、阳起磁铁矿石岩、干枚状浅粒岩、条带状磁铁矿石岩、混合岩化斜长角闪岩、混合岩化浅粒岩、条带状角闪混合岩	2 657±9		2038±30

2.2 碧口群古老基底的发现

分析区域地质资料, 在略阳东鱼洞子—阁老岭地区有混合花岗岩, 并产有鱼洞子大型磁铁矿石岩型铁矿床。经过调研及岩石薄片研究, 在鱼洞子混合岩化碎裂斜长角闪岩中选获的锆石测得 2657 ± 9 Ma 的锆石 U-Pb 年龄值, 发现了鱼洞子群——晚太古代绿岩建造。但鱼洞子群四周均以断层与碧口群接触, 二者层序关系不能确定。在 1:20 万略阳幅地质图上还有几处混合岩化地区, 从中选择宝一成铁路线上的乐素河地区进行调查, 以解决鱼洞子群与碧口群的接触关系。经调查, 终于在乐素河火车站对面(嘉陵江东岸)找到了鱼洞子群混合岩化英云闪长岩(片麻理发育), 并发现其上不整合有碧口群变质火山岩系。证实了晚太古代鱼洞子群为碧口群的古老基底。

2.3 鱼洞子群时代的确定

鱼洞子群为古老的绿岩建造, 均以小陆核状产出。其中最大的一块分布于碧口地体东部的勉略宁区, 位于略阳县阁老岭—鱼洞子一带, 出露面积约 200 km², 可分 4 个岩组, 总厚

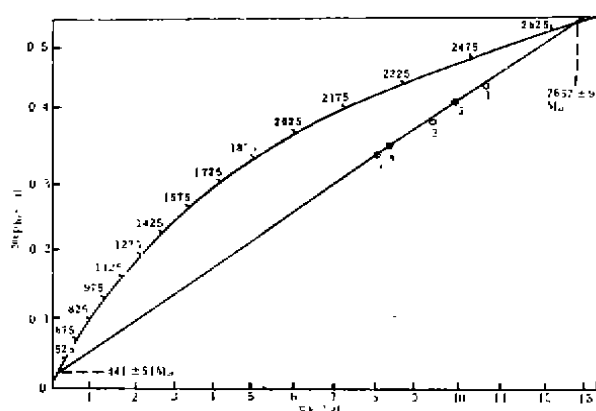


图 2 鱼洞子群斜长角闪岩中锆石 U-Pb 一致
曲线图解

Fig.2 Zircon U-Pb concordia diagram for the plagioclase amphibolite of the Yudongzi Group

度大于 1 600 m, 主要岩性为斜长角闪岩、浅粒岩、绿泥阳起片岩、阳起磁铁矿石岩、千枚状浅粒岩、条带状磁铁矿石岩、混合岩化斜长角闪岩、混合岩化浅粒岩和条带状角闪混合岩等。在二岩组混合岩化碎裂斜长角闪岩中选获锆石, 由地矿部宜昌地矿所进行锆石 U-Pb 同位素年龄测定。锆石均为非磁性组, 按粒级不同分为 5 组, 分别提取其中的铀和铅, 然后用 MAT-260 质谱计测定 U、Pb 含量及同位素丰度比值(表 2), 用谐和图法获上交点年龄为 $2\,657 \pm 9\text{ Ma}$ (图 2), 为鱼洞子群主期变质年龄, 下交点为 $441 \pm 51\text{ Ma}$, 为后期改造年龄。

2.4 锆石成因讨论

表 2 U-Pb同位素地质年龄试测数据表
Tab. 2 U-Pb isotopic age data of zircons

样品原始编号			86PaT ₂			实验编号			286085							
点 号	样品量 (mg)	粒度 (μm)	磁性	放射成因 铅含量 (×10 ⁻⁶)	铀含量 (×10 ⁻⁶)	208Pb		放射成因铅组成			同位素原子素			表面年龄(Ma)		
						208Pb	204Pb	206Pb	207Pb	208Pb	207Pb 206Pb	206Pb 238U	207Pb 235U	207Pb 206Pb	206Pb 238U	207Pb 235U
1	10.40	>150目	无	62.47	130.1	3500	48.82	8.639	5.214	0.1777	0.4351	10.608		2328	2489	
2	6.11	>200目	无	66.74	146.6	4000	52.28	9.218	5.249	0.1763	0.4151	10.043		2238	2439	
3	4.67	>300目	无	85.90	201.6	800	67.70	11.93	6.272	0.1762	0.3908	9.452		2127	2383	
4	2.99	<400目	无	139.2	366.2	1400	112.8	19.46	6.882	0.1725	0.3588	8.4903		1976	2285	
5	2.54	>400目	无	125.9	338.3	1200	101.7	17.52	6.765	0.1722	0.3499	8.2707		1934	2261	

注: 1. 谐和线年龄值, 上交点年龄值 $2657 \pm 9 \text{ Ma}$, 下交点年龄值 $441 \pm 51 \text{ Ma}$.

2. 地矿部宜昌地质矿产研究所测试。

所选锆石均为浅紫玫瑰色,多呈浑圆状,普遍具有熔蚀痕迹;个别尚有完好晶形,其长宽比约为2:1。对其成因,有人认为是沉积搬运造成的浑圆状,其原岩——斜长角闪岩为副变质成因,所获2657±9 Ma年龄值不代表鱼洞子群主期变质年龄,而是代表鱼洞子群沉积时被剥蚀的母岩区的混合年龄。针对这一问题,笔者用双目镜、反射扫描电子显微镜及电子探针等研究了被测锆石的表面特征,发现浑圆状锆石表面普遍发育有沟、槽、坑等熔蚀痕迹。说明锆石并非因沉积搬运被磨成浑圆状,而是受混合岩化熔蚀造成的表面熔蚀结构。

从同位素数据本身亦能说明锆石不是碎屑成因的。谐和图上的锆石样点，大颗粒点排布在不一致线的上方，小颗粒点依次在下，说明大颗粒样丢失的放射性铅较少，小颗粒丢失的较多，但它们都排布在一条直线（不一致线）上，线性关系非常好，说明混合岩化改造

没有破坏锆石同位素的均一性, 也说明被测锆石是达到了同位素均一化的, 具有同一成因的锆石, 而不是陆源搬来的碎屑锆石。锆石颗粒大小的不同, 说明锆石被熔蚀的程度不同, 颗粒越小被熔蚀的越强。但不管锆石被熔蚀的强或弱, 都不会破坏锆石同位素的均一性, 也说明锆石是在同一物理化学条件下生成的, 是同成因的变晶锆石, 而不是复成因的沉积搬运来的锆石。因此也说明锆石赋存的岩石——混合岩化碎裂斜长角闪岩是正变质岩, 是由基性火山岩变质而来, 经野外及室内研究发现, 斜长角闪岩中有细碧角斑岩之变质残留体^[8], 锆石 U-Pb 的 2657 ± 9 Ma 年龄值代表了鱼洞子群的主期变质年龄, 其成岩年龄要更老一些。我组采样, 由中国地质科学院地质所对侵入鱼洞子群的角闪岩脉进行测定, 获得全岩 K-Ar 稀释法年龄为 2038 ± 30 Ma (表 3), 代表了鱼洞子结晶地体克拉通化完成的时间。测试和计算结果如下:

样号: 87 P₃₀B₂ 实验号: 88136/4
 样品的 40/38 值 = $1465740/2101320 = 0.69753297927$
 样品的 38/36 值 = $2101320/238.461 = 8812.00599485$
 稀释剂 40/38 值: 0.00420311
 稀释剂 36/38 值: 0.000014534
 样品重量 = 0.02986 gm
 K 重量 (g) = 0.000071664 gm
⁴⁰K 莫尔数 = $2.13892296675 \text{ E}-10 \text{ moles}$
 每克样品中 ⁴⁰K 的莫尔数 = $7.16317135549 \text{ E}-09 \text{ moles/gm}$
 稀释剂中的 ³⁸Ar 含量 = $7.07193894104 \text{ E}-11 \text{ moles}$
⁴⁰Ar 总量 = $4.93291063876 \text{ E}-11 \text{ moles}$
 放射性 ⁴⁰Ar = $4.69644851799 \text{ E}-11 \text{ moles}$
 放射性 ⁴⁰Ar% = 95.2064381845%
 每克样品中的放射性 ⁴⁰Ar 含量 = $1.57282267850 \text{ E}-09 \text{ moles/gm}$
 放射性 ⁴⁰Ar/⁴⁰K = 0.219570718114
 常数: $\lambda e = 0.581 \text{ E}-10/\text{y}$
 $\lambda\beta = 4.982 \text{ E}-20/\text{y}$
⁴⁰K/K = 1.167 E-4
 年龄值: $2037.97 \pm 29.74 \text{ Ma}$

3 碧口地体上覆构造层的 Rb-Sr 法定年

碧口地体为一裂解运移地体, 呈一古老隆起, 在晋宁运动晚期拼贴于扬子板块北缘, 其后则进入后地体构造演化阶段。它的第一个上覆层为上震旦统一寒武统, 均分布于碧口地体的周边地区。在其西北缘的甘肃文县—康县地区上震旦统称为临江组, 下寒武统称为干沟组, 二者为连续沉积。上震旦统不整合覆于碧口群之上。干沟组主要为含炭板岩、硅质岩夹白云岩透镜体。下部发现海绵骨针及三叶虫颊刺。临江组主要为白云岩、硅质条带白云岩、微晶灰岩、硅质灰岩, 下部夹粉砂板岩及硅质条带灰岩。在甘肃临江一带的临江组与干沟组界线上采样, 用全岩 Rb-Sr 等时线法测定获 561 ± 20 Ma 年龄值 (图 3, 表 3), 此年龄值比较接近《中国同位素地质年表》^[8] 给出的三峡震旦系灯影组顶界年龄 (600 ± 10 Ma)。证实

了碧口地体上覆层为上震旦统一寒武统。

表 3 甘肃文县干沟组(E_1)/临江组(Z_2)Rb-Sr数据表

Tab. 3 Result of Rb-Sr dating of Gangou Formation(E_1)/Linjiang Formation(Z_2) in Wenxian, Gansu

样号	岩石名称	^{87}Sr	^{87}Rb	$\text{Rb}(\times 10^{-6})$	$\text{Sr}(\times 10^{-6})$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
P ₂₂ T ₄	微晶灰岩	0.225604	0.105164	32.4964	200.6868	0.4661	0.712595
P ₂₂ T ₁₀	微晶灰岩	0.394391	0.010085	3.1164	350.8320	0.0256	0.709335
P ₂₃ T ₁	硅质灰岩	0.200528	0.072680	22.4585	178.3803	0.3624	0.712304
P ₂₃ T ₃	微晶灰岩	0.021715	0.010580	3.2692	19.3167	0.4872	0.713572
P ₂₃ T ₆	硅质灰岩	0.322509	0.012066	3.7282	286.8891	0.0374	0.709458
P ₂₃ T ₈	硅质灰岩	0.070380	0.074335	22.9700	62.6068	1.0562	0.717612
P ₂₃ T ₉	硅质岩	0.028373	0.006929	2.1413	25.2393	0.2442	0.711438
P ₂₃ T ₁₂	硅质岩	0.124516	0.010182	3.1462	110.7638	0.0818	0.709495
P ₂₃ T ₁₆	硅质岩	0.417090	0.005717	1.7665	371.0243	0.0137	0.709488
P ₂₄ T ₇	灰岩	0.242677	0.063689	19.6802	215.8739	0.2624	0.711312
P ₂₄ T ₈	灰岩	0.149108	0.013298	4.1090	132.6397	0.0892	0.710241
斜率	误差	初始比		误差	年龄(Ma)	误差(Ma)	相关系数
0.007999	0.000284	0.709258		0.000117	561.09	20.03	0.994360

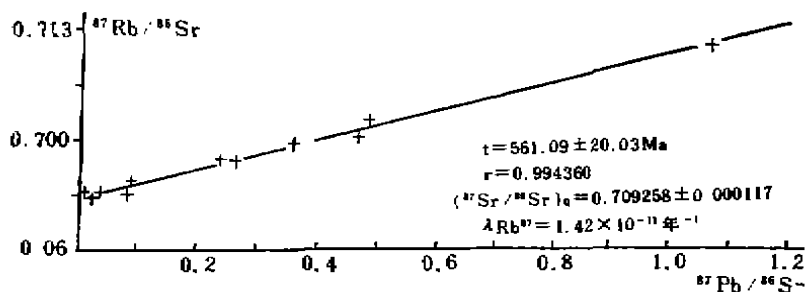


图 3 甘肃文县冷堡子干沟组(E_1)/临江组(Z_2)界线铷-锶等时线图

Fig.3 Rb-Sr isochronic line diagram for the boundary of Gangou Formation(E_1)/Linjiang Formation(Z_2) of Wenxian, Gansu

4 碧口群的时限

本文所划分的碧口群分上、下两个亚群^[3], 下亚群为细碧角斑岩-沉积岩系, 在碧口地体全区均有分布; 上亚群为含叠层石白云岩系(下部为片理化凝灰质砂砾岩), 只分布在碧口地体东部的勉略宁地区。

碧口群下亚群分上、中、下3个岩组, 在上岩组的板岩、凝灰质板岩中采获自生黄铁矿(采样地点为甘肃文县秧田坝, 为碧口群复式向斜的中心部位), 由中科院贵阳地化所戴植谟测得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄值为 1565 ± 16 Ma, 这一年龄值基本代表了碧口群下亚群上岩组的成岩年龄。该地区被测定地层之下的碧口群下亚群中、下岩组, 主要为细碧-角斑岩及其同质的

凝灰质岩石, 厚10 000余米。通过大区地层对比^[8], 认为碧口群下亚与群华北地区长城系相当。根据所测定的 1565 ± 16 Ma 年龄值, 结合碧口群沉积特点、总体构造形态、接触关系等推断其时限为1 800—1 400 Ma。

碧口群上亚群主要分布于宝一成铁路以东的勉略宁区, 与碧口群下亚群细碧—角闪岩系呈角度不整合(局部见平行不整合)接触, 其底部岩性为一套由砾岩、砂岩和板岩组成的浊积物, 其上部为含叠层石的厚层白云岩, 二者过渡部位的锰矿层中产出有区域变质生成的蔷薇辉石。我组采样, 由中国地质科学院地质所罗修泉用 K-Ar 稀释法测定该蔷薇辉石, 结果获 1044 ± 22 Ma 的年龄值, 测试和计算如下:

样号: 87P38B₂ 实验号: 88136/4

样品的40/38值 = $942830/2066530 = 0.456238235109$

样品的38/36值 = $2066530/692.688 = 2983.34892477$

释稀剂的40/38值 = 0.00420311

释稀剂的36/38值 = 0.000014534

样品重量 = 0.18048 gm

K重量(g) = 0.0001046784 gm

^{40}K 莫尔数 = $3.12428881841 \text{ E}-10 \text{ moles}$

每克样品中 ^{40}K 的莫尔数 = $1.73109974424 \text{ E}-09 \text{ moles/gm}$

释稀剂中的 ^{39}Ar 含量 = $7.18595402926 \text{ E}-11 \text{ moles}$

^{40}Ar 总量 = $3.27850698388 \text{ E}-11 \text{ moles}$

放射性 ^{40}Ar = $2.56739307372 \text{ moles}$

放射性 $^{40}\text{Ar}\%$ = 78.3098247569%

每克样品中放射性 ^{40}Ar 含量 = $1.42253605592 \text{ E}-10 \text{ moles/gm}$

放射性 $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ = $8.21752796538 \text{ E}-02$

常数 λ_e = $0.581 \text{ E}-10/\text{y}$

$\lambda\beta$ = $4.962 \text{ E}-10/\text{y}$

$^{40}\text{K}/\text{K}$ = $1.167 \text{ E}-4$

年龄值: $1044.21 \pm 22.27 \text{ Ma}$

从碧口群绿片岩相变质与碧口古火山岛弧碰撞造山关系密切这一点考虑, 认为 1044 ± 22 Ma 的区域变质年龄接近于碧口群上亚群的成岩年龄。通过大区对比, 认为碧口群上亚群与华北地区蔚县系相当, 其时限大致为 1 400—1 000 Ma。

5 碧口地体岩浆活动分期及其成岩构造环境

5.1 岩浆活动分期的时代依据

碧口地体由晚太古代鱼洞子花岗—绿岩地体(结晶地体)及其周围的中—晚元古代绿片岩相增生带(地层地体)组成, 包括晚太古代—早元古代、中—晚元古代和晚元古代—震旦纪及其以后 3 个构造期的岩浆演化序列。围绕着这 3 个大的构造期不同的大地构造环境的岩浆演化系列进行了初步的定年工作。

晚太古代—早元古代晚期为绿岩建造形成至地体最终固化阶段。该阶段早期岩浆活动为海相火山喷发, 下部以基性岛弧拉斑玄武岩为主, 伴有少量钙碱性玄武岩, 其成岩构造环境类

似于岛弧或活动大陆边缘。随着地体的构造发展,该阶段晚期由于变质深熔作用,产生奥长花岗岩及少量英云闪长岩浆活动,并变质成灰色片麻岩(TTG)。碎裂混合岩化斜长角闪岩中锆石(熔蚀状的)测得U-Pb谐和图法年龄为 2657 ± 9 Ma,说明其形成时代为晚太古代。钾长花岗岩化及地体固结阶段是该期的最后阶段。此阶段侵入的角闪岩脉全岩K-Ar 稀释法年龄为 2038 ± 30 Ma,标志着地体最终固化于早元古代晚期。在奥长花岗岩和英云闪长岩形成和侵入的同时,绿岩组合受其影响而发生了角闪岩相-绿片岩相变质作用,是本阶段最强烈的构造-岩浆-热事件。

中一晚元古代为碧口群的形成时期。秦克令等(1990)^[8]将碧口群划分为2个亚群和5个岩组。下亚群为赋含细碧-角斑岩的海相火山-沉积岩系,变质可达绿片岩相,呈北东东向展布于碧口地体的南部和东部地区,与基性岩、超基性岩及中酸性岩(闪长岩、石英闪长岩、斜长花岗岩)构成了特殊的“三位一体”。岩石化学及稀土元素地球化学资料表明,该火山岩-侵入岩之构造岩浆带形成于中元古代碧口古岛弧构造环境。用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测试,该下亚群上岩组偏中部的年龄值为 1565 ± 16 Ma,推断该岩组顶部时代约为1400 Ma,相当于碧口群上、下亚群间不整合面所代表的武陵运动的时代。

该期岩浆活动在勉略宁区发育较全,在峡口驿-黑木林一带产出有类似于洋壳残片的岩套组合,包括超镁铁、镁铁质侵入岩系列、细碧-角斑岩和钠质辉绿岩系列及中酸性侵入岩系列,是碧口地体主要的构造-岩浆-热事件,推测该期岩浆活动为1800—1400 Ma。但由于碧口地体是一个多期变质、构造岩浆发育区,侵入岩的成岩时代多被后期叠加的热事件所改造,而难以测得准确的成岩时代。目前所测得较老的年龄值为1335 Ma(铜厂石英闪长岩,角闪石, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法)及1235 Ma(阳坝黑云母二长花岗岩,角闪石, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法)。本阶段尚发育有晋宁期侵入岩,如金紫山黑云母斜长花岗岩,其锆石U-Pb年龄为691.9 Ma。

晚震旦及其以后的构造岩浆期,为后地体阶段岩浆活动,可分出加里东期及印支-燕山期(表4)。

5.2 侵入岩同位素地质年龄对照测定的意义

对于遭受多期地质热事件叠加改造的碧口地体的侵入岩,主要采用对照测定的办法来研究其侵入期次。所谓对照测定就是指用不同的方法对同一侵入体进行年龄测定。这种做法除了可以提供研究岩体冷却年龄、了解造山带上升速度外,还可以知道哪种方法测出的同位素地质年龄接近于岩体的成岩时代。对于一个经历多期地质热事件叠加改造的岩体,不同的方法可以测出不同的年龄值。对于年代数据较少、所采用的方法比较单一(比如只有K-Ar法的数据)的岩体,本文采取以同位素地质年代数据为基础,结合围岩时代、接触关系、岩体产出特征及其在碧口古岛弧构造岩浆带中的位置等因素综合分析划分岩体的期次(表4)°。从表4可以看出,对一个岩体用不同方法测试所获得的同位素年龄值不同。如铜厂岩体,用K-Ar法测定的年龄值为494.8 Ma,用锆石U-Pb法测定的为705 Ma及633 Ma,用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定的为1335 Ma。其中K-Ar法年龄值最新,锆石U-Pb法次之,而 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法最老。表明在地质热事件叠加改造区,K-Ar法主要反映地质体受最后一次热事件改造距今的年龄值。而锆石U-Pb法虽然比K-Ar法老,但也是改造年龄。只有用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测出得年龄值才是接近岩体成岩年龄的值。

表 4 碧口地体侵入岩分期表

Tab. 4 Stages of the intrusive rocks in the Bikou Terrain

岩体名称	岩性	同 位 素 年 龄				围 岩	期次	代号	备 注
		^{40}Ar ^{39}Ar (Ma)	Ar/K (Ma)	锆岩U-Pb					
				206/238 (Ma)	207/235 (Ma)				
大安	黑云母斜长花岗岩			141.2		扬子板块北缘志留系	燕山支期	γ_5	
花严沟	黑云母二长花岗岩			207.1	209.4	碧口群下亚群	印		
七里沟	黑云母二长花岗岩			445.3	467.1	碧口群下亚群	加里东期	γ_3^1	
丁家坝	花岗闪长岩			616	649	刘家坪群			
金紫山	黑云母斜长花岗岩			691.9	629.6	碧口群下亚群	晚	γ_2^{3-2}	800—1000 (Ma)
刘家坪	石英闪长岩			728	809	刘家坪群	晋宁期	$\delta\alpha_2^{3-1}$	
阳坝	黑云母二长花岗岩	1235	223	194	230	碧口群下亚群	早		
关口坝	石英闪长岩			841.8	839.6	碧口群下亚群	晚	γ_2^{3-2}	
铜厂	石英闪长岩	1335	494.8	705	633	碧口群下亚群	四堡		1000—1800 (Ma)
西沟	石英闪长岩			703	742	碧口群下亚群	早	$\delta\alpha_2^{3-1}$	
何家沟	角闪岩	2038				鱼洞子群	武陵期		甘肃境内 K-Ar稀释法

对于锆石U-Pb法本身也存在对照测定的问题。对于受多期地质热事件叠加改造的碧口地体来说, 其中的侵入岩多数测出的是改造年龄, 所获得的锆石U-Pb年龄测试结果, 一方面表现为数据偏新, 另一方面是 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 及 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 两组数据不协调。反映出由于后期地质热事件的干扰, 破坏了体系的封闭性, 造成铀、铅的加入或丢失。当铀丢失时, 所计算的年龄值有如下关系: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} > ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \gg ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 。如果铀的转移不是丢失, 且有外来铀的加入, 则上述几组数据性质相同, 但方向相反, 其关系式为: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} < ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \ll ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 。从勉略宁区侵入岩的锆石U-Pb两组年龄的数据(表5), 可

表 5 勉略宁区中酸性岩锆石U-Pb年龄表

Tab. 5 Ages of zircon U-Pb for intermediate-acidity rocks in Mian-Lue-Ning region

岩 体	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
	(Ma)		(Ma)		(Ma)
花严沟黑云母二长花岗岩	207.1	<	209.4	<<	249.7
七里沟黑云母二长花岗岩	445.3	<	467.1	<<	585
丁家坝花岗闪长岩	616	<	649	<<	776.8
金紫山黑云母斜长花岗岩	691.9	>	629.6	>	420
刘家坪石英闪长岩	728	<	809	<<	1038.6
阳坝黑云母二长花岗岩	194	<	230	<<	626.4
关口坝石英闪长岩	841.8	>	839.6	<	843.6
铜厂石英闪长岩	705	>	633	>	396.7
西沟石英闪长岩	703	<	742	<<	874.6

以看出所测的单点锆石的年龄值均为改造年龄。相比之下, 锆石 U-Pb 谱和图法就比较好。前述鱼洞子群锆石 U-Pb 样用谱和图法处理, 其不一致线的线性关系非常好, 说明该样品所选锆石是一组同源、同时形成的锆石, 又受到后来同一次地层热事件的改造^[6]。因此, 同一组锆石的 5 个样点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的直角坐标系中为一条直线, 其上交点是锆石形成时的主期变质年龄, 但组成不一致线的 5 个样点, 其中 1 号样点的年龄值最大, 为 2 328 Ma, 5 号点最小, 为 1 934 Ma, 都是改造年龄, 都比上交点的年龄 ($2\,657 \pm 9\text{ Ma}$) 要小。因此在有多期地质热事件叠加的改造区, 用锆石 U-Pb 谱和图法能较好的测出岩体的成岩年龄。而单点锆石 U-Pb 样测出的均为改造年龄。

6 碧口地体构造演化

经笔者研究^[1,2,3], 碧口地体是晚太古代—中晚元古代时期较为完整的陆块, 它由 3 部分组成: ①鱼洞子群结晶基底; ②主体碧口群; ③上震旦统及其以后的沉积盖层。对其主要地质事件的综合研究, 可以看出碧口地体构造演化历史有着 3 个大的旋回: ①晚太古代—早元古代, 为结晶基底形成时期 ($2\,657-2\,000\text{ Ma}$); ②中元古代, 为碧口群形成演化期 ($1\,800-800\text{ Ma}$); ③晚元古代—震旦纪及其以后: 为沉积盖层发育和后期陆内造山、断裂及岩浆活动期。

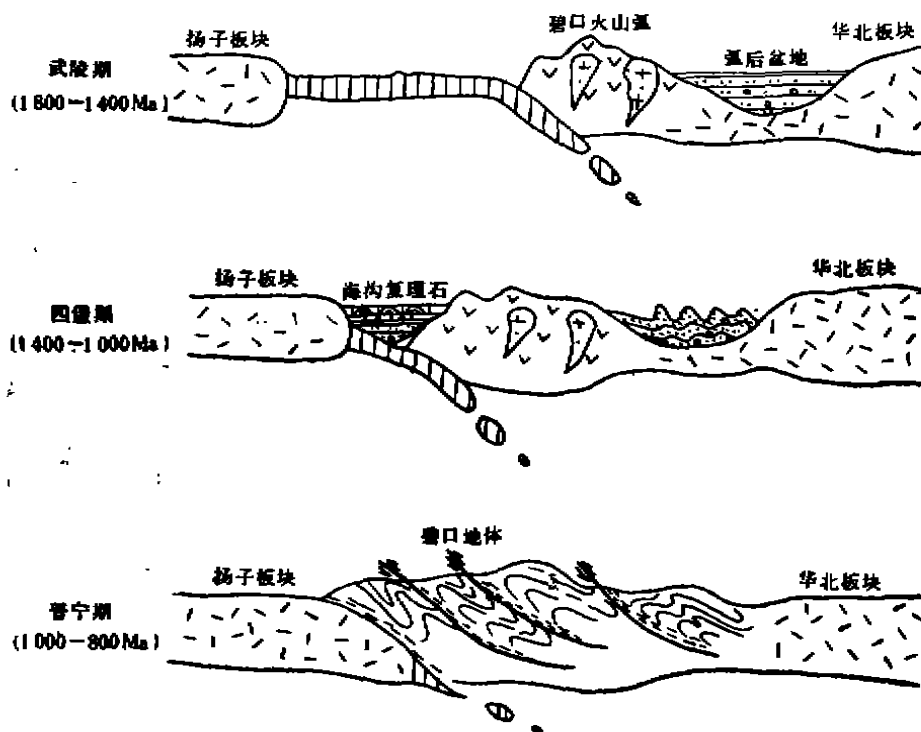


图 4 碧口地体构造演化模式图

Fig. 4 Pattern of tectonic evolution of the Bikou Terrain

其中的中晚元古代时期是碧口地体构造演化的主旋回, 发育时间较长, 约1 000 Ma。可分为武陵期(1 800—1 400 Ma)、四堡期(1 400—1 000 Ma)和晋宁期(1 000—800 Ma)。经过这3个不同的时期, 碧口地体经历了从岩浆岛弧的形成与发展到板块俯冲和碰撞造山的连续演化过程(图4)。武陵期碧口地体发育有完整的沟-弧-盆体系。碧口群的中一下岩组、上岩组和上亚群分别是火山岛弧、弧后盆地和弧前或海沟的产物。(其下岩群上岩组成岩年龄为1 565 Ma)。该区从武陵期开始, 洋壳板块由南向北俯冲, 部分洋壳碎块在下插时局部仰冲到岛弧之上, 而构成带状分布的蛇绿岩套(黑木林—峡口驿一带)。部分洋壳俯冲到一定深度发生重熔, 在岛弧区上侵和喷发, 形成北东东向展布的岛弧岩浆带。四堡期俯冲造山加剧, 局部转与碰撞造山。弧后盆地的浊积岩已被褶皱造山。弧前盆地发育的碧口群上亚群, 下部为不成熟的浊积岩, 上部为含叠层石碳酸盐岩, 不整合覆盖在火山岛弧之上, 其变质年龄为1 044 Ma, 代表古海沟闭合的年龄。晋宁期造山运动发生于1 000 Ma以后, 扬子板块与碧口岩浆岛弧发生了强烈碰撞。碧口群上、下亚群同时发生区域构造线一致的倒转褶皱。晋宁运动晚期碧口地体与扬子板块之间进一步挤压, 使其发生推覆, 并形成一系列北东东走向的韧性剪切带。

7 结 语

1) 通过对碧口地体主要地质事件的同位素地质年代学研究, 发现了该区的晚太古代—早元古代鱼洞子花岗-绿岩地体, 初步建立了碧口群地质年表, 为碧口地体构造演化和造山过程与成矿作用制约关系的研究提供了基础数据。

2) 碧口地体3个较大的发展旋回各有其特点。晚太古代—早元古代为鱼洞子花岗-绿岩地体形成期。绿岩建造生成的大地构造环境相当于岛弧或活动大陆边缘^[4], 发育有晚太古代绿岩建造、铁硅质建造(BIF)及高绿片岩相—低角闪岩相变质建造和英云闪长质—奥长花岗质变质岩浆活动和混合岩化, 发育有太古代绿岩型金矿。中—晚元古代时期, 为碧口群形成和演化时期, 发育有典型的沟-弧-盆体系, 是较完整的元古代活动带, 生成了与岛弧构造岩浆带有关的铁、铜、金矿床、与细碧-角斑岩有关的块状硫化物多金属矿床、与古洋壳残片有关的铬、镍、钴、钼矿床以及与弧前、弧后盆地浊积岩、碳酸盐岩有关的锰、金矿床和与板块俯冲、碰撞、大型推覆、走滑及韧性剪切等有关的金、银、铜矿床。晚震旦世及其以后的发展阶段, 是碧口地体受周边古生带裂陷槽及中生代断陷盆地的形成演化之陆内造山的叠加改造阶段, 生成有改造和再造型金、银矿床。

3) 用单点锆石 U-Pb 法测定遭受多期地质热事件叠加改造的侵入体, 所获年龄均为改造年龄, 有必要进行其他方法的对照测定。有条件选用⁴⁰Ar/³⁹Ar法或锆石 U-Pb 谱和图法进行对照测定, 可能会获得早期地质体的成岩年龄。

4) 运用全岩 Rb-Sr 法研究沉积剖面的界线年代, 其样品采集较为关键。所选的一组样品其间距越小越好, 但要确保岩性变化较大(目的是使该组样品中 Rb、Sr 含量有较大的变化), 测试后使等时线能够拉得开(Rb、Sr 的高值、低值点均能有)。另外样品一定要新鲜, 并排除后期构造破坏产生的构造岩及较晚的石英脉、方解石脉和其他蚀变岩石。采样要

保证排除陆源碎屑或盆地内的火山碎屑。主要采集对象是盆地内的自生矿物,如碳酸盐岩类,胶状硅质岩类和极细的泥质岩类(其中包括盆地中自生矿物:水云母、伊利石、绿泥石、海绿石等),它们经沉积成岩及浅变质后可能会达到铷、锶均一化。

5)对于绿片岩相变质地层,碎屑锆石之同位素地质年代学研究亦会很有意义,它可以初步确定一套岩系的下限时代。

6)中酸性岩浆的产生,侵位、成岩及成岩后的上升(造山带隆升)剥蚀等一系列发展演化过程都离不开区域构造的发展、演化,岩体是寓于造山带之中。而中酸性岩的侵入时代,侵入期次的确定又可反过来作为地质构造发展、演化的证据,二者是相辅相成的。碧口地体首次获得铜厂石英闪长岩1335 Ma的年龄值,除了可以证明该区存在有中元古代火山岛弧构造岩浆带外,还可以证明其围岩地层——碧口群下亚群(细碧-角斑岩系)的形成时代至少在1300 Ma以前。

参 考 文 献

- 1 秦克令等,陕、甘、川交界处摩天岭区太古界绿岩地体的发现及其意义,地质论评,1989,35(5)
- 2 秦克令等,西秦岭鱼洞子群的建立和时代归属,秦岭一大巴山地质论文集,〈一〉变质地层,北京:北京科学技术出版社,1990
- 3 秦克令等,陕、甘、川交界处摩天岭区碧口群层序及时代划分,中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,1990(30)
- 4 秦克令等,鱼洞子花岗绿岩地体地质特征及其含金性,西北地质科学,1992,13(1)
- 5 地矿部中国同位素地质年表工作组,中国同位素地质年表,北京:地质出版社,1987
- 6 G·福尔·同位素地质学原理,潘耀兰、乔广生译,北京:科学出版社,1983

ISOTOPIC GEOCHRONOLOGY AND ITS SIGNIFICANCE IN BIKOU TERRAIN, CHINA

Qin Keling, He Shiping and Song Shuguang

(*Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, Xi'an, 710054*)

Abstract

The Bikou Group, as a large wedge terrain-wide to the east and narrow to the west—occurred among Yangtse plate, Songpan-Ganzhi Fold system and Qinling Fold system with fault boundaries, is a middle to Proterozoic (migrated) terrain. It was accreted on the north margin of Yangtse plate in late Jinning movement. Bikou Group consists of marine volcanic rocks and sedimentary rocks, and is metamorphosed by chlorite facies. Problems, such as stratigraphic sequence and forming age etc., have not been solved before because of the complex structural pattern and the lack of biological fossils. The authors have studied the ages of main geological events by using zircon U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr geochronological methods and divided the previous broad sense Bikou Group into three exclusive parts, (1) the Yudongzi Gr., the late Archean basement of Bikou Group, whose main phase of metamorphic age, determined by U-Pb concordancy diagram of zircon from migmatized amphibolite, is 2657 ± 9 Ma and whole rock K-Ar dilution age of amphibolite dike that intruded into the Yudongzi Gr. is 2038 ± 30 Ma. (2) the Bikou Gr. (narrow-sense division of this paper) of which is subdivided into two Subgroups and further into five Formations. The diagenetic age of upper rock group in lower Subgroup, determined by $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ of pyrite, is 1565 ± 16 Ma; the regional metamorphic age of upper Subgroup by K-Ar of rhodonite is 1044 ± 16 Ma. Comparing spilite-keratophyre sequence of lower Subgroup in Bikou with Great wall Formation in the North China, and stromatolite-bearing dolomite sequence of the upper Subgroup with Jixian Formation, it is estimated that the age of Bikou Gr. is limited to 1800–1000 Ma. (3) The overlying upper Sinian to lower Cambrian strata, whose boundary age between Linjiang Formation of upper Sinian and Gangou Formation of lower Cambrian, determined by whole rock Rb-Sr

isochron, is 561 ± 20 Ma.

In addition, the authors have studied the ages of intermediate to acid intruding rocks through comparative analysis of ^{40}Ar - ^{39}Ar , zircon U-Pb and K-Ar. By using biotite and hornblende ^{40}Ar - ^{39}Ar methods, we respectively determined that the age of Yangba biotite monzonitic granite is 1235 Ma and Tongchang quartz diorite is 1335 Ma. Based on isotopic geochronology and combining with comprehensive analysis for the era of surrounding rock, contact relationship and location in tectonic magma zone of Bikou ancient arc-island system, four phases of intermediate to acid intrusive rock in Bikou Terrain have been distinguished, (1) Wuling-sibu epoch of intrusive rock (1800-1000 Ma), (2) Jinning epoch of intrusive rock (1000-800 Ma), (3) Calidonian intrusive rock, and (4) Indo-Chinese to Yanshan epoch of intrusive rock.

To sum up, Bikou Terrane is the complex region that is superimposed by polyphase tectonic thermal events in its evolutionary history. The ages of single zircon U-Pb is considered as a reformation age, and the ^{40}Ar - ^{39}Ar or zircon U-Pb concordancy diagram ages are approximate to diagenetic ages of intrusive bodies. Through the detailed study of isotopic geochronology, we initially divided the evolution history of Bikou Terrain into three tectonic cycles,

(1) Late Archean-Early Proterozoic era, the period of formation of the crystalline basement (2657-2000 Ma),

(2) Middle proterozoic era, the period of formation and evolution of Bikou Terrain (1800-800 Ma),

(3) Sinian period and later, sedimentary covers unconformably overlying on Bikou Terrain and intercontinental orogenic movements with magma activities.

Key words Bikou terrain geological events dated age by isotope geology