

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

徐旺春 张宏飞* 柳小明

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069. * 联系人, E-mail: hfzhang@cug.edu.cn)

摘要 祁连山高级变质岩系的形成时代至今尚未得到有效限制。利用激光等离子体质谱(LA-ICPMS)对祁连山化隆群副片麻岩中的锆石及侵入于化隆群中弱片麻状花岗岩中的锆石进行了U-Pb定年, 据此限定化隆群的形成时代。结果表明, 化隆群副片麻岩中的碎屑锆石主要为岩浆成因类型, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄主要集中于880~900 Ma之间, 加权平均年龄为(891 ± 9) Ma, 该年龄代表副片麻岩沉积物源区火成岩的岩浆结晶年龄, 同时代表了化隆群形成时代的下限; 弱片麻状花岗岩的自形岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年加权平均年龄为(875 ± 8) Ma, 代表了化隆群形成时代的上限。因此, 将化隆群的形成时代限定在875~891 Ma之间。上述2个样品中的锆石U-Pb年龄还显示有1000~1700 Ma的古老锆石, 同时还显示有早古生代变质事件的年龄信息。锆石年龄结构反映了祁连山和柴达木北缘具有统一的地壳基底, 并且表明祁连山基底具有扬子型块体的构造属性。结果还表明化隆群碎屑岩系是全球Rodinia超大陆聚合事件所导致的强烈造山作用, 地壳快速隆升与剥蚀, 并快速堆积的产物。

关键词 锆石 U-Pb 定年 化隆群 高级变质岩系 构造意义 祁连山

祁连造山带是中国中央造山带的重要组成部分。自板块构造理论引入祁连造山带以来^[1], 人们对祁连造山带的构造格局及其构造演化等方面取得了大量的研究成果^[2-8], 但这些研究以显生宙地质体为主要研究对象。近期, 对位于祁连山造山带南侧的柴达木盆地北缘早古生代超高压带变质岩的研究取得了大量的研究成果^[9-13], 其中, 根据获得的超高压带片麻岩和祁连山基底的年龄信息及两者具有相同的泥盆系沉积盖层, 认为柴达木北缘与祁连山带具有统一的前寒武纪基底, 称之为柴达木-祁连克拉通, 并且认为柴达木北缘超高压变质岩形成于该克拉通内部大陆深俯冲环境^[13]。在祁连造山带的中祁连块体上, 前寒武纪变质岩系分布较为广泛, 如湟源群、化隆群和马衔山群等, 这些变质岩系对研究祁连造山带形成的早期地质背景具有重要科学意义。在现有研究中, 人们一般将这些变质岩系的形成时代厘定为新太古代或古元古代^[14,15]。然而, 由于缺乏高精度的年代学资料, 这使得祁连山前寒武纪变质岩系的形成时代具有很大程度的不确定性。郭进京等人^[16]对位于中祁连块体湟源群中的变质火山岩进行了锆石

U-Pb年代学研究, 认为湟源群的形成时代在900 Ma左右, 并根据化隆群岩石组合、构造变形和变质作用特征等方面的研究, 认为化隆群是湟源群的下覆岩系, 时代应在新太古代(?)-古元古代^[17]。化隆群是中祁连块体中变质程度最高的一个岩群, 其变质程度达到高角闪岩相。万渝生等人^[18]利用TIMS方法获得侵入于化隆群片麻岩的钾质花岗岩锆石U-Pb年龄为(750 ± 30) Ma, 但这一年龄未能有效地限制化隆群主体片麻岩类的形成时代。本文利用激光等离子体质谱(LA-ICPMS), 对化隆群黑云母斜长片麻岩(副片麻岩)中碎屑锆石及侵入其中的弱片麻状花岗岩锆石进行微区原位U-Pb定年, 据此限制化隆群的形成时代, 并讨论祁连山基底形成时代的区域构造意义。

1 地质背景及样品特征

中祁连块体是夹持于祁连造山带南祁连块体和北祁连块体之间的一个前寒武纪中间块体。该块体的东段南侧以青海湖南山-古雷断裂为界与西秦岭造山带相接, 北侧以中祁连北缘断裂为界与北祁连加里东褶皱带相邻(图1)。化隆群位于中祁连地块东段,

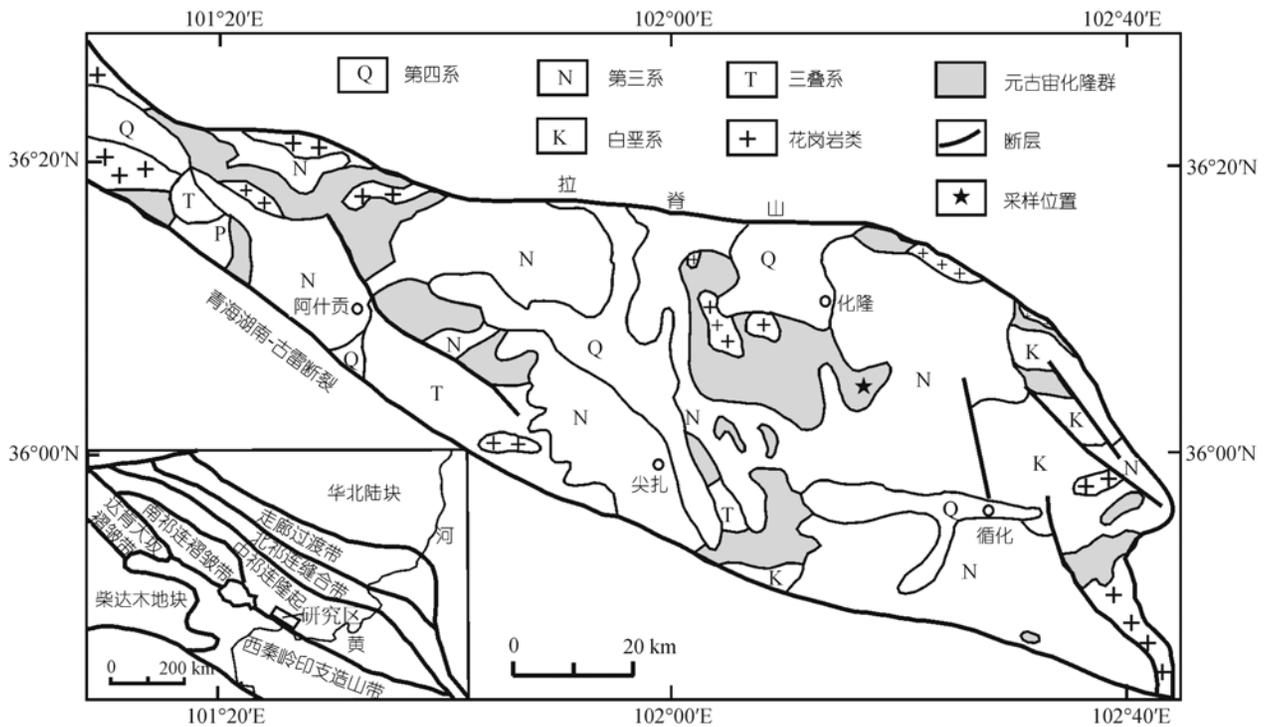


图 1 祁连山化隆群分布简图
插图示研究区在祁连造山带中的大地构造位置

主体由(含石榴子石)黑云母斜长片麻岩和黑云母钾长片麻岩组成, 含少量 (含石榴子石)斜长角闪岩和石英岩, 总体变质程度达高角闪岩相. 斜长角闪岩呈团块或似层状分布于片麻岩类中, 而石英岩呈层状产出, 但分布较为有限. 在化隆群中, 常见有花岗岩脉多期侵入. 根据岩相学特征和接触关系, 它们可分为早期的弱片麻状中-粗粒花岗岩脉和晚期的中细粒花岗岩脉, 花岗岩脉宽度从几厘米到 10 m 以上不等. 在野外露头上, 化隆群岩石常见有混合岩化现象和流变构造, 表明该岩群曾位于中下地壳. 本文样品采于化隆县往南通往循化县省级公路旁的化隆群露头. 用于锆石 U-Pb 定年的两个样品岩相学特征描述如下:

() 样品 HL-13: 黑云母斜长片麻岩, 中-细粒变晶结构, 片麻状构造, 主要矿物组成为石英(~32%)、斜长石(~35%)、钾长石(~8%)、黑云母(~15%)、白云母(~5%)、矽线石(~1%)和石榴子石(~1%)及锆石等其他副矿物, 长石类矿物呈它形粒状. 根据该样品的岩相学特征, 并结合该样品中含有大量碎屑锆石的组成, 表明该样品的原岩应为沉积碎屑岩类. 另外, 根据获得的该类岩石的化学组成(作者将另文发表)对原岩性质的地球化学判别, 也进一步证实了该类岩石的

原岩属于沉积碎屑岩类; () 样品 HL-4: 弱片麻状花岗岩, 以岩脉产于黑云母斜长片麻岩中(图2). 岩石为中-粗粒结构, 弱片麻状构造, 主要矿物组成为石英(~34%)、钾长石(~35%)、斜长石(~20%)、黑云母(~7%)、白云母(~3%)和少量锆石等副矿物. 长石类矿物呈自形-半自形.



图 2 弱片麻状花岗岩脉(图中浅色部分)与黑云母斜长片麻岩的接触关系

2 分析方法

锆石分离在廊坊地质服务有限公司进行. 锆石

阴极发光图像在中国科学院地质与地球物理研究所 Cameca电子探针仪上完成. LA-ICPMS锆石U-Pb年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Elan6100DRC型ICP-MS与德国Lambda Physik公司的 ComPex102ArF准分子激光器联机系统上进行. 激光束斑直径为30 μm. 实验中采用He作为剥蚀物质的载气. 应用美国国家标准NIST SRM610 进行仪器最佳化. 锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质. 采样方式为单点剥蚀, 每完成5个锆石点的测定, 加测91500一次; 每完成10个锆石点的测定, 加测一次NIST SRM610. 详细的测试方法及仪器参数见参考文献 [19]. 每个锆石微区原位测试点的同位素比值、U-Pb表面年龄和元素含量计算采用GLITTER程序, 加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot [20].

3 结果

片麻岩样品HL-13 中的锆石大多具有次圆状和浑圆状外形(图3(a)和(b)), 并存在许多细小不规则状的锆石颗粒, 具碎屑锆石的典型特征 [21]. 在阴极发光图像上, 这些碎屑锆石大多具有岩浆型锆石的环带结构(图3(a)), 表明原岩物质主要来自于火成岩的剥蚀区; 少量锆石环带不明显或呈面状分带(图3(b)), 这类锆石在CL图像上呈灰白色, 表明它们可能为老锆石. 花岗岩样品HL-4 中的锆石一般较为自形(图3(c)和(d)), 呈长柱或短柱状, 粒长100~200 μm, 长宽比2:1~3:1, 大部分锆石有明显的韵律环带结构, Th/U比值介于0.1~0.5之间, 显示岩浆结晶锆石的特征 [22]; 少部分锆石的Th/U比值小于0.1, 在CL图像上无环带或环带不明显, 表明它们受到变质事件的影响. 另外, 该样品中还存在少量继承锆石, 它们一

般分布在锆石的核部(图3(d)). 在上述两个样品中, 锆石普遍存在核-边结构或核-幔-边结构, 但边部宽度很窄.

表1列出了样品HL-13和HL-4中所测锆石颗粒的U-Pb同位素定年结果. 由于²⁰⁴Pb记数较低, 一般小于2 μg/g, 且绝大部分分析点²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb>150, 故本文未对普通铅进行校正. 此外, 由于所测样品具有较为古老的年龄(>800 Ma), 本文采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄进行加权平均计算.

对样品HL-13进行了20个锆石点的分析. 其中, 15个点为具明显韵律环带的浑圆状或次圆状锆石, 5个为无环带或具面状分带的锆石. 由图4(a)可见, 所有韵律环带的浑圆状或次圆状锆石分析点都存在不同程度的Pb丢失, 个别锆石测定点(如HL-13.04)具有明显偏低的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄(544 Ma)和<0.1的Th/U比值, 表明锆石可能受到祁连山早古生代变质事件的影响. 但这些锆石测定点可以构成一条较好的不一致线, 上交点年龄为(892 ± 15) Ma, 它们的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄主要分布于880~900 Ma之间, 所有这类锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄加权平均值为(891 ± 9) Ma (MSWD = 1.5), 在误差范围内与这些锆石的上交点年龄一致. 因此, 锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄应该代表了物源区的火成岩岩浆结晶年龄. 无环带或具面状分带的锆石分析点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄分布于1000~1660 Ma之间(图4(b)), 表明该样品含有较为古老的地壳组份.

对样品HL-4中的锆石进行了42个点分析. 其中, 对具有韵律环带的自形-半自形岩浆锆石, 分析了34个点. 由图5(a)可见, 除少数几个分析点外, 其他测定点都表现出一定程度的不一致性, 部分锆石的U-Pb年龄具有明显的不谐和性, 并具有明显偏低的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄(<580 Ma), 它们的Th/U比值小于0.1, 表明这些锆石可能同样受到祁连山早古生代变质事件的影响. 将所有锆石测定点计算获得上交点年龄为(879 ± 14) Ma (图5(a)). 图5(a)中的插图和谐和程度较好的一组年龄分布, 其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄为(875 ± 8) Ma (MSWD = 1.3), 与所有点获得的不一致线上上交点年龄(879 ± 14) Ma在误差范围内一致. 在所有测定点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄柱状分布图上(图5(b)), ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb峰值年龄为884 Ma. 该年龄与图4(b)显示的样品HL-13的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb峰值年龄885 Ma几乎一致. 考虑到²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb峰值年龄只代表测定点

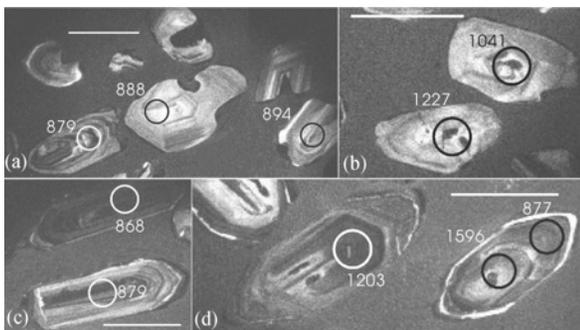


图3 样品HL-13和HL-4锆石阴极发光(CL)图像
圆圈示激光束斑的剥蚀范围. 数字为该点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄, 单位Ma. 短白线为标尺, 长度100 μm. (a), (b)为HL-13代表性锆石; (c), (d)为HL-4代表性锆石

表 1 化隆群副片麻岩及花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

分析点	U ²³⁸	Th ²³²	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	/μg·g ⁻¹			比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ	年龄 /Ma	±1σ	年龄 /Ma	±1σ	年龄 /Ma	±1σ
样品 HL-13(黑云斜长片麻岩)															
HL-13.01	658	86	0.13	0.06835	0.00095	1.08234	0.01119	0.11487	0.00059	879	13	745	5	701	3
HL-13.02	306	49	0.16	0.06864	0.00121	1.25915	0.01870	0.13306	0.00083	888	20	828	8	805	5
HL-13.03	779	273	0.35	0.06851	0.00098	1.25961	0.01384	0.13336	0.00071	884	14	828	6	807	4
HL-13.04	714	53	0.07	0.06853	0.00125	0.83155	0.01299	0.08802	0.00055	885	22	614	7	544	3
HL-13.05	338	107	0.32	0.07002	0.00123	1.26482	0.01878	0.13102	0.00082	929	20	830	8	794	5
HL-13.06	391	66	0.17	0.06875	0.00106	1.15355	0.01425	0.12169	0.00068	891	16	779	7	740	4
HL-13.07	449	75	0.17	0.06885	0.00128	1.06916	0.01705	0.11262	0.00073	894	22	738	8	688	4
HL-13.08	358	105	0.29	0.06973	0.00100	1.29468	0.01423	0.13465	0.00072	920	14	843	6	814	4
HL-13.09	890	276	0.31	0.10194	0.00141	1.71356	0.01765	0.12191	0.00068	1660	11	1014	7	742	4
HL-13.10	155	100	0.65	0.06838	0.00105	1.50479	0.01866	0.15959	0.00092	880	16	932	8	954	5
HL-13.11	359	64	0.18	0.08125	0.00153	1.36859	0.02226	0.12216	0.00085	1227	21	876	10	743	5
HL-13.12	916	339	0.37	0.07249	0.00110	1.14067	0.01384	0.11412	0.00064	1000	16	773	7	697	4
HL-13.13	399	111	0.28	0.06979	0.00120	1.26559	0.01832	0.1315	0.00082	922	19	830	8	796	5
HL-13.14	378	97	0.26	0.06740	0.00119	1.22946	0.01854	0.13228	0.00084	850	21	814	8	801	5
HL-13.15	624	69	0.11	0.06809	0.00096	1.24335	0.01351	0.13243	0.00071	871	14	820	6	802	4
HL-13.16	132	110	0.83	0.07009	0.00145	1.40340	0.02585	0.14520	0.00107	931	26	890	11	874	6
HL-13.17	832	139	0.17	0.07400	0.00099	1.40716	0.01382	0.13790	0.00072	1041	12	892	6	833	4
HL-13.18	582	339	0.58	0.08172	0.00136	1.28039	0.01777	0.11362	0.00072	1239	17	837	8	694	4
HL-13.19	98	85	0.87	0.06863	0.00259	1.28309	0.04642	0.13559	0.00171	888	54	838	21	820	10
HL-13.20	309	71	0.23	0.06824	0.00127	1.30009	0.02096	0.13816	0.00093	876	22	846	9	834	5
样品 HL-4(花岗岩)															
HL-4.01	162	71	0.44	0.06691	0.00161	1.31162	0.02910	0.14218	0.00119	835	32	851	13	857	7
HL-4.02	223	109	0.49	0.06706	0.00115	1.33889	0.01959	0.14482	0.00091	840	20	863	9	872	5
HL-4.03	294	94	0.32	0.06857	0.00102	1.38103	0.01641	0.14609	0.00083	886	15	881	7	879	5
HL-4.04	665	301	0.45	0.06829	0.00081	1.25125	0.00982	0.13290	0.00064	877	9	824	4	804	4
HL-4.05	862	206	0.24	0.06797	0.00082	1.28966	0.01061	0.13762	0.00067	868	9	841	5	831	4
HL-4.06	351	175	0.50	0.08026	0.00137	2.12853	0.03092	0.19235	0.00131	1203	18	1158	10	1134	7
HL-4.07	764	84	0.11	0.06256	0.00116	0.77009	0.01238	0.08929	0.00056	693	24	580	7	551	3
HL-4.08	448	225	0.50	0.06501	0.00095	1.00421	0.01160	0.11203	0.00061	775	15	706	6	685	4
HL-4.09	820	155	0.19	0.08906	0.00097	2.45434	0.01557	0.19988	0.00093	1405	6	1259	5	1175	5
HL-4.10	2104	156	0.07	0.06402	0.0009	0.81649	0.00875	0.09250	0.00048	742	14	606	5	570	3
HL-4.11	681	342	0.50	0.06778	0.00083	1.33289	0.01127	0.14262	0.00070	862	10	860	5	859	4
HL-4.12	250	86	0.34	0.06833	0.00098	1.37782	0.01532	0.14625	0.00080	879	14	880	7	880	4
HL-4.13	579	88	0.15	0.06841	0.00104	1.28103	0.01563	0.13581	0.00077	881	16	837	7	821	4
HL-4.14	4604	58	0.01	0.05671	0.00066	0.45031	0.00338	0.05759	0.00026	480	9	377	2	361	2
HL-4.15	387	210	0.54	0.08643	0.00121	2.40842	0.02611	0.20209	0.00117	1348	12	1245	8	1187	6
HL-4.16	183	229	1.25	0.09851	0.00138	2.97817	0.03197	0.21927	0.00131	1596	11	1402	8	1278	7
HL-4.17	235	60	0.26	0.06755	0.00122	1.25840	0.01944	0.13511	0.00087	855	21	827	9	817	5
HL-4.18	502	127	0.25	0.06833	0.00085	1.42754	0.01218	0.15152	0.00074	879	10	901	5	909	4
HL-4.19	581	183	0.31	0.06634	0.00091	1.07742	0.01101	0.11779	0.00061	817	13	742	5	718	4
HL-4.20	119	115	0.97	0.07606	0.00141	1.85136	0.02987	0.17652	0.00124	1097	21	1064	11	1048	7
HL-4.21	1512	158	0.10	0.06096	0.00082	0.60629	0.00594	0.07213	0.00035	638	13	481	4	449	2
HL-4.22	257	70	0.27	0.06659	0.00109	1.18793	0.01601	0.12939	0.00076	825	18	795	7	784	4
HL-4.23	1893	59	0.03	0.05974	0.00073	0.64803	0.00529	0.07868	0.00037	594	10	507	3	488	2
HL-4.24	212	41	0.19	0.06826	0.00115	1.27947	0.01810	0.13595	0.00083	876	19	837	8	822	5
HL-4.25	613	77	0.13	0.06827	0.00080	1.34822	0.01000	0.14323	0.00067	877	8	867	4	863	4
HL-4.26	651	95	0.15	0.06872	0.00082	1.23622	0.00954	0.13047	0.00062	890	8	817	4	791	4
HL-4.27	752	267	0.36	0.06868	0.00090	1.29033	0.01221	0.13625	0.00069	889	11	841	5	823	4
HL-4.28	984	77	0.08	0.06867	0.00077	1.30268	0.00852	0.13757	0.00062	889	7	847	4	831	4
HL-4.29	703	62	0.09	0.06732	0.00079	1.26715	0.00931	0.13652	0.00063	848	8	831	4	825	4
HL-4.30	6819	99	0.01	0.05861	0.00063	0.54121	0.00307	0.06697	0.00029	553	6	439	2	418	2
HL-4.31	616	61	0.10	0.06701	0.00085	1.07664	0.00950	0.11653	0.00057	838	10	742	5	711	3
HL-4.32	848	21	0.02	0.06066	0.00099	0.64194	0.00857	0.07675	0.00043	627	19	504	5	477	3
HL-4.33	403	135	0.33	0.06399	0.00090	0.83711	0.00881	0.09488	0.00048	741	14	618	5	584	3
HL-4.34	223	58	0.26	0.06788	0.00114	1.34381	0.01879	0.14358	0.00087	865	19	865	8	865	5
HL-4.35	394	193	0.49	0.09947	0.00111	2.89949	0.01868	0.21141	0.00099	1614	6	1382	5	1236	5
HL-4.36	344	45	0.13	0.06916	0.00093	1.41948	0.01399	0.14886	0.00077	904	12	897	6	895	4
HL-4.37	334	53	0.16	0.06435	0.00114	0.86829	0.01292	0.09786	0.00059	753	21	635	7	602	3
HL-4.38	251	173	0.69	0.09668	0.00133	3.06970	0.03182	0.23028	0.00134	1561	11	1425	8	1336	7
HL-4.39	589	41	0.07	0.06893	0.00092	1.34251	0.01289	0.14127	0.00072	897	12	864	6	852	4
HL-4.40	544	49	0.09	0.06722	0.00105	1.08537	0.01350	0.11712	0.00066	845	17	746	7	714	4
HL-4.41	287	81	0.28	0.09753	0.00123	3.26220	0.02839	0.24260	0.00129	1577	9	1472	7	1400	7
HL-4.42	367	67	0.18	0.07015	0.00098	1.44648	0.01508	0.14955	0.00079	933	13	908	6	898	4

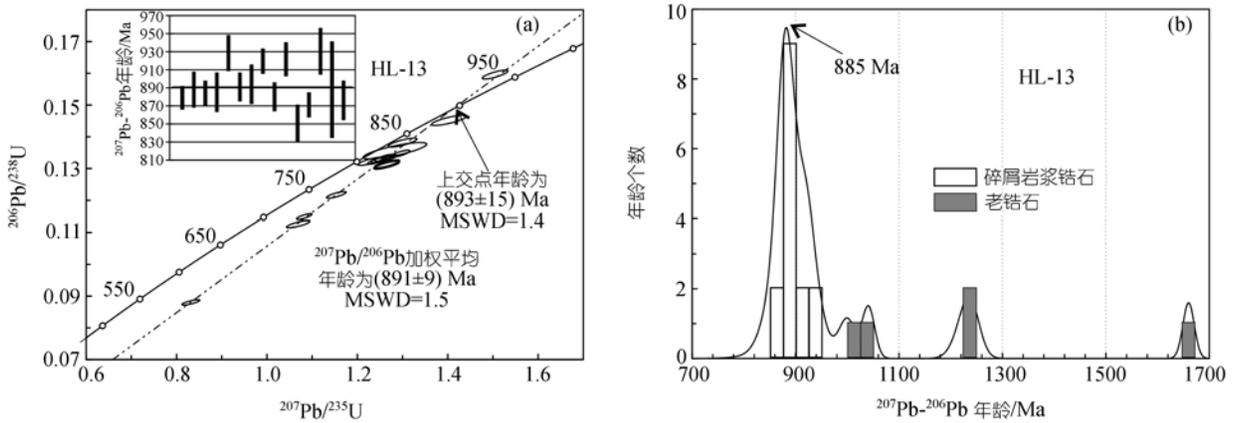


图4 (a) 样品 HL-13 碎屑锆石 U-Pb 谐和图; (b) 样品 HL-13 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄柱状分布图

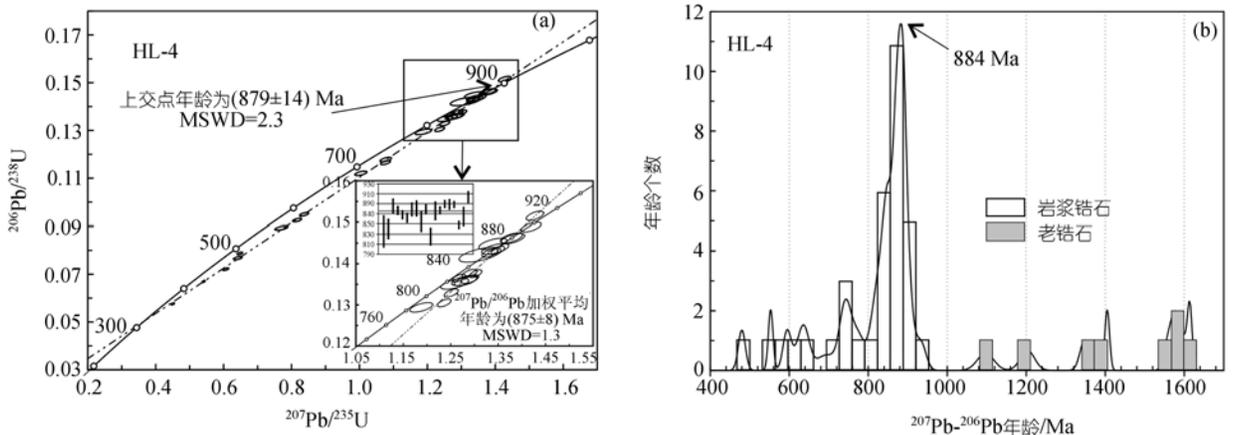


图5 (a) 样品 HL-4 锆石 U-Pb 谐和图; (b) 样品 HL-4 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄柱状分布图

的高频年龄分布情况，并且在花岗岩类锆石年代学的研究中，一般选用加权平均年龄或上交点年龄代表样品的实际形成年龄。对于样品 HL-4 而言，由于上交点年龄(879 ± 14) Ma 与 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄(875 ± 8) Ma 较为相近，因此，本文建议选用上交点年龄(879 ± 14) Ma 或 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄(875 ± 8) Ma 代表该花岗岩的岩浆结晶年龄更为合理。另外，在该样品中分析了无环带或环带不明显的锆石颗粒或核 8 个点，²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化于 1000~1700 Ma 之间(图5(b))，反映了该样品中含有继承锆石的年龄信息。

4 化隆群的形成时代及其构造意义

上述锆石 U-Pb 年龄结果可以较好地限制化隆群的形成时代。化隆群副片麻岩的碎屑锆石 U-Pb 低值年龄可作为化隆群形成时代的下限，而侵入其中的花岗岩的岩浆结晶年龄可作为化隆群形成时代的上

限。根据样品 HL-13 所获得的碎屑岩浆锆石 U-Pb 年龄，化隆群的形成年龄应小于(891 ± 9) Ma; 而根据侵入化隆群的片麻状花岗岩样品 HL-4 所获得的岩浆结晶年龄，化隆群的形成年龄应大于(875 ± 8) Ma。因此，化隆群的形成时代应介于 875~891 Ma 之间的一个较小范围内，由此反映祁连山带基底岩系的形成时代主要在新元古代，而不是先前认为的新太古代-古元古代。化隆群形成时代的限定表明化隆群不是祁连山湟源群的下覆岩系。另一方面，祁连山基底高级变质岩系碎屑锆石年龄与柴北缘超高压带的片麻岩中获得的碎屑锆石年龄信息(909~2192 Ma^[13])相近，进一步证实了柴达木和祁连山具有统一基底的认识^[13]。

化隆群中大量的碎屑岩浆锆石反映化隆群片麻岩的源岩物质主要为受剥蚀的岩浆岩类，其 U-Pb 年

龄与侵入化隆群的花岗岩岩浆结晶年龄之差在 16 Ma 左右, 如果考虑到它们的年龄测量误差, 则它们的年龄之差最大值不超过 33 Ma. 这意味着化隆群的物源区从岩浆侵入到隆升剥蚀、搬运、沉积在不到 33 Ma 的时间范围内完成, 由此反映了剥蚀区快速隆升与剥蚀过程, 因而指示了新元古代一次强烈的造山作用. 化隆群碎屑岩系是由这次强烈的造山运动所导致的山体快速隆升、快速剥蚀与堆积的产物, 这也一致于化隆群碎屑岩浆锆石大多数具有次圆状的外形特征. 该结果类似于澳大利亚 Arunta 南部地区变沉积岩的锆石年代学研究结果 [23], 该研究表明从变沉积岩的沉积到麻粒岩相变质作用及产生的花岗质熔体在不到 20 Ma 的时间范围内完成, 反映了该区地壳快速的地球动力学过程.

化隆群(891 ± 9) Ma 的碎屑岩浆锆石年龄与祁连山及其邻区塔里木、秦岭、柴达木盆地、欧龙布鲁克块体和龙首山块体中获得的 9~10 亿年的构造岩浆事件年龄基本一致 [13,16,18,24~27], 它们共同反映了中国西部受全球新元古代 Rodinia 超大陆聚合事件的影响 [28,29]. 新近在徐淮地区发现的(976 ± 24) Ma 的岩浆事件可能反映了 Rodinia 超大陆聚合事件影响到华北块体的南缘 [30]. 本文的研究不仅提供了祁连山受全球 Rodinia 超大陆聚合事件影响的年代学证据, 而且还提供了这次事件所产生的强烈造山作用、山体快速隆升的证据. 祁连山北侧龙首山地区金川超基性岩中锆石和斜锆石 U-Pb 年龄为 825 Ma [27], 其形成可能与 Rodinia 超大陆裂解有关.

根据祁连山基底和花岗岩类 Pb-Nd 同位素地球化学研究, 祁连山块体应具有扬子型块体的构造属性 [31]. 本文获得的锆石 U-Pb 年龄可以对祁连山块体的构造属性提供进一步的证据. 从化隆群碎屑锆石和侵入于化隆群中花岗岩的锆石 U-Pb 年龄结构看, 祁连山存在新元古代岩浆事件(891~875 Ma). 尽管这一新元古代的岩浆事件明显早于标志扬子块体新元古代岩浆事件(825~740 Ma) [32~35], 但扬子块体同时也存在 910~870 Ma 的岩浆事件 [32,36]1), 而在华北块体明显缺少这一时期的岩浆事件. 因此, 910~870 Ma 也是扬子块体标志性岩浆事件. 祁连山新元古代 891~875 Ma 的岩浆事件与扬子块体所发生的岩浆事件相似. 另外, 祁连山同时也具有扬子块体典型岩浆

事件年龄 775 Ma [18,37], 从而从岩浆事件上再次证明了祁连山基底具有扬子型块体的构造属性. 这一致于祁连山北侧的龙首山地区也应属于扬子型块体构造属性的认识 [27], 反映了扬子型块体的分布具有较大的范围.

5 结论

根据化隆群副片麻岩中的碎屑锆石和侵入于化隆群中的花岗岩的锆石 U-Pb 定年, 将化隆群的形成时代限制于 875~891 Ma 之间的新元古代, 中祁连块体主要由形成于新元古代的基底岩块组成, 目前尚未有新太古代或早元古代基底的岩石记录. 化隆群形成时代的确定支持了前人关于祁连山与柴达木具有统一基底的认知. 化隆群碎屑岩系是全球 Rodinia 超大陆聚合事件所导致的强烈造山作用, 山体快速隆升与剥蚀, 并快速堆积的产物. 碎屑锆石和花岗岩锆石 U-Pb 年龄结构再次证明了祁连山基底具有扬子型块体的构造属性.

致谢 感谢吴元保博士在本文锆石 U-Pb 年龄解释上与作者进行的有益讨论. 感谢三位匿名评审专家对本文的评审及提出的建设性意见.

参 考 文 献

- 1 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(1). 北京: 地质出版社, 1978. 174—187
- 2 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. 地质学报, 1978, 54(4): 287—295
- 3 Zhang Z M, Coleman R G, Liou J G. An outline of the plate tectonics of China. Geol Soc Am Bull, 1984, 95: 295—312 [DOI]
- 4 左国朝, 刘寄栋. 北祁连早古生代大地构造演化. 地质科学, 1987, (1): 42—45
- 5 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. 1—266
- 6 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—234
- 7 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山元古宙末-寒武纪主动大陆裂谷火山作用. 地球学报, 1996, 17: 282—292
- 8 许志琴, 徐惠芳. 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
- 9 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]
- 10 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 isotopic constraints. Lithos, 2005, 84: 51—76 [DOI]

1) Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution. Precam Res, 2007 (in press)

- 11 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]
- 12 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]
- 13 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: 435—455[DOI]
- 14 青海省地矿局. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991. 1—752
- 15 潘桂堂, 丁俊. 青藏高原及邻区地质图(附说明书). 成都: 成都地图出版社, 2004
- 16 郭进京, 赵凤清, 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: 26—31
- 17 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中祁连地块东段元古宙基底湟源群沉积构造环境. *西北大学学报(自然科学版)*, 1999, 29: 343—347
- 18 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: 319—324
- 19 Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostan Geoanal Res*, 2004, 28: 353—370[DOI]
- 20 Ludwig K R. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geological Survey Open-File Report, 1991. 39
- 21 Davis D W. U-Pb geochronology of Archean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics. *Precambrian Res*, 2002, 115: 97—117[DOI]
- 22 Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 469—500[DOI]
- 23 Scrimgeour I R, Kinny P D, Close D F, et al. High-*T* granulites and polymetamorphism in the southern Arunta Region, central Australia: Evidence for a 1.64 Ga accretional event. *Precambrian Res*, 2005, 142: 1—27[DOI]
- 24 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 塔地木器与扬子新元古代热事件-构造事件特征、序列和时代: 扬子与塔里木连接假设. *地质前缘*, 2003, 10: 321—326
- 25 Wan Y S, Yang J S. Geochemical characteristics of the Maxianshan complex and Xinglongshan group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt. *J Geol Soc China*, 2000, 43: 52—68
- 26 Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. *Geol Soc Amer Bull*, 2003, 115: 881—896[DOI]
- 27 Li X H, Su L, Chung S L, et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume? *Geochem Geophys Geosys*, 2005, 11: 1—16
- 28 Li Z X, Li X X, 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: 163—166[DOI]
- 29 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. *地质前缘*, 2004, 11: 515—523
- 30 柳永清, 高林志, 刘燕学, 等. 徐淮地区新元古代初期镁铁质岩浆事件的锆石 U-Pb 定年. *科学通报*, 2005, 50(22): 2514—2521
- 31 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 等. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性. *地球科学*, 2006, 31: 57—65
- 32 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义. *岩石学报*, 2006, 22: 387—396
- 33 Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Res*, 2003, 122: 45—83[DOI]
- 34 Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196: 51—67[DOI]
- 35 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]
- 36 Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res*, 2006, 146: 179—212[DOI]
- 37 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