

北祁连山变质杂岩中新元古代(~775 Ma)岩浆活动纪录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据

曾建元 杨宏仪 万渝生 刘敦一 温大任 林宗祺 董国安

(成功大学地球科学系, 台南 701; 中国地质科学院地质研究所, 北京离子探针中心, 北京 100037; 台湾大学地质科学系, 台北 106. E-mail: yuan1515@yahoo.com.tw)

摘要 通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法, 获得来自北祁连山牛心山片麻状花岗岩与雷公山片麻状石英闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄, 分别为 776 ± 10 和 774 ± 23 Ma. 两者锆石皆有明显的岩浆振荡环带与较高的 Th/U 比, 代表锆石是从岩浆结晶形成. 上述结果可以解释为岩浆侵位年代, 代表北祁连山区在新元古代(约 775 Ma)存在一期重要的岩浆活动. 我们认为这一次岩浆活动可能与同时期全球的 Rodinia 超大陆裂解有关. 这一发现与邻近地区(中南祁连与柴北缘)所发现的同时期岩浆活动时间(750~800 Ma), 对于理解 Rodinia 超大陆在中国西部的构造演化具有重要意义.

关键词 北祁连造山带 锆石 U-Pb 年龄 新元古代岩浆活动 Rodinia 超大陆裂解

祁连山系被视为中央造山带的一部分^[1]. 横跨中国约有四千公里长的中央造山带主要由几个巨大山系所组成. 由西向东分别为昆仑山(Kunlun Mountains), 阿尔金山(Altun Mountains)、祁连山(Qilian Mountains)、秦岭(Qinling Mountains)、大别-苏鲁(Dabie-Sulu Mountains). 尽管它们各自有不同的地质历史, 但由最近的研究来看, 超高压变质事件显然是它们共通的地质事件^[1]. 目前整个中央造山带的超高压变质事件的深俯冲年代是不同的, 呈现西段(柴北缘)老(参考年龄 500~420 Ma^[1-5]), 东段(苏鲁-大别)年轻(约 240~225 Ma^[6-10]). 许多的锆石定年研究也发现, 这些超高压变质事件的年龄常常是继承自一个新元古代的核(参考年代 750~800 Ma^[8,9]). 这个新元古代年龄经常被当做超高压变质原岩的年代, 而Rodinia 大陆裂解事件的火成活动则是可能的成因^[8,9]. 追踪这个新元古代Rodinia 大陆裂解事件的火成活动, 显然对研究中央造山带的地质历史是有帮助的.

北祁连造山带位于祁连山系的北缘, 其主要由加里东期的蛇绿岩、岛弧杂岩、环太平洋型俯冲杂岩(低温高压变质岩)、中酸性深成岩、基性-超基性杂岩, 以及前寒武纪变质杂岩体所构成. 到目前为止, 北祁连造山带并没有新元古代Rodinia大陆裂解时期的火成活动的报道. 相邻地区的阿拉善地块西南缘的金川超镁铁岩体, 则有 827 ± 8 Ma 的报道^[11]. 柴北缘超高压变质岩中锆石定年, 则经常出现 750~800 Ma 的核部年龄^[5,12], 反映了某些超高压变质岩的原岩可能

是Rodinia 大陆裂解事件的产物. 北祁连造山带位于阿拉善地块与柴北缘超高压变质带之间, 是否有此时期的岩浆活动, 值得追踪.

本文透过 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, 报道了二个位于北祁连造山带内的变质杂岩中火成事件的年代, 研究结果显示它们都代表新元古代(~775 Ma)的岩浆活动. 依据这个结果本文也参照新元古代全球性岩浆活动时间(特别是扬子陆块周边新元古代岩浆岩年代)来讨论获得北祁连造山带新元古代岩浆活动的意义. 同时这两个研究样本的岩性与锆石 U-Pb 年龄也与大别-苏鲁造山带北麓的浅变质侵入岩类似, 因此对两者也进行一些比较.

1 地质背景

北祁连造山带挟持于华北(阿拉善)与中南祁连地块之间, 被认为是一个典型的加里东造山带^[13]. 有关境内早古生代的火山岩、蛇绿岩和俯冲杂岩等岩系已有大量的科学研究报道, 在此不再赘述^[13-16]. 而北祁连造山带的最大特点是在这些早古生代的岩系中镶嵌有大小不一的前寒武纪变质杂岩体. 这些前寒武纪变质杂岩体被视为陆壳残块, 它们的构造成因可能是飞来峰^[13]、滑覆体^[17]或华北陆壳裂解过程中残留于其间的陆壳残块^[18]. 有关北祁连造山带的变质杂岩体(陆壳残块), 大致画分了 9 个地层单位或填图单位(相关位置名称详见左国朝等^[18]). 本研究的变质杂岩体分别是北祁连造山带中段的牛心山单元和东段的雷公山单元(见图 1).

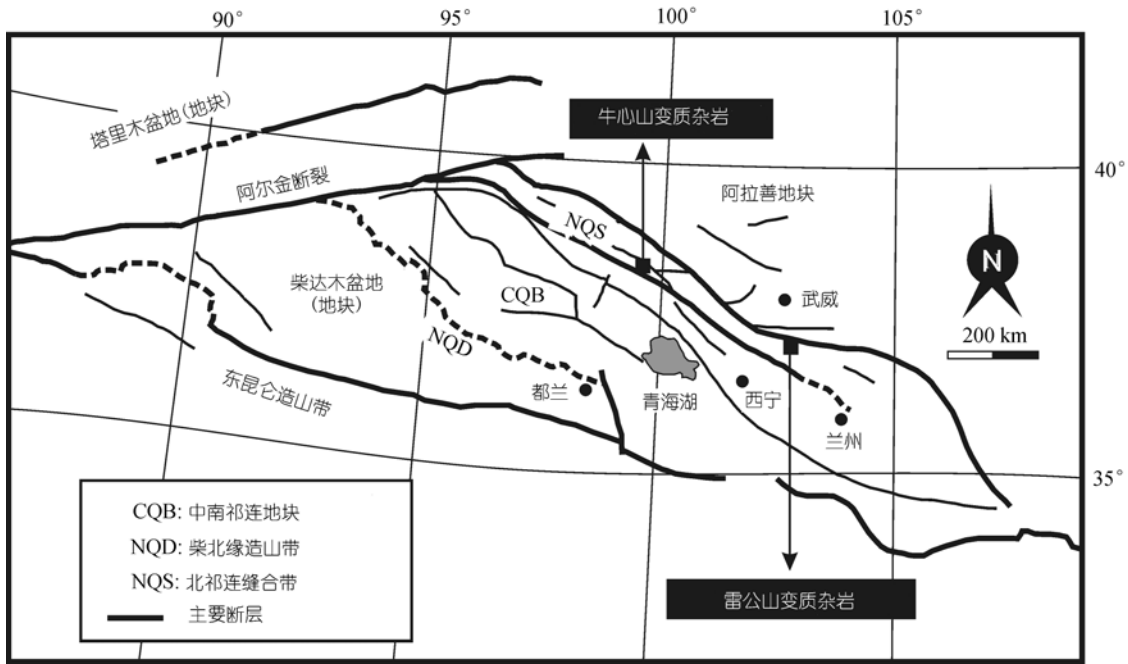


图 1 祁连山及周边地区构造简图以及两个研究地点的所在位置

牛心山变质杂岩体在札麻什河出露有钾长石化混合岩、片麻状花岗岩、角闪片岩、二云母片岩和白云质大理岩等变质岩系，在牛心山东草河则出露有阳起石片岩、黑云母片(麻)岩、角闪岩、片麻状花岗岩、变质玄武岩和大理岩等变质岩系。林宗祺^[19]针对了牛心山变质杂岩进行了变质岩石学研究，认为变质杂岩的变质相为绿片岩相至绿帘角闪岩相。

雷公山变质杂岩体出露面积不大(约 0.5 km²)，周围伴生有早古生代的火山岩与中酸性深成岩。主要组成是由绿色片岩与片麻状石英闪长岩，后者在野外可明显发现到小褶皱构造，整体而言变质度仅达绿片岩相^[20]。

2 样品选定与处理

本文选定分析的两个样品分别来自牛心山变质杂岩中札麻什河地区的片麻状花岗岩(gneissic granite)，与雷公山变质杂岩中的片麻状石英闪长岩(gneissic tonalite)(如图 1)。牛心山片麻状花岗岩，主要矿物组成为斜长石+钾长石+黑云母+石英±白云母±钛铁矿。岩相组织上由斜长石、钾长石、黑云母和白云母构成片理与片麻理状。斜长石成分变化大(An_{3-51})，黑云母镁分率为 $X_{Mg}=0.38\sim 0.43$ 。大部分矿物已受到剪力拉长现象，石英则呈现条带状组构

(ribbon texture)，表明受到糜岭岩化作用。雷公山片麻状石英闪长岩，主要矿物组成为斜长石+石英+角闪石±黑云母±铁钛氧化物，岩相上没有变形现象，仍大致保留有火成结构，片麻理特征主要来自手标本观察。上述的两个岩样中，牛心山片麻状花岗岩比雷公山片麻状石英闪长岩具有较明显的动力变形特征，但这两者的围岩变质度仅达绿片岩相至绿帘角闪岩相。显然两者是不同动力变形程度的浅变质侵入岩。

选定两区域代表性岩样 ZMS-5D1(牛心山片麻状花岗岩)与 RGS-05(雷公山片麻状石英闪长岩)进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年。锆石分选由河北区域地质调查研究院完成。选定代表性锆石与标准锆石颗粒分别黏贴于环氧树脂表面，抛光后分别于光学显微镜与电子显微镜作反射、透射光与背散射式(BSE)影像观察照相(见图 2)。ZMS-5D1 颗粒之长轴约在 80~200 μm，多数为柱状自形晶，长宽比约 1:2，晶面与晶面界棱线外型清楚完整，背散射式影像显示岩浆结晶的振荡环带与晶面大致平行。RGS-05 之颗粒度多数小于 100 μm，为短柱状自形晶，长宽比都小于 2，背散射式影像显示具有岩浆结晶的振荡环带，没有发现残余锆石核。综合上述，两者皆具有岩浆结晶锆石的所有特征。

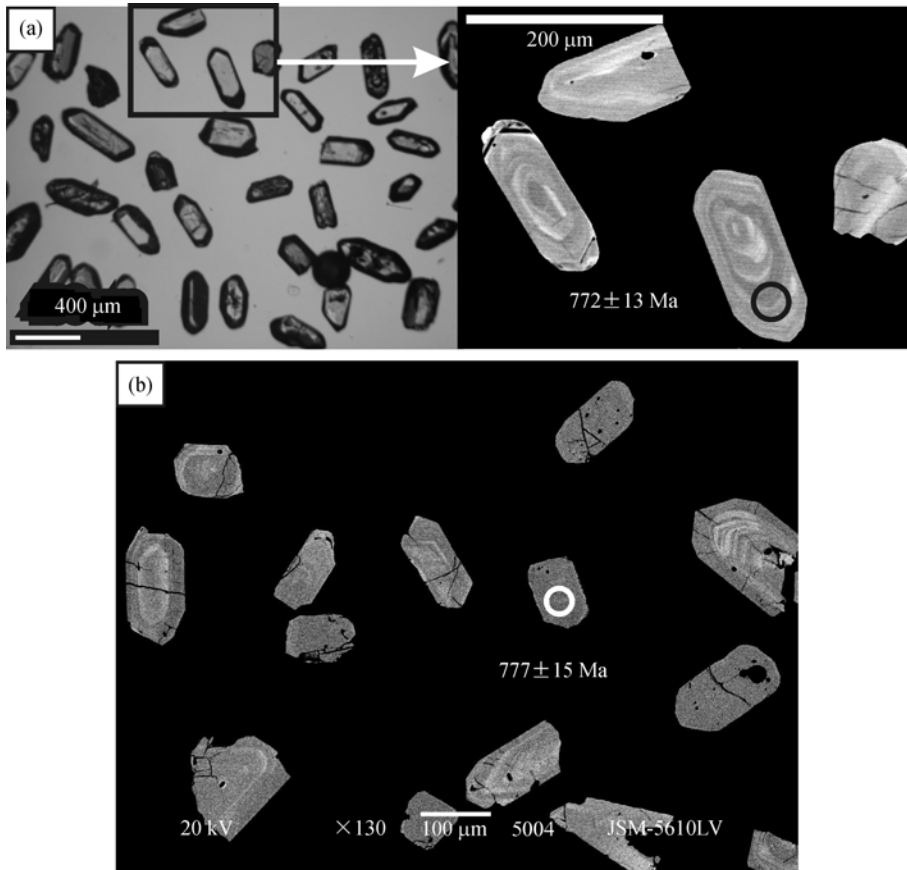


图 2
(a) 牛心山片麻状花岗岩(ZMS-5D1)之锆石颗粒. 左为透光显微镜图, 右为背散射式影像; (b) 雷公山片麻状石英闪长岩(RGS-05)之锆石背散射式影像

3 分析方法与结果

SHRIMP 锆石 U-Pb 定年在 北京离子探针中心完成, 分析条件和过程依标准程序进行^[22]. 标准样本 SL13 年龄为 572 Ma (U 含量为 238 μg/g) 被用来校正铀含量, TEMORA 年龄为 417 Ma 用作 U-Th-Pb 比值校正^[22]. 标准和样品测量之比为 1:3~4. 用 ²⁰⁴Pb 作普通铅校正, 数据处理用 SQUID 和 Isoplot 程序^[23], 加权平均年龄计算误差为 2σ.

样品 ZMS-5D1 共测定 15 个数据点, 其中测点 ZMS-5D1-5 的 ²⁰⁴Pb 测值高达 53.8ppb, 不予考虑. 其余 14 个数据点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值年龄为 776 ± 10 Ma (MSWD = 1.8) (见表 1 与图 3(a)). 它们的 Th/U 比值为 0.12~0.45, 对于花岗质岩石可以解释为岩浆结晶锆石. 样品 RGS-05 共测定 10 个数据点, 它们的 Th/U 比值为 0.44~1.01, 属于岩浆结晶锆石. 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均值年龄为 774 ± 23 Ma (MSWD = 4.0) (见表 1 与图 3(b)), 代表了石英闪长岩的侵位年

龄.

4 讨论

透过这次锆石 U-Pb 定年结果, 牛心山片麻状花岗岩与雷公山片麻状石英闪长岩, 记录着相同年代的岩浆事件, 分别为 776 ± 10 和 774 ± 23 Ma. 这是北祁连造山带第一次有新元古代岩浆活动的报道. 部分研究认为, 北祁连造山带是中南祁连地块由华北板块裂解后, 经海盆演化闭合形成^[15,18]. 而目前所知北祁连山最早的海域岩石圈为玉石沟蛇绿岩, 年代为 550 ± 17 Ma^[24]. 上述两个年代若解释为华北板块裂解时期的岩浆活动, 则海盆的扩张将长达 220 Ma 以上, 并不合理. 而且中南祁连地块的属性问题, 透过对变质基盘岩的 Sm-Nd 同位素的研究, 也指出它与扬子地块有更强烈的亲缘性^[25,26]. 所以这两个岩浆事件的年代, 可能与华北板块裂解时期的岩浆活动较无关联. 最近董国安(未发表资料)由中南祁连地块化隆地区的花岗片麻岩(正片麻岩)中的锆石获得

表1 北祁连造山带之牛心山与雷公山地区的浅变质侵入岩锆石 SHRIMP 分析结果

测点	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			Th/U	$f^{206}\text{Pb}/\%$	放射性成因的元素比值						年龄/Ma			
	U	Th	Pb			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
牛心山地区之片麻状花岗岩															
ZMS-5D1-1	466	57	51.4	0.13	0.19	0.1279	1.7	1.113	2.1	0.06302	1.1	776	± 13	711	± 24
ZMS-5D1-2	243	59	25.9	0.25	0.14	0.1236	2.2	1.104	2.6	0.06475	1.5	751	± 15	767	± 32
ZMS-5D1-3	216	97	23.9	0.46	0.09	0.1286	1.8	1.109	2.6	0.0624	2.0	780	± 13	692	± 41
ZMS-5D1-4	242	79	27.6	0.34	0.04	0.1324	1.8	1.165	2.4	0.0638	1.6	802	± 14	736	± 33
ZMS-5D1-5	492	149	48.3	0.31	2.00	0.1120	1.8	0.973	3.0	0.0626	2.4	684	± 11	709	± 50
ZMS-5D1-6	314	55	34.0	0.18	0.06	0.1259	1.8	1.101	2.0	0.06341	0.96	764	± 13	723	± 20
ZMS-5D1-7	467	76	51.0	0.17	-	0.1270	1.7	1.129	2.0	0.06444	0.87	771	± 13	757	± 18
ZMS-5D1-8	242	77	27.1	0.33	0.11	0.1302	1.8	1.143	2.8	0.0637	2.1	789	± 13	731	± 45
ZMS-5D1-9	233	71	26.0	0.32	0.42	0.1296	1.8	1.108	2.9	0.0620	2.3	785	± 14	675	± 48
ZMS-5D1-10	191	59	21.4	0.32	0.08	0.1300	1.8	1.150	2.4	0.0641	1.6	788	± 13	747	± 33
ZMS-5D1-11	327	116	36.2	0.37	0.18	0.1288	1.8	1.164	2.0	0.06553	0.96	781	± 13	792	± 20
ZMS-5D1-12	264	50	30.1	0.20	-	0.1328	1.8	1.190	2.2	0.06496	1.3	804	± 13	774	± 28
ZMS-5D1-13	223	78	24.4	0.36	-	0.1272	1.8	1.135	2.6	0.0647	1.9	772	± 13	764	± 39
ZMS-5D1-14	254	55	27.5	0.22	0.08	0.1256	1.8	1.103	2.3	0.06370	1.5	763	± 13	733	± 30
ZMS-5D1-15	379	70	39.7	0.19	0.16	0.1219	1.8	1.097	2.1	0.06525	1.2	742	± 12	783	± 25
雷公山地区之片麻状石英闪长岩															
RGS-05-1	214	139	24.1	0.67	0.42	0.1305	2.2	1.127	3.3	0.0626	2.5	791	± 16	695	± 53
RGS-05-2	120	74	14.2	0.64	0.29	0.1378	2.1	1.225	3.5	0.0645	2.8	832	± 17	758	± 59
RGS-05-3	184	110	20.7	0.62	0.38	0.1300	2.1	1.116	3.5	0.0623	2.8	788	± 15	683	± 61
RGS-05-4	100	49	11.0	0.51	0.68	0.1267	2.2	1.030	4.3	0.0590	3.7	769	± 16	565	± 81
RGS-05-5	125	77	14.3	0.64	0.86	0.1319	2.3	1.075	4.2	0.0591	3.6	799	± 17	572	± 77
RGS-05-6	153	88	17.0	0.59	0.60	0.1283	2.1	1.090	3.5	0.0616	2.8	778	± 16	661	± 60
RGS-05-7	163	110	17.4	0.70	0.58	0.1232	2.1	1.078	3.5	0.0634	2.8	749	± 15	722	± 59
RGS-05-8	108	46	11.0	0.44	0.91	0.1166	2.4	0.966	5.4	0.0601	4.9	711	± 16	607	± 110
RGS-05-9	95	44	10.2	0.48	0.84	0.1242	2.2	1.011	5.5	0.0591	5.0	755	± 16	570	± 110
RGS-05-10	308	301	33.9	1.01	0.24	0.1281	2.1	1.158	2.4	0.06557	1.3	777	± 15	793	± 28

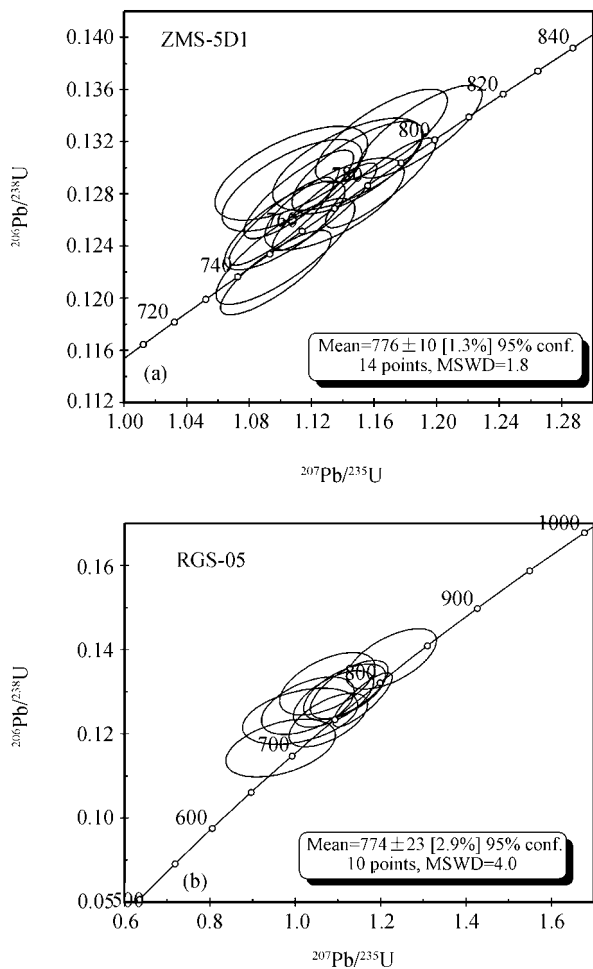


图 3

(a) 牛心山片麻状花岗岩之锆石 U-Pb 谱和年龄图, (b) 雷公山片麻状石英闪长岩之锆石 U-Pb 谱和年龄图

790±12 Ma 岩浆年龄(SHRIMP 法), 和我们报道的年代更为接近. 所以本研究的两个变质杂岩中的火成事件, 与上述化隆地区的正片麻岩(即中南祁连地块)有较高的亲缘性. 这个结果也支持位于北祁连造山带的变质杂岩体可能来自于中南祁连地块. 显然将北祁连山的变质杂岩中的岩浆事件并入与扬子地块讨论较为合理.

新元古代的重大地质事件是Rodinia超大陆裂解 [27,28]. 地幔柱(或超级地幔柱)活动被推测为这次Rodinia超大陆裂解的主要动力学机制 [29-31], 但是其直接产物的地质产出尚有待于发现. 华南陆板块(由扬子地块和华夏地块组成)被认为是Rodinia超级大陆的一部分 [32,33]. 研究指出在扬子地块周缘地区有两期大规模岩浆活动, 参考年代分别为 830~795 Ma

与 780~745 Ma [34]. 前者被视为是Rodinia超大陆开始裂解时的前张裂期岩浆活动(pre-rift magmatism), 而后者则是大陆张裂时期的同张裂期岩浆活动(syn-rift magmatism). 我们这次在北祁连造山带所报道的两个岩浆活动(~775 Ma), 显然接近后者. 北祁连造山带西段的吊大板花岗片麻岩中报道了一组单颗粒锆石年代 751±14 Ma [35], 该年龄所反应的意义如果也是Rodinia超大陆裂解时期的岩浆作用, 则可以进一步说明北祁连造山带内的变质杂岩体(恰好涵盖西、中、东段)可能普遍存在此时期的岩浆活动纪录. 由此来看, 北祁连造山带存在着一期新元古代的岩浆活动, 与全球的Rodinia大陆的裂解时期的岩浆活动产生明显的关联. 就古板块构造而言, 如何将北祁连造山带并入全球的Rodinia超大陆的裂解与演化, 将是一个新课题.

从区域地质的角度来看, 在柴北缘超高压变质岩的锆石(SHRIMP法)研究中 [5,12], 也获得大量的新元古代的核部年龄(参考年代 750~800 Ma), 代表着这些超高压变质岩的原岩年龄, 而且这些超高压变质岩的原岩可能是海洋岩石圈的产物 [12]. 综观上述而言, 祁连地区(包括: 北祁连山, 中南祁连地块与柴北缘超高压带)普遍存在一期新元古代的岩浆活动, 而这些岩浆活动正是Rodinia裂解的年代. 据此杨经绥等人 [12]也推论祁连地区存在一期与Rodinia裂解时期有关的新元古代的海盆开启与闭合事件, 而后的加里东期构造作用将这些新元古代的岩石改造破坏, 有些侵位成变质杂岩(如北祁连造山带与中南祁连地块所见), 有些则深俯冲形成超高压变质岩(如柴北缘所见). 所以对照北祁连造山带与柴北缘造山带, 两者在加里东期分别经历了环太平洋型俯冲(低温高压作用: 参考年代 462±12 Ma) [36]和阿尔卑斯型深俯冲(超高压作用: 参考年代 500~420 Ma) [1-5]. 两者的差异性在于柴北缘造山带俯冲杂岩经常纪录到新元古代的岩浆活动记录, 而北祁连造山带的俯冲杂岩则尚未发现.

从北祁连造山带的横向连结来看. 在大别-苏鲁造山带中也有大量的新元古代岩浆活动年代的报道 [8,9]. 由锆石年代学来看, 不同类型变质火成岩原岩的峰期年龄为 758±15 Ma [9]. 其中值得注意的是在北淮阳卢镇关的浅变质变形花岗岩, 与我们这次报道的两个岩浆事件有许多类似之处, 两者值得一定的对比. 首先两者都是经历变形的浅变质岩浆岩, 并没

有经历超高压变质作用。从锆石U-Pb年代学来看, 前者的年代分别为 783 ± 22 Ma (SHRIMP $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ meanage)和 762 ± 16 Ma (TIMS discordia intercept age)^[9,37], 与我们报道的年代(~ 775 Ma)在误差范围内。在地质构造上, 北淮阳卢镇关的浅变质变形侵入岩, 其原岩属于扬子陆块北缘的新元古代裂谷构造带的侵入岩。在三叠纪时, 这些侵入岩与其围岩, 在扬子板块往北俯冲过程中被华北板块所刮削下来, 过程中产生动力变形与低度变质作用, 形成所谓的被动陆缘加积楔^[37]。从整个大别-苏鲁造山带角度来看, 这些属于被动陆缘加积楔的新元古代浅变质变形侵入岩已被大量报道^[37,38]。再者向西延伸到秦岭的刘岭单元新阳群也被认为属被动陆缘加积楔的一部分^[37,39]。至于中央造山带西段的祁连山系并无类似的地质构造报道。先前的研究已证实柴北缘超高压变质岩的原岩年代约为 $750\sim 800$ Ma^[5,12], 与大别-苏鲁造山带的超高压变质火成岩原岩年龄是一致的^[9], 虽然两者的超高压变质事件分别发生在加里东期和印支期。现在我们报道的两个新元古代岩浆岩也只经历了浅变质变形, 若在加里东期的构造背景之下, 是否如同北淮阳芦镇关的浅变质变形侵入岩, 属于被动陆缘加积楔的一部分? 也就是说, 有关扬子陆块北缘印支期被动陆缘加积楔模型是否能够用来解释西部加里东期祁连山系浅变质岩的构造产状, 值得进一步研究。

5 结论

对祁连山浅变质侵入岩的锆石 U-Pb 定年结果主要反映出两个重要地质意义: () 北祁连造山带存在着期新元古代(~ 775 Ma)岩浆活动, 与全球 Rodinia 大陆裂解时期的岩浆活动具有一定的关连; () 北祁连造山带 ~ 775 Ma 岩浆活动与中南祁连和柴北缘地区所发现的一系列 $750\sim 800$ Ma 岩浆活动存在同时性, 对理解中国西部在 Rodinia 超大陆聚合和裂解过程中的地位具有重要意义。

致谢 作者对郑永飞教授所提出的许多宝贵意见, 李献华博士和审稿专家提出的宝贵修改意见, 王彦斌博士在写作期间的指导与协助, 左国朝与吴汉泉在野外工作上的帮助, 以及张玉海和陶华在 SHRIMP 定年工作帮助, 在此一并深表谢意。本工作受中华发展基金和“国科会”研究项目 (NSC 89-2116-M-006-003, NSC 91-2116-M-006-016, NSC 92-2116-M-006-010)资助。

参 考 文 献

- 1 Yang J S, Xu Z Q, Dobrzynetskaia L F, et al. Discovery of metamorphic diamonds in central China: an indication of a > 4000-km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions. *Terra Nova*, 2003, 15: 370-379 [DOI](#)
- 2 Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 2002, 14: 397-404 [DOI](#)
- 3 Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 2003, 70: 195-211 [DOI](#)
- 4 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234: 99-118 [DOI](#)
- 5 Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotope constraints. *Lithos*, 2005, 84: 51-76 [DOI](#)
- 6 Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem Geol*, 1996, 133: 29-51 [DOI](#)
- 7 Rowley D B, Xue F, Tunker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the Central Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 191-203 [DOI](#)
- 8 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62: 105-161 [DOI](#)
- 9 Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 4145-4165 [DOI](#)
- 10 Wan Y S, Li R W, Wilde S A, et al. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 4333-4348 [DOI](#)
- 11 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超铁镁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *科学通报*, 2004, 49: 401-402.
- 12 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 中国西部柴北缘-阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨. *地质学报*, 2003, 10: 291-314
- 13 许志琴, 徐惠芬, 张建新. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. *地质学报*, 1994, 68(1): 1-15
- 14 Zhang Q, Chen Y, Zhou D J, et al. Geochemical characteristics and genesis of Dachadaban ophiolite in North Qilian area. *Science in*

- China, Ser D, 1998, 41: 277~281
- 15 Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. Magma genesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115: 1510~1522 [\[DOI\]](#)
 - 16 Wang C Y, Zhang Q, Qian Q, et al. Geochemistry of the early Paleozoic Baiyin volcanic rocks (NW China): Implications for the tectonic evolution of the North Qilian orogenic belt. The Journal of Geology, 2005, 113, 83~94
 - 17 冯益民. 北祁连山带西段的外来移置地体. 地质论评, 1998, 44(4): 365~371
 - 18 左国朝, 刘义科, 张招崇. 北祁连山带中-西段陆壳残块的构造-地层特征. 地质科学, 2002, 37: 302~312
 - 19 林宗祺. 北祁连山带中-西段基盘岩地球化学及年代学研究. 成功大学地球科学研究所硕士论文, 2003, 131
 - 20 郑秋光. 弧后盆地花岗岩类之岩石学及地球化学研究-以北祁连褶皱带东段老虎山为例. 台湾大学地质学研究所硕士论文, 1999, 95
 - 21 Willians I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Rev Econ Geol, 1998, 7: 1~35
 - 22 Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chem Geol, 2003, 200: 155~170 [\[DOI\]](#)
 - 23 Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.4. A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochron Centre Spec Publ, 2000, 1~56
 - 24 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 2004, 78(5): 649~657
 - 25 Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, et al. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and adjacent areas. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(4): 375~384
 - 26 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 等. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd 和 U-Pb 同位素研究-深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 2003, 19(3): 443~451
 - 27 Lindsay J F, Korsch R J, Wilford J R. Timing the breakup of a Neoproterozoic supercontinent: Evidence from Australian intracratonic basins. Geology, 1987, 15: 1061~1064 [\[DOI\]](#)
 - 28 Meert J G, Torsvik T H. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. Tectonophysics, 2003, 375 (1-4): 261~288 [\[DOI\]](#)
 - 29 Hoffman P F. Did the breakup of Laurentia turn Gondwanaland in-side-out? Science, 1991, 252: 1409~1412
 - 30 Moores E M. Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection: a hypothesis. Geology, 1991, 19: 425~428 [\[DOI\]](#)
 - 31 Park L K, Buchan K L, Harlan S S. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on Paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western North America. Earth Planet Sci Lett, 1995, 132: 129~139 [\[DOI\]](#)
 - 32 Li Z X, Zhang L, Powell C M. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? Geology, 1995, 23: 407~410 [\[DOI\]](#)
 - 33 Li Z X, Zhang L, Powell C M. Positions of the East Asian Cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. Aust J Earth Sci, 1996, 43: 593~604
 - 34 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Research, 2003, 122: 85~109 [\[DOI\]](#)
 - 35 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 北祁连山西段吊大坂花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 地质科技情报, 2004, 23: 11~14
 - 36 宋述光, 张立飞, Niu Y L, 等. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 2004, 49(6): 592~595
 - 37 Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, et al. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. International Geology Review, 2005, 47: 851~871
 - 38 Wu Y B, Zheng Y F, Zhou J B. Neoproterozoic granitoid in north-west Sulu and its bearing on the North China-South China Blocks boundary in east China. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L07616, doi: 10.1029/2004GL019785
 - 39 Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonic of the Qinling (central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. Tectonophysics, 2003, 366: 1~53 [\[DOI\]](#)

(2005-07-07 收稿, 2006-01-25 接受)