

祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义

董国安 杨怀仁* 杨宏仪 刘敦一 张建新 万渝生 曾建元

(成功大学地球科学系, 台南; 自然科学博物馆, 台中; 北京离子探针中心, 北京 100037; 中国地质科学院地质研究所, 北京 100035. * 联系人, E-mail: hjyang@mail.ncku.edu.tw)

摘要 为了解祁连地块起源与演化, 利用 SHRIMP U-Pb 定年法获得祁连地块前寒武纪基底 2 个片岩、2 个花岗片麻岩和 1 个糜棱岩化花岗片麻岩的锆石年代资料. 2 个片岩单颗粒碎屑锆石共有 61 个具地质意义的年龄资料, 其锆石年龄分布于 0.88~3.09 Ga 之间, 主要介于 1.0~1.8 Ga, 约占 70%, 峰值在 1.6~1.8 Ga, 部分在 2.0~2.5 Ga 之间, 约占 20%, 其余零星分布在太古代及新元古代. 2 个花岗片麻岩锆石年代为 (930 ± 8) 和 (918 ± 14) Ma, 1 个糜棱岩化花岗片麻岩锆石年代为 (790 ± 12) Ma, 分别代表两次岩浆活动的年代, 可与扬子地块新元古代晋宁运动早晚两期的岩浆活动对比.

本研究工作和前人的资料共同表明, 祁连地块前寒武纪基底岩石的碎屑锆石年代广泛分布在元古代, 明显与华北地块在新、中元古代时为一稳定地台有所不同, 而与扬子地块前寒武纪基底岩石的年龄频谱相似. 再加上钨同位素模式年龄(T_{DM})、地层学及古生物生态的证据, 推论祁连地块并非由华北地块裂解出来再拼贴回去, 而是与扬子地块有较强的亲缘性, 在新元古代时同属冈瓦纳大陆的一部分, 大约在震旦纪末从冈瓦纳大陆裂解出来, 形成当时原特提斯大洋中的陆块, 并于早古生代时随古祁连洋的闭合, 与阿拉善地块聚合形成北祁连褶皱带. 因此, 认为古祁连洋其实就是原特提斯洋的一部分, 北祁连蛇绿岩属原特提斯蛇绿岩. 此外, 早古生代时祁连地块发生明显的大陆再活化作用, 此作用与柴北缘大陆板块的深俯冲作用有关.

关键词 铀-铅年代学 锆石 离子探针 祁连地块 前寒武纪基底 原特提斯 大陆再活化作用

祁连造山带位于中国大陆西北地区, 约在北纬 35° ~ 40° , 东经 92° ~ 107° 范围内, 呈北西西-南东东走向, 长约 1200 km, 宽约 300 km, 环绕青藏高原的北缘. 在大地构造上, 祁连造山带的西端被具左移走滑特性的阿尔金断裂带所截, 与塔里木地块相接, 东端被右行走滑的同心-固原断裂所截, 与鄂尔多斯地块相邻 [1], 东南端则可能与同属加里东期的秦岭造山带连续相接 [2~4], 是整个中国西北地区、甚至中亚地区大地构造体系中的一个重要环节.

由于缺乏完整可靠的同位素年代学数据, 祁连地块前寒武纪基底的归属及形成年代一直是长期争论的问题. 在归属方面: 早期一些学者认为祁连地块是在加里东期造山作用之前, 从华北板块裂解出来的, 而后再拼贴回去 [5~8]. 近年来, 根据地球化学和同位素年代学资料, 一些学者认为祁连地块可能为外来的地体, 与扬子板块具有较强的亲缘性 [9~12].

在形成年代方面: 早期主要根据上覆地层的时代、少数同位素年龄值和岩石组合的区域对比, 认为祁连地块是古元古代末中条旋回结晶基底 [13~18]. 但近年有人利用变质火成岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄, 结合区域地质背景分析, 认为祁连地块的主体形成于 0.8~1.0 Ga, 属晋宁旋回结晶基底 [10~12, 19~21].

为了解祁连地块归属、形成年代及澄清上述分歧, 本研究主要利用祁连地块前寒武纪地层中, 具代表性的 2 个片岩和 3 个花岗片麻岩, 使用 SHRIMP 方法 (高分辨率二次离子探针质谱仪) 测定其中锆石颗粒的 U-Pb 年龄. 希望能借助碎屑锆石 U-Pb 年龄, 取得祁连地块前寒武纪基底沉积成岩和变质年龄的时限, 并追踪其源区. 再辅以花岗片麻岩锆石结晶形成的年代, 讨论祁连地块所经历的热事件, 并与相邻的地块对比, 探讨其归属, 推测其演化历史.

1 祁连地块前寒武纪基底地层层序及岩石组合

祁连地块前寒武纪基底主要出露在中祁连西段野马南山、中段湟源以及东段马衔山等地区,中段哈拉湖至青海湖地区以及大部分的南祁连都被古生代以来的浅海相及陆相沉积物所覆盖,仅在南祁连东南端化隆地区有小部分的基底出露(图 1),本文将其归并于湟源群,时代厘定为早元古代^[14],但也有认为两者变质程度不一致,分布地区有别,另称其为化隆群(或尕让群),时代暂归属中元古代、古元古-新太古代^[16,18]。

据岩石组成和变质程度,祁连地块基底明显可分为下、中、上三层。下层是中-深变质的浅海-滨海相泥砂质沉积岩和镁质碳酸盐岩,中-酸性深成岩夹少量中-基性火山岩,在中祁连的西、中和东段分别称之为野马南山群、湟源群和马衔山群。主要岩石组合为各种角闪岩相片岩、片麻岩和角闪岩,以及花岗片麻岩和混合岩。下层的顶部有一层巨厚的白云岩-富镁大理岩,是在区域对比上很有用的标志地层。中层是浅变质的浅海-滨海相泥砂质沉积岩,碳酸盐岩,以及少量的中-基性火山岩,在中祁连的西、中和东段分别称之为党河群、湟中群和兴隆山群。岩石组合主要为板岩、千枚岩、片岩、变质砂质岩,变质火山岩和灰岩-白云岩,其中有一层很纯的石英岩和变质石英砂岩,也是一层很重要的区域对比的地层。上层是一层巨厚大面积连续性很好的碳酸盐岩,在中祁连的西、中和东段分别称为托莱南山群(含龚岔群)、花石山群和高加湾组,岩石组合主要为白云岩和灰岩,本层连续性甚佳,是区域对比的重要标志层。下层和中层是连续的,而中层和上层之间的关系是平行不整合^[13~17]。

值得一提的是祁连地块普遍缺乏下寒武统地层,在大通-互助地区可见中寒武统的地层(毛家沟群)以角度不整合的关系直接覆盖在前寒武纪的地层之上^[14]。有关祁连地块前寒武纪基底的地层层序见图 2。

2 样品的基本特征

本研究采集了大量祁连地块基底野马南山群、湟源群的变质沉积岩及湟源群和马衔山群的花岗片麻岩,挑选其中具代表性岩石做为分析样品,采集地点见图 1(a)~(e)。

样品 89-2105(38°44.8'N, 98°27.6'E)是石榴二云

母片岩,采自托勒牧场南方野马南山群的下部层位,其主要矿物组成为石英(60%~70%)、钾长石(5%~10%)、斜长石(5%~10%)、白云母(5%)、黑云母(5%)和石榴子石(5%),具明显的片理,原岩中的石英碎屑因变质重结晶作用,使石英外部生长成不规则的镶嵌状颗粒的变余结构,推测其原岩为沉积砂岩。

样品 89-2609(37°18.0'N, 101°25.2'E)是石榴白云母片岩,采自大通山地区湟源群的上部(东岔沟组)层位,其主要矿物组成为石英(60%)、白云母(20%)、长石(10%)、石榴子石(5%~10%)。具明显片理,整体而言呈现泥质砂岩的变余结构:原本的泥质胶结物已变质成定向分布的黑云母、绿泥石等矿物,原石英碎屑仍呈现原有碎屑轮廓。

样品 ZJ-01(36°41.0'N, 101°22.0'E)采自湟源县城南方约 5 km 处,为湟源群的花岗片麻岩,矿物组成为石英(55%)、钾长石(20%)、斜长石(10%)、黑云母(10%)、石榴子石(5%)。原始的花岗岩嵌晶结构仍大致保留,黑云母的定向排列形成片麻理。野外可见花岗片麻岩有表壳岩的捕虏体,显示花岗片麻岩与围岩为侵入接触关系。

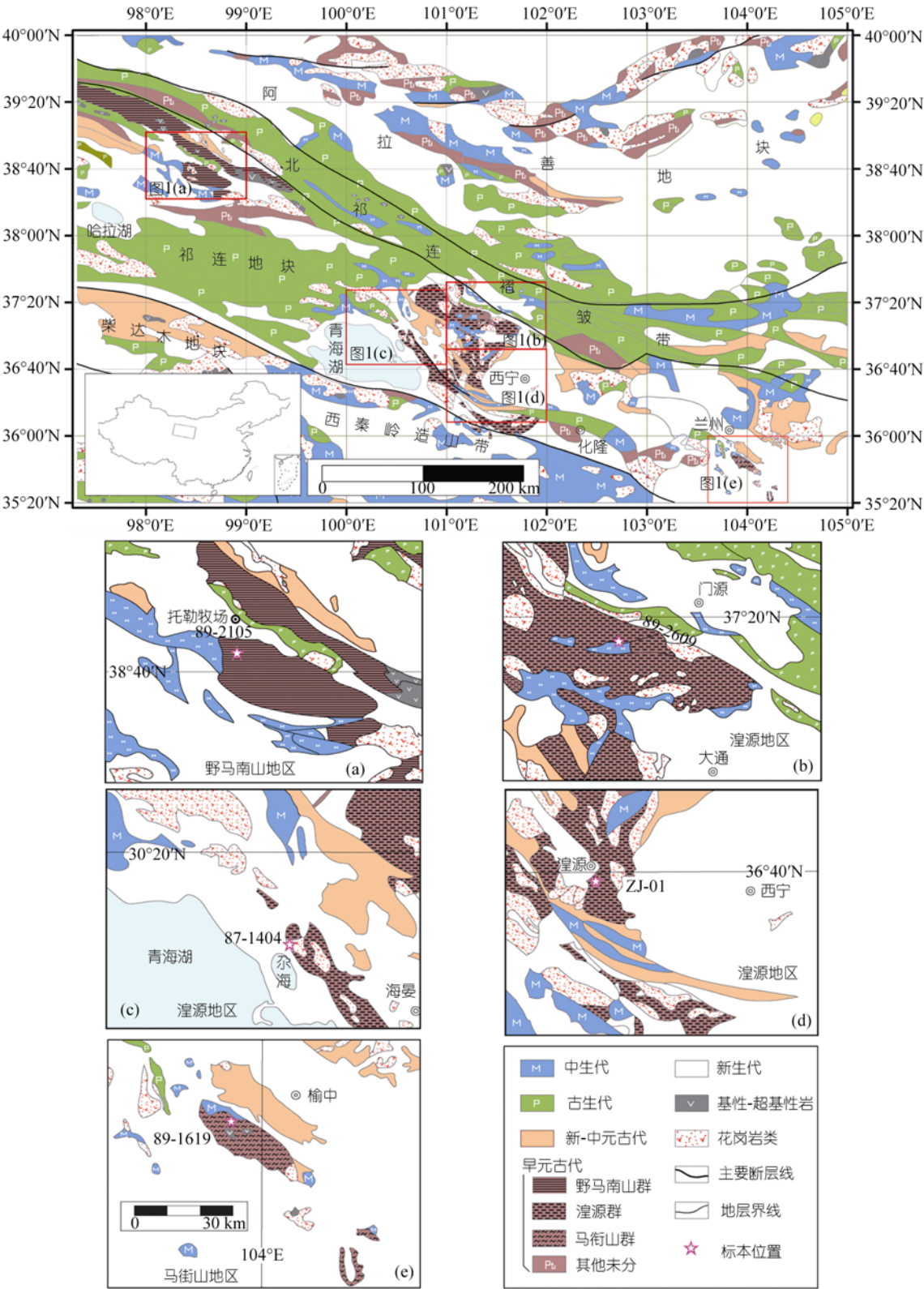
样品 86-1619(35°46.5'N, 103°55.0'E)采自榆中县西南方马衔山地区所出露马衔山群的花岗片麻岩,矿物组成为石英(60%)、钾长石(15%)、斜长石(10%)、黑云母(10%)、角闪石(5%)。显微镜下观察显示变余花岗结构明显,长石与石英晶界仍呈火成结构,由定向排列的黑云母构成片麻理。

样品 87-1404(37°05.7'N, 100°37.3'E)采自青海湖东北方约 5 km 处尕海地区侵入湟源群的糜棱岩化花岗片麻岩,矿物组成为石英(50%)、长石(30%)和黑云母(20%),其中部分黑云母已蚀变为绿泥石。显微镜下仍可观察到部分保留的原始花岗岩结构,但因受糜棱岩化作用,许多石英颗粒已拉长呈现糜棱岩化的石英条带。野外可见花岗片麻岩侵入围岩湟源群中,并有岩脉顺片理或斜切片理注入。

3 锆石 SHRIMP U-Pb 年代测定

3.1 测定流程及方法

样本经压碎、淘洗后再用重液分离,和磁性分离处理,然后在显微镜下用手挑选出锆石。将锆石置于双面胶带上固定,注入环氧树脂做靶。待固化后,将靶内锆石磨光至约原来颗粒的一半大小,并在光学



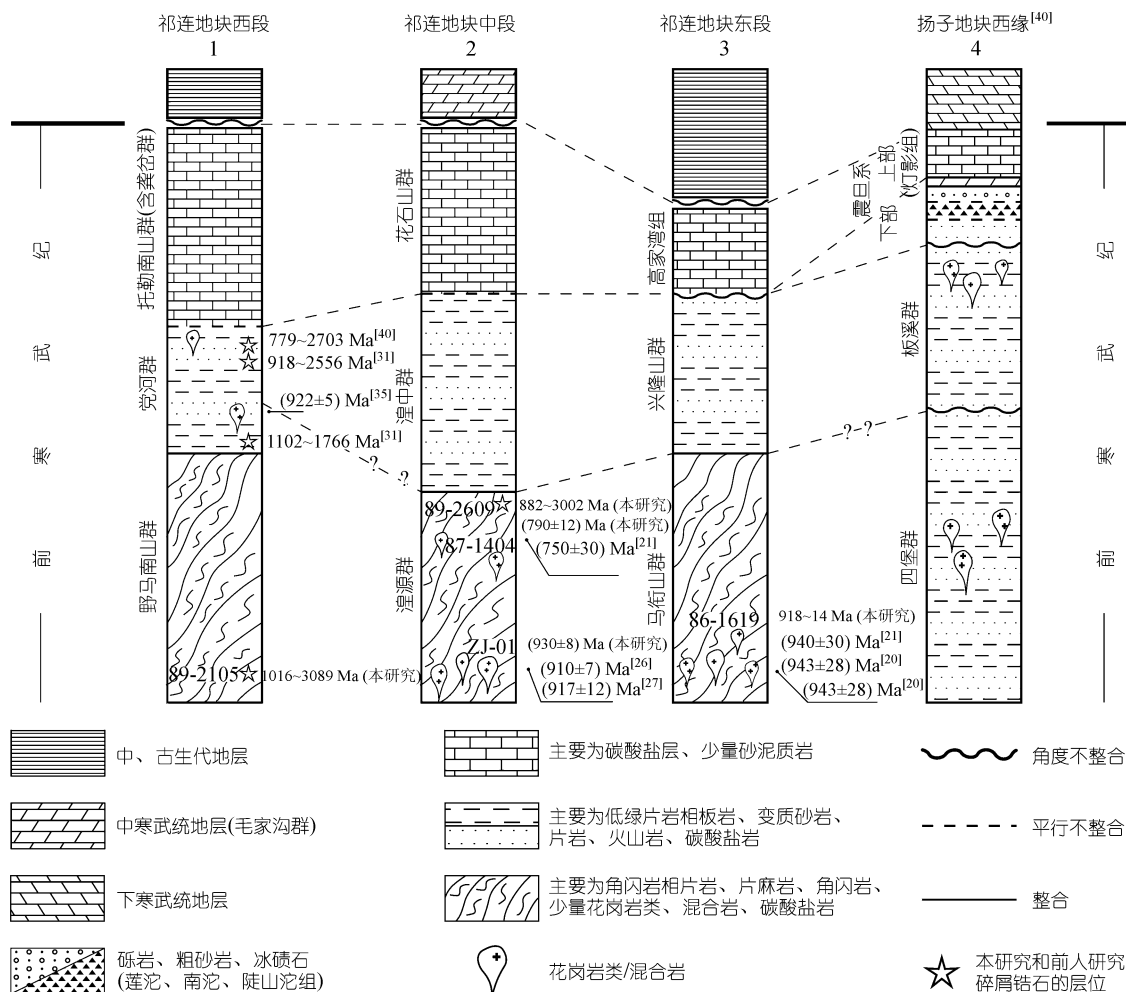


图 2 祁连地块和扬子地块西缘地层柱状图以及碎屑锆石和花岗岩类/混合岩的年代
 地层柱状图资料来源: 甘肃省地质矿产局^[13]; 青海省地质矿产局^[14]; Li等^[40]. 其他数据资料来源: 本研究及参考文献

显微镜下以反射及穿透式光线拍照. 利用扫描电子显微镜获得锆石颗粒的阴极光影像(图 3). 锆石中的 U-Th-Pb 同位素比值及其浓度测定是在中国地质科学院北京离子探针中心完成的. 测定分析流程及原理参见文献[22]. 标准锆石 SL13 (572 Ma, U 含量为 238 μg/g) 标定 TEM 标准锆石及样品的 U, Th 及 Pb 含量. 应用 TEM (417 Ma) 进行元素间分馏校正^[23]、计算 Pb/U 及 UO/U 的校正值, 并计算样品年龄, 采用 ISOPLOT 程序处理数据^[24]. 应用实测 ²⁰⁴Pb 校正普通铅.

3.2 测定结果

在 2 个变质沉积岩、2 个花岗片麻岩及一个糜棱岩化花岗片麻岩中, 共在 91 粒锆石中进行了 99 个点的测定. 锆石阴极发光图像及测点位置如图 3 所示, 完整的分析数据见表 1.

在样品 89-2105 中, 锆石颗粒大小约 50~100 μm, 多属圆形和次圆形, 阴极发光影像显示其内部没有明显的环带, 具典型碎屑锆石特征. 在 36 粒锆石上共测得 38 个点, 大都落在谐合线上(图 3), 锆石年龄介于 1016~3089 Ma, 主要分布在中、古元古代, 仅一个测点为新太古代, 其中点 1.1 及 1.2 分别为同一颗锆石的边部及核部, 核部(测点 1.1) Th/U 比值为 0.76, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 (1848 ± 13) Ma; 边部(测点 1.2) Th/U 比值为 0.10, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 (1515 ± 7) Ma, 据此, 该锆石核部年龄应为岩浆结晶年龄, 边部可能代表后期变质作用的年代.

样品 89-2609 中锆石颗粒直径约为 50~100 μm, 锆石形状部分为浑圆状, 部分为不规则形态, 由阴极

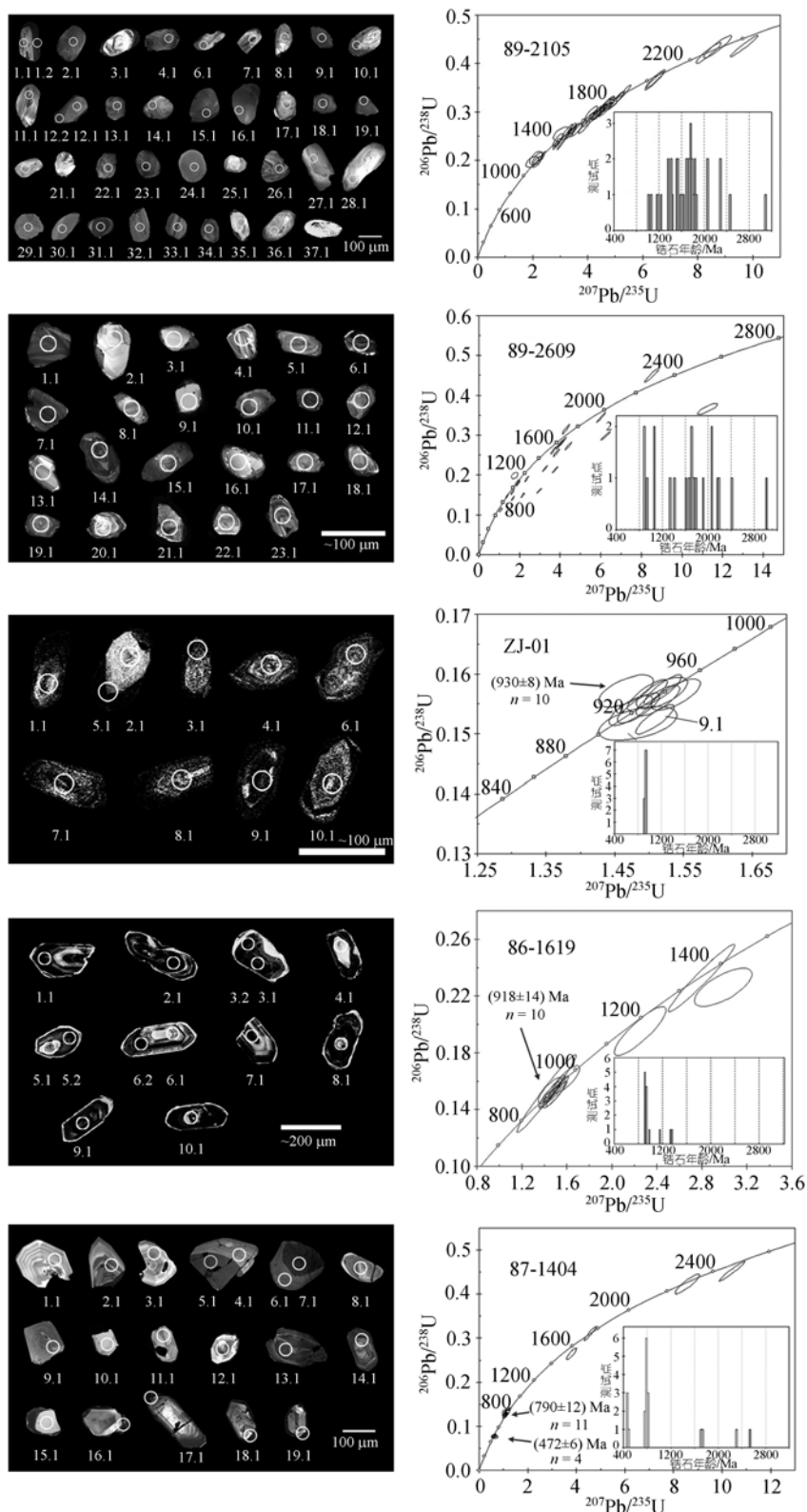


图3

(a) 祁连地块前寒武纪基底, 2 个片岩(89-2105, 89-2609)和 3 个花岗岩片麻岩(ZJ-01, 86-1619, 87-1404)锆石阴极发光影像。锆石下方数字为测试样点编号; (b) 锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果谐和线图, 右下方插图为锆石年龄频谱

表 1 祁连地块前寒武纪锆石 U-Pb SHRIMP 定年结果

测点	$^{206}\text{Pb}^c$ /%	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ /mg·g ⁻¹	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄/Ma	不谐和性 /%
1. 89-2105 石榴二云母片岩, 野马南山群下部层位, 托勒牧场南									
2105-1.1	0.02	154	114	0.76	43	1807 ± 35	1848 ± 13	1843 ± 45	2
2105-1.2	0.06	1138	114	0.10	229	1355 ± 25	1515 ± 7	1351 ± 32	11
2105-2.1	0.15	147	48	0.33	38	1694 ± 31	1749 ± 15	1670 ± 43	3
2105-3.1	0.11	182	228	1.30	48	1724 ± 31	1804 ± 15	1735 ± 38	4
2105-4.1	0.11	322	191	0.61	65	1358 ± 25	1417 ± 14	1356 ± 30	4
2105-6.1	1.08	45	86	1.99	8	1158 ± 25	1016 ± 78	1150 ± 32	-14
2105-7.1	0.17	276	391	1.46	62	1493 ± 29	1443 ± 15	1498 ± 34	-4
2105-8.1	0.16	86	54	0.66	15	1159 ± 25	1181 ± 42	1226 ± 38	2
2105-9.1	0.15	167	212	1.31	53	2021 ± 36	2059 ± 12	2012 ± 44	2
2105-10.1	0.13	323	183	0.58	71	1473 ± 27	1534 ± 12	1473 ± 32	4
2105-11.1	0.14	162	132	0.84	42	1688 ± 31	1724 ± 16	1642 ± 38	2
2105-12.1	0.23	84	43	0.53	19	1504 ± 29	1579 ± 36	1525 ± 41	5
2105-12.2	0.21	281	114	0.42	63	1484 ± 27	1543 ± 14	1589 ± 38	4
2105-13.1	0.02	164	63	0.39	43	1698 ± 31	1768 ± 13	1696 ± 39	4
2105-14.1	0.06	301	63	0.21	68	1512 ± 28	1619 ± 14	1533 ± 41	7
2105-15.1	0.13	111	174	1.61	28	1672 ± 31	1639 ± 22	1664 ± 41	-2
2105-16.1	0.33	81	104	1.32	20	1615 ± 31	1690 ± 26	1609 ± 39	4
2105-17.1	0.16	74	34	0.48	38	2984 ± 55	3089 ± 10	2968 ± 81	3
2105-18.1	0.06	177	112	0.65	41	1534 ± 28	1706 ± 16	1532 ± 35	10
2105-19.1	0.04	682	315	0.48	170	1643 ± 29	1680 ± 8	1666 ± 35	2
2105-20.1	0.35	89	54	0.62	19	1399 ± 27	1374 ± 31	1408 ± 39	-2
2105-21.1	0.26	122	145	1.23	44	2269 ± 40	2279 ± 13	2270 ± 52	0
2105-22.1	0.08	220	82	0.39	69	2002 ± 37	2072 ± 10	1959 ± 46	3
2105-23.1	0.20	148	71	0.50	34	1504 ± 28	1501 ± 18	1505 ± 36	0
2105-24.1	0.10	221	152	0.71	83	2331 ± 40	2467 ± 8	2336 ± 51	6
2105-25.1	0.31	69	56	0.84	12	1198 ± 27	1154 ± 59	1201 ± 41	-4
2105-26.1	0.10	237	112	0.49	69	1880 ± 33	1855 ± 11	1854 ± 41	-1
2105-27.1	0.39	93	76	0.85	25	1761 ± 33	1776 ± 24	1745 ± 44	1
2105-28.1	0.05	168	131	0.81	45	1750 ± 32	1779 ± 13	1760 ± 38	2
2105-29.1	0.06	1063	218	0.21	218	1380 ± 25	1424 ± 7	1356 ± 29	3
2105-30.1	0.11	59	49	0.86	22	2326 ± 43	2293 ± 15	2363 ± 56	-1
2105-31.1	0.07	608	98	0.17	109	1219 ± 22	1229 ± 11	1212 ± 28	1
2105-32.1	0.16	149	53	0.37	41	1774 ± 32	1763 ± 16	1728 ± 46	-1
2105-33.1	0.12	148	127	0.89	38	1688 ± 34	1742 ± 17	1707 ± 42	3
2105-34.1	0.06	200	94	0.49	56	1821 ± 34	1843 ± 13	1880 ± 44	1
2105-35.1	1.08	38	38	1.05	8	1462 ± 30	1368 ± 67	1439 ± 50	-7
2105-36.1	0.14	157	94	0.62	42	1742 ± 33	1757 ± 17	1682 ± 54	1
2105-37.1	0.88	58	25	0.44	10	1202 ± 29	1067 ± 68	1124 ± 61	-13
2. 89-2609 石榴白云母片岩, 湟源群上部层位, 大通山地区									
2609-1.1	0.22	267	76	0.30	64	1589 ± 34	1710 ± 14	1629 ± 48	7
2609-2.1	1.21	134	34	0.26	43	2001 ± 43	3002 ± 24	2568 ± 310	33
2609-3.1	1.31	161	31	0.20	16	887 ± 16	889 ± 69	1391 ± 76	23
2609-4.1	0.09	350	151	0.44	86	1615 ± 34	1725 ± 9.9	1669 ± 46	6
2609-5.1	0.23	239	66	0.29	57	1565 ± 33	1696 ± 14	1585 ± 48	8
2609-6.1	0.32	409	152	0.38	90	1468 ± 31	1771 ± 12	1493 ± 41	17
2609-7.1	0.12	403	139	0.36	104	1688 ± 36	2421 ± 8.1	1704 ± 44	30
2609-8.1	1.09	235	74	0.32	37	1071 ± 24	1112 ± 44	1527 ± 61	4
2609-9.1	1.35	167	29	0.18	29	1168 ± 27	760 ± 110	1967 ± 190	-54
2609-10.1	0.13	400	105	0.27	74	1258 ± 27	1790 ± 11	1718 ± 45	30
2609-11.1	0.16	762	259	0.35	117	1056 ± 23	1148 ± 13	1244 ± 32	8
2609-12.1	0.25	290	126	0.45	79	1764 ± 37	1600 ± 15	2243 ± 58	-10
2609-13.1	0.16	494	47	0.10	116	1554 ± 33	1914 ± 11	1391 ± 58	19

表 1(续)

测点	$^{206}\text{Pb}^c$ /%	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ /mg·g ⁻¹	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄/Ma	不谐和性 /%
2609-14.1	1.06	890	270	0.31	109	951 ± 19	1328 ± 19	974 ± 35	36
2609-15.1	0.11	371	80	0.22	51	959 ± 21	2155 ± 12	2270 ± 59	56
2609-16.1	0.20	550	110	0.21	69	882 ± 20	883 ± 23	1746 ± 48	0
2609-17.1	0.55	378	93	0.25	147	2392 ± 49	2189 ± 14	2919 ± 110	-9
2609-18.1	0.12	444	112	0.26	81	1243 ± 27	2067 ± 10.0	2218 ± 57	40
2609-19.1	0.13	459	186	0.42	103	1499 ± 32	1657 ± 11	1673 ± 44	10
2609-20.1	0.17	320	115	0.37	52	1120 ± 25	1424 ± 15	1469 ± 38	21
2609-21.1	0.06	320	59	0.19	95	1905 ± 39	2053 ± 7.9	1981 ± 53	7
2609-22.1	0.37	256	53	0.21	35	939 ± 21	1093 ± 26	1256 ± 44	14
2609-23.1	0.50	628	192	0.32	81	894 ± 20	1713 ± 14	1204 ± 49	48
3. ZJ-01 花岗岩麻岩, 湟源南约 5 km 处									
ZJ01-1.1	0.17	568	114	0.21	76.1	932 ± 12	944 ± 22	925 ± 26	1
ZJ01-2.1	0.42	132	47	0.37	17.3	910 ± 13	955 ± 57	988 ± 41	5
ZJ01-3.1	0.22	390	119	0.31	52.6	939 ± 12	936 ± 30	959 ± 22	0
ZJ01-4.1	0.54	285	82	0.30	38.7	941 ± 12	859 ± 36	901 ± 32	-10
ZJ01-5.1	0.76	3225	332	0.11	439	942 ± 11	929 ± 15	1093 ± 55	-1
ZJ01-6.1	0.13	382	107	0.29	51.4	937 ± 12	966 ± 27	952 ± 21	3
ZJ01-7.1	0.27	798	299	0.39	108	937 ± 12	910 ± 18	948 ± 18	-3
ZJ01-8.1	0.20	496	138	0.29	65.9	925 ± 12	922 ± 21	925 ± 20	0
ZJ01-9.1	0.16	667	149	0.23	87.5	914 ± 11	980 ± 16	888 ± 18	7
ZJ01-10.1	0.19	573	101	0.18	75.9	923 ± 12	912 ± 24	945 ± 31	-1
4. 86-1619 花岗岩麻岩, 榆中南马街山地区									
1619-1.1	0.01	978	76	0.08	125	896 ± 20	936 ± 14	922 ± 27	4
1619-2.1	0.00	797	187	0.24	106	927 ± 21	968 ± 16	950 ± 25	4
1619-3.1	0.03	822	493	0.62	107	908 ± 20	997 ± 15	942 ± 23	9
1619-3.2	0.04	658	119	0.19	85.0	902 ± 20	980 ± 23	970 ± 37	8
1619-4.1	0.13	176	58	0.34	22.9	908 ± 63	870 ± 32	906 ± 70	-4
1619-5.1	0.06	182	98	0.56	36.3	1348 ± 51	1366 ± 20	1349 ± 66	1
1619-5.2	0.00	340	122	0.37	44.0	905 ± 21	915 ± 21	932 ± 25	1
1619-6.1	0.05	322	128	0.41	44.6	964 ± 22	981 ± 37	991 ± 33	2
1619-6.2	0.03	475	122	0.26	62.7	921 ± 21	885 ± 34	892 ± 24	-4
1619-7.1	0.04	466	285	0.63	62.0	927 ± 22	916 ± 17	908 ± 24	-1
1619-8.1	0.08	297	72	0.25	49.8	1150 ± 38	1283 ± 41	1166 ± 45	10
1619-9.1	0.03	430	155	0.37	56.9	923 ± 21	940 ± 18	931 ± 32	2
1619-10.1	0.00	444	67	0.16	86.2	1314 ± 29	1546 ± 47	1060 ± 56	15
5. 87-1404 糜棱岩化花岗岩麻岩, 青海湖东北尕斯库勒地区									
1404-1.1	0.83	105	134	1.32	12.0	795 ± 16	585 ± 110	763 ± 24	-36
1404-2.1	0.28	225	325	1.49	25.2	787 ± 15	739 ± 43	794 ± 18	-7
1404-3.1	0.42	116	153	1.36	13.5	817 ± 16	659 ± 65	837 ± 22	-24
1404-4.1	0.28	131	83	0.66	14.2	762 ± 16	658 ± 53	846 ± 26	-16
1404-5.1	0.17	270	119	0.45	72.2	1743 ± 32	1745 ± 11	1791 ± 43	0
1404-6.1	0.66	107	78	0.75	12.1	798 ± 16	698 ± 65	781 ± 24	-14
1404-7.1	0.47	336	170	0.52	76.7	1513 ± 28	1701 ± 18	1487 ± 37	11
1404-8.1	0.06	226	96	0.44	87.9	2404 ± 41	2528 ± 7.6	2341 ± 54	5
1404-9.1	0.14	184	121	0.68	20.8	795 ± 18	792 ± 31	807 ± 23	0
1404-10.1	0.79	86	27	0.32	9.56	781 ± 17	688 ± 79	695 ± 46	-14
1404-11.1	0.70	105	98	0.97	11.4	767 ± 16	679 ± 76	764 ± 23	-13
1404-12.1	0.28	213	430	2.09	23.6	778 ± 15	736 ± 40	793 ± 17	-6
1404-13.1	0.17	396	243	0.63	45.8	813 ± 16	800 ± 24	804 ± 19	-2
1404-14.1	0.24	373	201	0.56	42.6	802 ± 15	772 ± 29	788 ± 20	-4
1404-15.1	0.27	59	35	0.61	21.7	2275 ± 42	2312 ± 17	2260 ± 60	2
1404-16.1	1.01	1003	12	0.01	65.1	462 ± 7	639 ± 130	1450 ± 1000	27
1404-17.1	1.41	1092	44	0.04	72.8	475 ± 5	577 ± 130	338 ± 230	18
1404-18.1	0.69	1083	32	0.03	70.1	466 ± 6	576 ± 74	655 ± 230	19
1404-19.1	0.10	1238	27	0.02	82.5	481 ± 6	596 ± 43	1014 ± 150	19

发光影像显示,大部分锆石具有圆形的核及具云雾状、不规则状的增生边等结构特征。此样品共在 23 锆石中进行 23 个点的测定,因受后期变质作用影响,测点大部分没有落在谐合线上,锆石年龄分布介于 882~3002 Ma,主要分布在元古代,仅一个测点为新太古代。

样品 ZJ-01 中锆石颗粒大多为柱状自形晶,长轴长度约在 100~150 μm ,长宽比约 2:1,晶面与晶面界棱线外形清楚完整,由阴极发光影像显示锆石内部具有震荡环带,且环带与晶面大致平行。此样品共测得 10 个数据点,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 (930 ± 8) Ma(MSWD = 3.6), Th/U 比值为 0.11~0.39,代表了花岗岩岩浆结晶年龄。

样品 86-1619 中锆石颗粒较大,多为柱状自形晶,长轴长度约在 200~250 μm ,长宽比约 3:1,晶面与晶面界棱线外形清楚完整,阴极发光影像显示岩浆结晶的震荡环带与晶面大致平行。此样品共在 10 个锆石中进行 13 个点的测定,其中 10 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 (918 ± 14) Ma(MSWD = 0.8),其余 3 个数据点则为中元古代(1150, 1314 和 1366 Ma)。点 5.1 及 5.2 分别为同一颗锆石的核部及幔部,核部(测点 5.1)Th/U 比值为 0.56, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (1366 ± 13) Ma; 幔部(测点 5.2)Th/U 比值为 0.37, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (915 ± 21) Ma,据此,核部年龄应为继承性锆石年龄,幔部则为岩浆结晶形成年代。

样品 87-1404A 中锆石颗粒大小约 100~200 μm ,因受后期糜棱岩化作用大多为破裂状。此样品共在 17 个锆石中进行 19 个点的测定,其中 11 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 (790 ± 12) Ma(MSWD = 1.8),其余 4 个数据点的年龄分别为 1701, 1745, 2312 和 2528 Ma。点 6.1 及 7.1 分别为同一颗锆石的幔部及核部,核部(测点 7.1)Th/U 比值为 0.52, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (1701 ± 18) Ma; 幔部(测点 6.1)Th/U 比值为 0.75, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (798 ± 16) Ma,由此推断,核部年龄应为继承性锆石年龄,幔部则为岩浆结晶形成年代。另测得锆石边部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 (472 ± 6) Ma(测点 16.1, 17.1, 18.1, 19.1),表示受到加里东期变质作用的影响。

4 讨论

4.1 祁连地块前寒武纪基底形成年代

有关祁连地块前寒武纪基底的地质年龄长久以

来争论不断,矛盾之处颇多。属基底下层中祁连西段野南山群被认为是下元古界,但全岩 Rb-Sr 同位素年龄却是 877 Ma^[14],中段的湟源群最初也被认为是下震旦统,但后来也被划为下元古界,但全岩 Rb-Sr 同位素年龄却是 1249.8 和 1414 Ma^[14]。同样的,马衔山群也被划归下元古界,但 K-Ar 同位素年龄为 1079 Ma,全岩 Rb-Sr 同位素年龄为 1062 Ma^[13]。郭进京等人^[20,21]研究湟源县东侵入于湟源群地层的花岗岩和基性岩脉(现已变质成角闪变粒岩),取得锆石 U-Pb 年龄 917 和 910 Ma,并认为湟源群的形成年龄应早于 917 和 910 Ma。另外,徐旺春等人^[12]通过对化隆地区与湟源群相当的化隆群中副片麻岩和片麻状花岗岩的研究,获得副片麻岩中碎屑锆石的年龄集中于 880~900 Ma 之间,加权平均年龄为 (891 ± 9) Ma,片麻状花岗岩中自形岩浆锆石的年龄为 (875 ± 8) Ma,故将化隆群的形成年代限定在 875~891 Ma 之间。

属于基底中层的党河群,湟中群和兴隆山群都被置于长城系,但 Rb-Sr 同位素年龄为 1122 和 1071 Ma^[13,14]。Gehrels 等人^[25]通过对中祁连西段属基底中层的党河群变质砂岩的研究,测得最年轻的碎屑锆石年龄为 (779 ± 32) Ma,此年龄应可认为是部分党河群形成年代的上限。

属于基底上层的托莱南山群、花石山群以及高加湾组,原先被认为是震旦系,但后来被划归为蓟县系。托莱南山群的顶部地层(即龚岔群)Rb-Sr 同位素年龄为 1039.5 Ma^[12]。

综合以上所述前人的研究结果,可以得知祁连地块前寒武纪基底的上中下三层虽然都被划归中、古元古代,但同位素年龄却都集中在晚中元古代到早新元古代。

本研究工作在大通地区采集属于祁连地块前寒武纪基底下层的湟源群上部层位的片岩,用 SHRIMP 法测得其中最年轻碎屑锆石的年龄为 (882 ± 20) Ma(图 3,表 1)。此年龄可视为基底下层湟源群上部层位沉积作用的年代上限,沉积作用年龄应小于 (882 ± 20) Ma。又测得青海湖北面尕斯地区花岗岩体中岩浆锆石的年龄为 (790 ± 12) Ma(图 3,表 1)。前人的资料也有相近的年龄报道^[10](表 2),所以祁连地块前寒武纪基底普遍存在此期深成岩浆活动,但上述片岩并无此年龄的信息。据此推断,湟源群上部层位沉积作用的下限大约是 790 Ma。在托勒牧场南方属野马南山群下部层位的片岩,其最年轻碎屑锆石的年龄为

表2 祁连地块基底火成岩岩浆锆石年龄

标本编号	岩石名称	位置	锆石年龄/Ma	实验方法	资料来源
1	ZJ-01	片麻状花岗岩	930 ± 8	SHRIMP	本研究
2	86-1619	片麻状花岗岩	918 ± 14	SHRIMP	本研究
3	87-1404(幔部)	片麻状花岗岩	790 ± 12	SHRIMP	本研究
4	87-1404(边部)	片麻状花岗岩	472 ± 6	SHRIMP	本研究
5	Q9739	黑云变粒岩-片麻岩	940 ± 30	TIMS	万渝生等人 ^[10]
6	Q9753	片麻状二长花岗岩	943 ± 28	TIMS 上交点	Wan 等人 ^[9]
7	Q9742	片麻状花岗闪长岩	943 ± 28	TIMS 上交点	Wan 等人 ^[9]
8	Q98100	片麻状钾质花岗岩	750 ± 30	TIMS	万渝生等人 ^[10]
9	BQ97354	花岗岩	917 ± 12	TIMS	郭进京等人 ^[20]
10	AQ97062	角闪变粒岩	910 ± 7	TIMS	郭进京等人 ^[20]
11	GA205	花岗质火山岩	922 ± 5	TIMS 上交点	Gehrels 等人 ^[34]

1016 Ma(图3, 表1), 此年龄为此层位沉积作用时代的上限。另外, 本研究也测得出露于湟源县南方约5 km处花岗片麻岩中岩浆锆石的年龄为(930 ± 8) Ma, 以及马衔山地区花岗片麻岩中岩浆锆石的年龄为(918 ± 14) Ma(图3, 表1)。郭进京等人^[20,21]和Wan等人^[9,10]也报道这两个地区存在同期深成岩浆活动(表2)。因此湟源县附近的湟源群和马衔山群沉积作用年代的上限应该是此期岩浆活动的年龄或更老。大通县附近的湟源群应位于基底下层的中上层位, 托勒牧场南方的野马南山群, 马衔山群和湟源县附近的湟源群应位于基底下层的中下层位。

4.2 祁连地块的归属与亲缘性

祁连地块的归属或亲缘性多年来也是争论不断。认识有两种: 一部分学者认为祁连地块本来就是华北地块的一部分, 在加里东期之前从华北地块裂解出来^[5-8], 另一部分学者持相反的意见, 他们认为祁连地块并非华北地块的一部分, 而是和扬子地块具有较强的亲缘性, 可能是从扬子地块(冈瓦纳大陆)裂解出来的^[9-12]。

本文拟从碎屑锆石的年龄频谱, 岩浆锆石的年龄和钨同位素模式年龄(T_{DM})等三方面来讨论祁连地块的归属或亲缘性的问题。由本研所得61个碎屑锆石U-Pb年龄所组成年龄频谱图所示(图4(a)), 与前人研究祁连地块党河群三件变质沉积岩中碎屑锆石年龄频谱颇为相似(图4(b))^[25], 两者碎屑锆石年龄皆主要广泛分布于元古代, 少部分分布于太古代。此种状况与华北克拉通相对应地层碎屑锆石年龄频谱大不相同: 由属华北地块西部的鄂尔多斯地块新元古代及寒武纪地层碎屑锆石年龄频谱^[26](图4(c)和(d))得知华北克拉通基底固结于1800 Ma的吕梁运动, 之后成为一稳定地台, 在新、中元古代无明显热事件发

生。而扬子地块元古代康定杂岩、莲沱组砂岩和太古代崆岭高级变质地体碎屑锆石的混合年龄频谱(图4(e)~(h))^[27-30]与祁连地块碎屑锆石年龄频谱(图4(a)和(b))较为相似, 祁连和扬子两地块均有明显的新、中元古代热事件的信息。其中新元古代的热事件(790~900 Ma)与Rodinia超级大陆的聚合和裂解有关^[29,31], 而属中元古代1.0~1.5 Ga的热事件应可与Columbia超级大陆的裂解和Grenville造山作用对比^[27,32]。另外跨中-古元古代1.5~2.0 Ga的碎屑锆石可能是扬子陆块上伴随Columbia超级大陆的聚合热构造事件的产物, 也就是和扬子陆块古元古代时的弧-陆碰撞和大陆增生有关^[30,32,33]。至于少数几个太古代碎屑锆石也应代表扬子陆块有太古代陆壳存在的信息^[29,30,33]。

本研究3件花岗片麻岩年代为(930 ± 8), (918 ± 14) Ma, 以及(790 ± 12) Ma(图3, 表1), 分别代表二次岩浆活动的年代。再结合前人的资料^[9,10,20,21,34](表2), 表明祁连地块在新元古代有两期重大的岩浆活动, 可与扬子地块新元古代晋宁早晚两期的岩浆活动对比^[31,35-43]。Wu等人^[31]在研究皖南花岗闪长岩时指出, 早期(ca. 900 Ma)的岩浆活动与Rodinia超大陆的聚合和伴随的弧-陆碰撞有关, 然后初生地壳被迅速风化沉积, 在晚期(ca. 820 Ma)则因Rodinia超大陆的裂解作用致使华南造山带拉张垮塌引起熔融, 形成皖南兼具类地幔特点的S型花岗岩。值得一提的是苏鲁造山带变质火成岩的原岩年代(700~800 Ma)^[44,45]和江南造山带岩浆活动(750~950 Ma)^[31,36-43]也都属新元古代的岩浆作用。另外, 徐旺春等人^[12]通过化隆地区与湟源群相当的化隆群的年代测定显示祁连地块新元古代时参与Rodinia超大陆聚合事件, 导致大陆地壳的再造作用(Continental reworking)相当快速, 可与

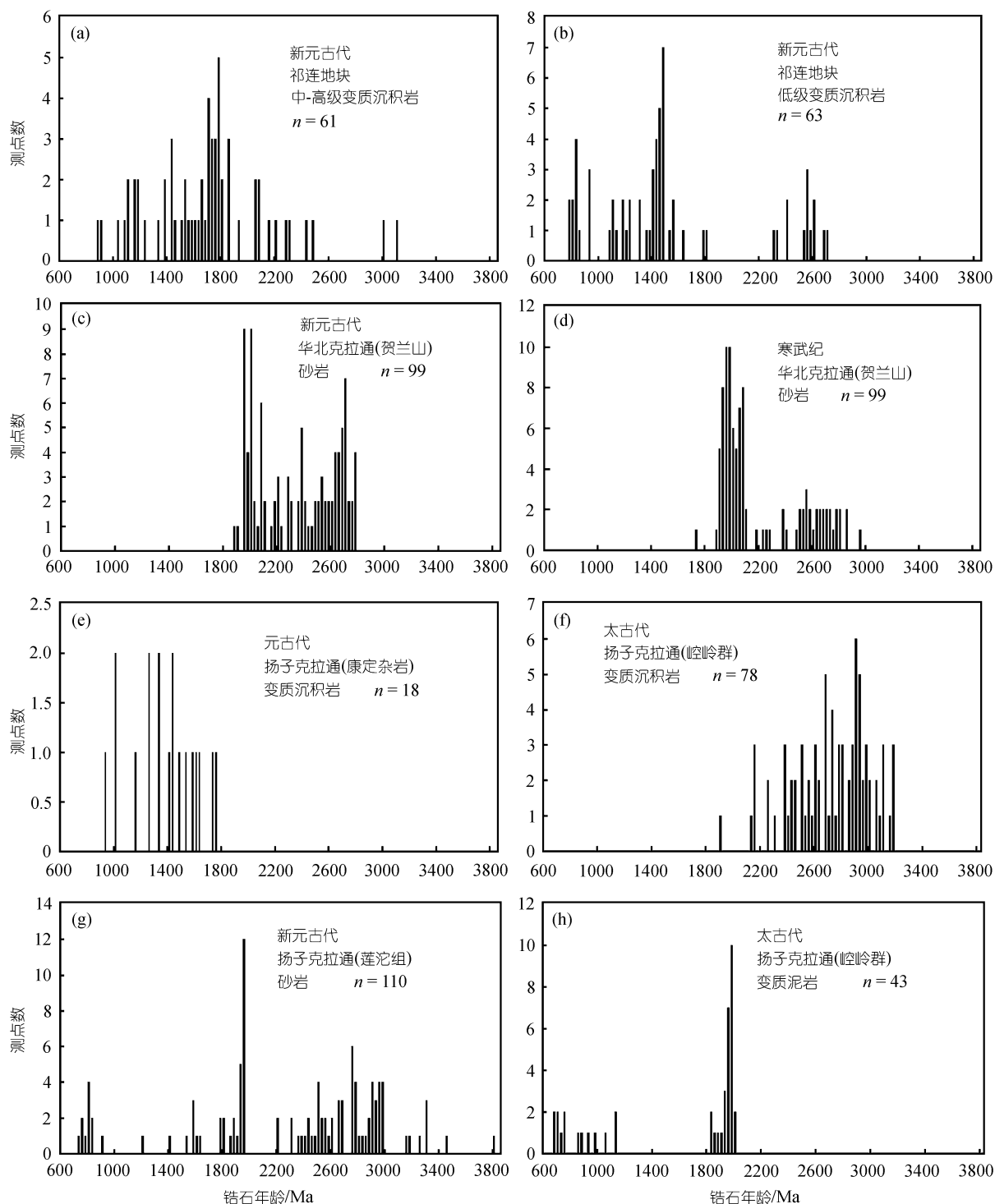


图 4 碎屑锆石年龄频谱

(a) 本研究: 祁连地块 2 个片岩(89-2105, 89-2609); (b) 祁连地块 3 个低度变质沉积岩, Gehrels 等人^[25]; (c) 贺兰山地区桌子山新元古代变质砂岩, Darby 和 Gehrels^[26]; (d) 贺兰山地区桌子山寒武纪砂岩, Darby 和 Gehrels^[26]; (e) 扬子地块康定杂岩, Li 等人^[27]; (f) 扬子地块崆岭群高级变质岩, 高山等人^[28]; (g) 扬子地块新元古代莲沱组砂岩, Zhang 等人^[29]; (h) 扬子地块崆岭群变质泥岩, Zhang 等人^[30]

Wu等人^[31]和Zhang等人^[29]所指出的扬子地块同时期也参与Rodinia超大陆聚合事件,致使大陆地壳的快速再造作用相对应。

另由前人研究所获得的钨同位素资料显示祁连山带深变质基底的模式年龄(T_{DM})主要介于1.87~2.26 Ga之间^[10],与华南板块中-古元古代以来陆壳物质的 T_{DM} 主要介于1.5~2.2 Ga之间^[46,47]较为相近,而与华北地块模式年龄(T_{DM})主要介于2.4~3.2 Ga之间^[48]相差较大。以上同位素年龄数据表明祁连地块与华北地块差异性较大,但与扬子地块可以对比,即与扬子地块的亲缘性较强,可能曾经是一个统一的地块。

地层对比和古生物的演化两方面也有证据支持上述论点。例如,扬子地块在晚震旦纪出现了以碳酸盐岩为主体,局部有含磷地层的大面积、连续性很好的统一盖层,被称之为灯影组^[35,49]。而祁连地块前寒武纪基底的上层(托莱南山群,花石山群,高加湾组),也是以碳酸盐岩为主,分布长达一千多公里大面积、连续性很好、局部含磷的地层。两者可以对比的可能性很高(图2),直接提供了祁连地块和扬子地块在震旦纪时是一个统一地块的证据。又如,覆盖于祁连地块前寒武纪基底之上中寒武纪毛家沟群以及拉脊山裂陷槽中的动物群在生态上与湘西和浙西同时期的动物群相同^[50]。因动物群的演化有其继承性,故祁连地块和扬子地块在新元古代时应有密切的亲缘关系。

据此,本研究推论祁连地块并非由华北地块裂解出来再拼贴回去的,而是与扬子地块在新元古代时可能是一个统一的地块,同属冈瓦纳大陆的一部分。

4.3 祁连地块的演化

上述资料表明祁连地块和扬子地块至少从晋宁早期起到晚震旦纪灯影期为止很可能是一个统一的陆块。到底何时祁连地块才从扬子地块裂解出来呢?一般认为是与Rodinia大陆裂解有关,也就是在伴随裂解所引发的岩浆活动(即晋宁晚期的岩浆活动,750~800 Ma)之后,裂解分开之后,祁连地块和扬子地块的演化就大不相同了:从地层的层序来看,扬子地块上从震旦纪进入古生代,地层大致上是连续稳定的沉积,海水一直到印支期才退出^[49,51]。祁连地块上则普遍缺乏下寒武纪的地层,其他古生代的地层也残缺不全^[13,14],尤其是在早古生代时,祁连地块可见以深成岩浆活动、区域变质作用、火山作用和裂谷

为主的一次强烈的大陆再活化作用,证据包括祁连地块上有很多加里东期的花岗岩体和裂陷槽^[13,14,52,53]。近年来多组Ar-Ar定年数据显示祁连地块前寒武纪基底湟源群和相当的地层从沉积岩变质成中-深变质岩是发生在加里东期^[54~58],本工作所测得的尕斯库勒地区花岗片麻岩中锆石增生边部的年代为 (472 ± 6) Ma(表2)。这些资料表明祁连地块在早古生代时确有一次明显而强烈的大陆再活化作用,其动力来源可能与柴北缘大陆板块的深俯冲有关。柴北缘的超高压变质岩的原岩年代为750~800 Ma^[59,60],其深俯冲作用主要发生在加里东期(参考年代420~500 Ma)^[60~64]。祁连地块尕斯库勒地区糜棱岩化花岗片麻岩中锆石的形成与增生边部的年代,分别为 (790 ± 12) 和 (472 ± 6) Ma,可能正反映此深俯冲事件。曾建元等人^[65]最近在北祁连缝合带的中段与东段的变质杂岩中,发现了2个新元古代(年代分别为 (776 ± 10) 和 (774 ± 23) Ma)的浅变质侵入岩(岩性分别为花岗岩与石英闪长岩),在年代与岩性上也可和大别-苏鲁造山带浅变质侵入岩作对比。至于动力学机制,可能如同Zheng等人^[66]研究大别-苏鲁造山带所提的被动陆缘加积楔模型。大别-苏鲁造山带中,扬子地块北缘被动陆缘加积楔主要由新元古代-早古生代浅变质沉积岩和新元古代浅变质花岗岩所组成^[44,67,68]。而祁连地块上前述的晚中元古-新元古代变质岩和新元古代花岗片麻岩可能也是被动陆缘上的加积楔。换言之,祁连地区和大别-苏鲁造山带在板块构造格局上颇为相似,不同的是前者形成于加里东期,后者形成于印支期^[44,66]。

先前的研究认为祁连地块是从华北地块在新元古代时裂解出来,形成裂谷,再大洋化成古祁连洋,然后在奥陶-志留纪时随古祁连洋的闭合再拼贴回去^[5~8]。本研究认为祁连地块并非由华北地块裂解出来再拼贴回去,而是与扬子地块在新元古代时同属冈瓦纳大陆的一部分。所谓的古祁连洋其实就是原本存在于劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间的大洋,即原特提斯洋的一部分。祁连地块是在新元古代大陆裂解事件之后,在晚震旦纪末(灯影期之后)从冈瓦纳大陆裂解出来,形成当时原特提斯大洋中的陆块,于早古生代(~400~450 Ma)时随古祁连洋的闭合^[64,69~73],与阿拉善地块聚合形成北祁连褶皱带。所以北祁连早古生代蛇绿岩(例如大盆大坂,495 Ma^[74],玉石沟蛇绿岩,550 Ma^[75],东草河蛇绿岩,497 Ma^[76],老虎山蛇绿岩,453 Ma^[77],百经寺蛇绿岩,502 Ma^[78])应是原

特提斯蛇绿岩, 而古祁连洋也应是原特提斯洋的一部分.

5 结论

() 湟源群和野马南山群是祁连地块前寒武纪基底的下层, 其沉积成岩时期主要在晚中元古代-早新元古代, 其下限是 (790 ± 12) Ma, 上限大约 1016 Ma. 在早古生代时遭受区域变质作用, 形成目前所见中-深变质岩.

() 祁连地块有两期新元古代花岗岩浆活动, 可与扬子地块晋宁早晚两期花岗岩浆活动对比.

() 祁连地块和扬子地块亲缘性很强, 在扬子地块的灯影期之前两者很可能是一个统一的陆块, 同属冈瓦纳大陆的一部分. 在灯影期之后, 从扬子地块分裂出来, 成为原特提斯洋中的一个孤立的地块, 并且朝向阿拉善地块运动. 于下古生代时随着古祁连洋的闭合, 和阿拉善地块聚合, 造成北祁连造山带. 故古祁连洋应是原特提斯洋的一部分, 北祁连蛇绿岩应是原特提斯蛇绿岩.

() 早古生代时, 祁连地块有与柴北缘大陆板块深俯冲作用有关的大陆再活化作用, 发生了强烈的花岗岩浆的活动, 达角闪岩相的变质作用, 中-基性火山岩喷发, 以及大陆裂隙作用.

致谢 作者对两位审稿专家、特邀编辑及编委会所提出的宝贵修改意见, 杨经绥教授在野外工作上的帮助, 以及陶华在 SHRIMP 定年工作时的帮助, 在此一并深表谢意.

参 考 文 献

- 任纪舜, 主编. 中国及邻区大地构造图(1:5000000). 北京: 地质出版社, 1997
- 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 等. 秦岭及祁连山构造发展史. 国际交流地质学术论文集. 北京: 地质出版社, 1978. 174—178
- 陈隽璐, 陈有仓, 李海平, 等. 祁连与北秦岭结合部位陇山岩群与秦岭岩群对比讨论. 陕西地质, 2002, 20(2): 39—49
- 冯益民, 曹宣锋, 张二朋, 等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. 西北地质, 2003, 36(1): 1—10
- 邱凤歧. 北祁连加里东裂谷. 青藏高原地质文集, 1984, 14: 41—60
- 左国朝, 刘寄陈. 北祁连早古生代大地构造演化. 地质科学, 1987, (1): 14—24
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连、秦岭山系海相火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社, 1996
- Wan Y S, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geochemical characteristics of the Maxianshan complex and Xinglongshan group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt. J Geol Soc China, 2000, 43(1): 52—68
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成. 地球学报, 2003, 24(4): 319—324
- Wan Y S, Zhang J X, Yang J S, et al. Geochemistry of high-grade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 174—184[DOI]
- 徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. 科学通报, 2007, 52(5): 531—538
- 甘肃省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质学报-区域地质第 19 号甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989
- 青海省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质学报-区域地质第 24 号青海省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 甘肃省地质矿产局. 全国地层多重划分对比研究甘肃省岩石地层(62). 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
- 青海省地质矿产局. 全国地层多重划分对比研究青海省岩石地层(63). 中国地质大学出版社, 1997
- 邢裕盛. 中国地层 3-中国的前寒武系. 北京: 地质出版社, 1989
- 《中国地层典》编委会. 中国地层典古元古界. 北京: 地质出版社, 1991
- Smith A D, Wen D J, Huang L Y, et al. Constraints from gneisses in the Qilian fold belt for the position of the north china block in the Proterozoic. J Geol Soc China, 2000, 43(1): 81—93
- 郭进京, 赵风清, 李怀坤, 等. 中祁连东段湟源群的年代学新证据及其地质意义. 中国区域地质, 2000, 19(1): 26—31
- 郭进京, 赵风清, 李怀坤. 中祁连中段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义. 地球学报, 1999, 20(1): 10—15
- Compston W, Williams I S, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. Proceedings of the 14th Lunar and Planetary Science Conference, Part 2. J Geophys Res, 1984, 89: B525—534
- 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]
- Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.4. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochron Centre Spec Publ, 2000, 1—56
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. GSA Bull, 2003, 115(7): 881—896
- Darby B J, Gehrels G. Detrital zircon reference for the North China block. J Asian Earth Sci, 2006, 26(6): 637—648[DOI]
- Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. Geology, 2002, 30(2): 163—166[DOI]
- 高山, Qiu Y, 凌文黎, 等. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究——扬子克拉通 > 3.2Ga 陆壳物质的发现. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(1): 27—35
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 252: 56—71[DOI]
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South

- China. *Precambrian Res*, 2006, 151: 265—288[DOI]
- 31 Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Rework of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res*, 2006, 146: 179—212[DOI]
 - 32 Rogers J J W, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Res*, 2002, 5(1): 5—22[DOI]
 - 33 Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China. *Precambrian Res*, 2006, 146: 16—34[DOI]
 - 34 Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2003, 108(B9): ETG-5-1-14
 - 35 白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 中国前寒武纪地壳演化. 第二版. 北京: 地质出版社, 1993. 1—259
 - 36 Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, south China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Res*, 2003, 122: 111—140[DOI]
 - 37 Li X H. U-Pb zircon ages granites from the southern margin of the Yangtze block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly. *Precambrian Res*, 1999, 97: 43—57[DOI]
 - 38 Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. Neoproterozoic granitoids in south China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Res*, 2003, 122: 45—83[DOI]
 - 39 Li X H, Li Z X, Sinclair J A, et al. Revisiting the “Yanbian Terrane”: implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze block, south China. *Precambrian Res*, 2006, 151: 14—30[DOI]
 - 40 Li Z X, Zhang L H, Powell C M. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 1995, 23(5): 407—410[DOI]
 - 41 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 Res*, 2003, 122: 85—109[DOI]
 - 42 Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gond Res*, 2006, doi:10.1016/j.gr.2006.09.001
 - 43 Zhou M F, Ma Y X, Yang D P, et al. The Yanbian terrane(southern Sichuan province, S W China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block. *Precambrian Res*, 2006, 144: 19—38[DOI]
 - 44 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. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 4145—4165[DOI]
 - 45 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158[DOI]
 - 46 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 从花岗岩的 Sm-Nd 同位素探讨华南中下地壳的组成、性质和演化. *高校地质学报*, 1999, 5(4): 361—371
 - 47 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101—133[DOI]
 - 48 Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the north China craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523—545[DOI]
 - 49 马文璞. 区域构造解析——方法理论和中国板块构造. 北京: 地质出版社, 1992. 1—308
 - 50 周志强, 曹宣锋, 赵江天, 等. 祁连山东部早古生代地层和沉积-构造演化. *西北地质科学*, 1996, 17(1): 1—58
 - 51 项礼文, 等. 中国地层 4-中国的寒武系. 北京: 地质出版社, 1981
 - 52 吴才来, 杨经绥, Ireland T, 等. 祁连南缘噶喇山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. *岩石学报*, 2001, 17(2): 215—221
 - 53 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因. *现代地质*, 2004, 18(1): 70—74
 - 54 刘思好. 中国中祁连湟源群变质泥岩之温压演化与地体构造隐示. 中坳: 中央大学硕士学位论文, 1997. 1—178
 - 55 林宗祺. 北祁连造山带中西段基盘岩地球化学及年代学研究. 台南: 成功大学硕士学位论文, 2002. 1—131
 - 56 林伯炫. 北祁连褶皱带门源及其邻近地区基盘岩之大陆回春作用. 台南: 成功大学硕士学位论文, 2002. 1—136
 - 57 张博翔. 北祁连下元古界湟源地块北缘之岩石学及定年研究. 台南: 成功大学硕士学位论文, 2003. 1—320
 - 58 戚学祥, 张建新, 李海兵, 等. 北祁连南缘右行韧性走滑剪切带的同位素年代学及其地质意义. *地学前缘*, 2004, 11(4): 469—479
 - 59 Yang J S, Zhang J X, Meng F C, et al. Ultrahigh pressure eclogites of the north Qaidam and Altun Mounains, NW China and their protoliths. *Earth Sci Front*, 2003, 10: 291—314
 - 60 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]
 - 61 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]
 - 62 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]
 - 63 Yang J S, Xu Z Q, Dobrzynetska 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]
 - 64 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 Planet Sci Lett*, 2005, 234: 99—118[DOI]
 - 65 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 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. *科学通报*, 2006, 51(5): 575—581
 - 66 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. *Inter Geol Rev*, 2005, 47: 851—871
 - 67 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-Sci Rev*, 2003, 62: 105—161[DOI]
- 68 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. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L07616, doi: 10.1029/2004GL019785
- 69 Wu H Q, Feng Y M. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 523—536[DOI]
- 70 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段-增生杂岩/火山弧的时代探讨. *岩石矿物杂志*, 1997, 16(2): 112—119
- 71 宋述光. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 352—365
- 72 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *J Petrol*, 2006, 47(3): 435—455[DOI]
- 73 Liu Y J, Neubauer N, Genser J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies pelitic schists from Qingshuigou in the Northern qilian Mountains, western China. *Island Arc*, 2006, 15: 187—198, doi: 10.1111/j.1440-1738.2006.00508.x
- 74 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001
- 75 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
- 76 Tseng C Y, Yang H Y, Liu D, et al. Igneous petrology, geochemistry and geochronology of the Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Fold Belt, NW China. *EOS Trans AGU*, 2003, 84: 46
- 77 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 1996. 1—153
- 78 Zhang J X, Meng F C, Wan Y S. A cold Early Paleozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 285—304[DOI]