

# 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和 扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

苗来成 刘敦一 张福勤 范蔚茗 石玉若 顾颀强

(中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室, 北京 100029; 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037. E-mail: [miaolc@mail.igcas.ac.cn](mailto:miaolc@mail.igcas.ac.cn))

**摘要** 大兴安岭北部的兴华渡口群和扎兰屯群长期以来一直被认为是古元古代变质岩, 代表兴安和额尔古纳地块的前寒武纪基底, 但这种认识缺乏可信的同位素年代学及古生物资料的支持. 采用高精度离子探针(SHRIMP)对黑龙江新林-韩家园子地区出露的兴华渡口群中变质火成岩和变质碎屑岩和内蒙古扎兰屯地区的扎兰屯群变火山岩进行了锆石 U-Pb 定年研究. 结果表明: 兴华渡口群中的变火成岩类形成于(506±10)~(547±46) Ma, 属早寒武世-中寒武世, 变碎屑岩中碎屑锆石年龄谱中出现大量的 1.0~1.2, 1.6~1.8 和 2.5~2.6 Ga 的年龄, 说明其成岩时代至少 <1.0 Ga; 扎兰屯群绿泥片岩(变基性火山岩类)形成年龄为(506±3) Ma. 这些资料说明兴华渡口群和扎兰屯群均形成于寒武纪或晚元古代, 而不是先前认识的古元古代. 变火成岩中古老继承或捕获锆石和变碎屑岩中大量前寒武纪碎屑锆石的存在, 暗示这些岩石可能形成于古大陆边缘. 结合岩性及其组合特征, 认为兴华渡口群及扎兰屯群代表寒武纪或晚元古界活动大陆边缘的火山-沉积建造, 但具体的陆缘类型还有待进一步研究.

**关键词** 锆石 SHRIMP 变质岩 兴华渡口群 扎兰屯群 大兴安岭

当代中亚造山带研究中一个重要的问题是鉴别哪种变质杂岩是被改造的前寒武纪基底, 又有哪些变质杂岩是在地壳增生和碰撞造山过程中遭受过变质改造的新元古代末和显生宙建造. 本文试图通过对北兴安岭地区变质杂岩的定年研究来探讨这一问题.

中国大兴安岭北部分布较多的变质杂岩, 前人根据出露地点的不同将它们分别赋予不同的变质地层名称, 如“兴华渡口群”、“落马湖群”、“新开岭群”、“风水沟河群”、“加疙瘩群”和“扎兰屯群”等<sup>[1,2]</sup>(图 1), 并认为它们代表兴安-额尔古纳地块的前寒武纪基底<sup>[3~9]</sup>. 由于缺少化石, 在变质杂岩时代归属上, 前人主要依据其变质程度和当时对区域构造关系认识, 将兴华渡口群和扎兰屯群划为古元古代, 而新开岭群、落马湖群和风水沟河群则被划为新元古代<sup>[1,3,10]</sup>. 然而, 最近的研究表明, 原划为新元古代的“新开岭群”是与晚古生代-早中生代造山作用过程有关的变质杂岩, 其原岩年龄仅为(336±2) Ma, 变质年龄为(216±2) Ma<sup>[11]</sup>, 说明原来对变质杂岩时代

的推测可能存在较大的问题. 本文报导对原划为古元古代的兴华渡口群和扎兰屯群的锆石 SHRIMP 定年研究结果, 并初步探讨其构造意义.

## 1 地质背景

大兴安岭北部以大面积中生代花岗岩和火山岩发育为主要特征, 前中生代变质杂岩和地层主要以大小不等的残片“漂浮”于这些花岗岩中(图 1). 该区域的变质岩主要包括兴华渡口群、落马湖群、新开岭群、风水沟河群、加疙瘩群和扎兰屯群.

兴华渡口群分布于黑龙江的漠河、塔河、呼玛、新林、松岭等地区, 被划分为兴华和兴安桥 2 个岩组<sup>[1]</sup>. 兴华组岩性主要为斜长角闪(片)岩、变粒岩、片岩、片麻岩和混合岩; 兴安桥组岩性主要为含富铝矿物的各类片岩、片麻岩夹大理岩及少量磁铁石英岩. 兴华渡口群总体上遭受了高绿片岩相-低角闪岩相的变质作用. 对该群曾报导过 1729 和 1157 Ma 两个相差较大的 Sm-Nd 等时线年龄<sup>[1,10]</sup>(具体资

2006-08-04 收稿, 2007-01-15 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 40473030, 40234045)、中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-104)和中国科学院矿产资源重点实验室资助

料不祥). 落马湖群、新开岭群和风水沟河群出露于大、小兴安岭接合部位(图 1). 除不含大理岩外, 岩性组合及变质程度大体与兴华渡口群相似 [1], 其中的新开岭群的锆石SHRIMP(原岩)年龄 336~290 Ma, 锆石变质增生边年龄(216±2) Ma [11]. 加疙瘩群分布于内蒙古境内额尔古纳河流域, 主要表现为一套以银灰色绢云石英片岩和灰绿色绿泥石英片岩为主的

变沉积-火山岩建造, 变质程度达绿片岩相. 迄今还未见有关该群的年龄报道. 扎兰屯群分布于内蒙古布达哈旗的扎兰屯附近, 为内蒙区测队命名. 其岩性以绿泥片岩、绿泥石英片岩和黑云角闪长片岩及斜长角闪(片)岩为主, 夹少量的变质砂岩等. 内蒙古自治区地质矿产局根据变质作用及岩性对比, 认为扎兰屯群相当于兴华渡口群的下部层位 [12].

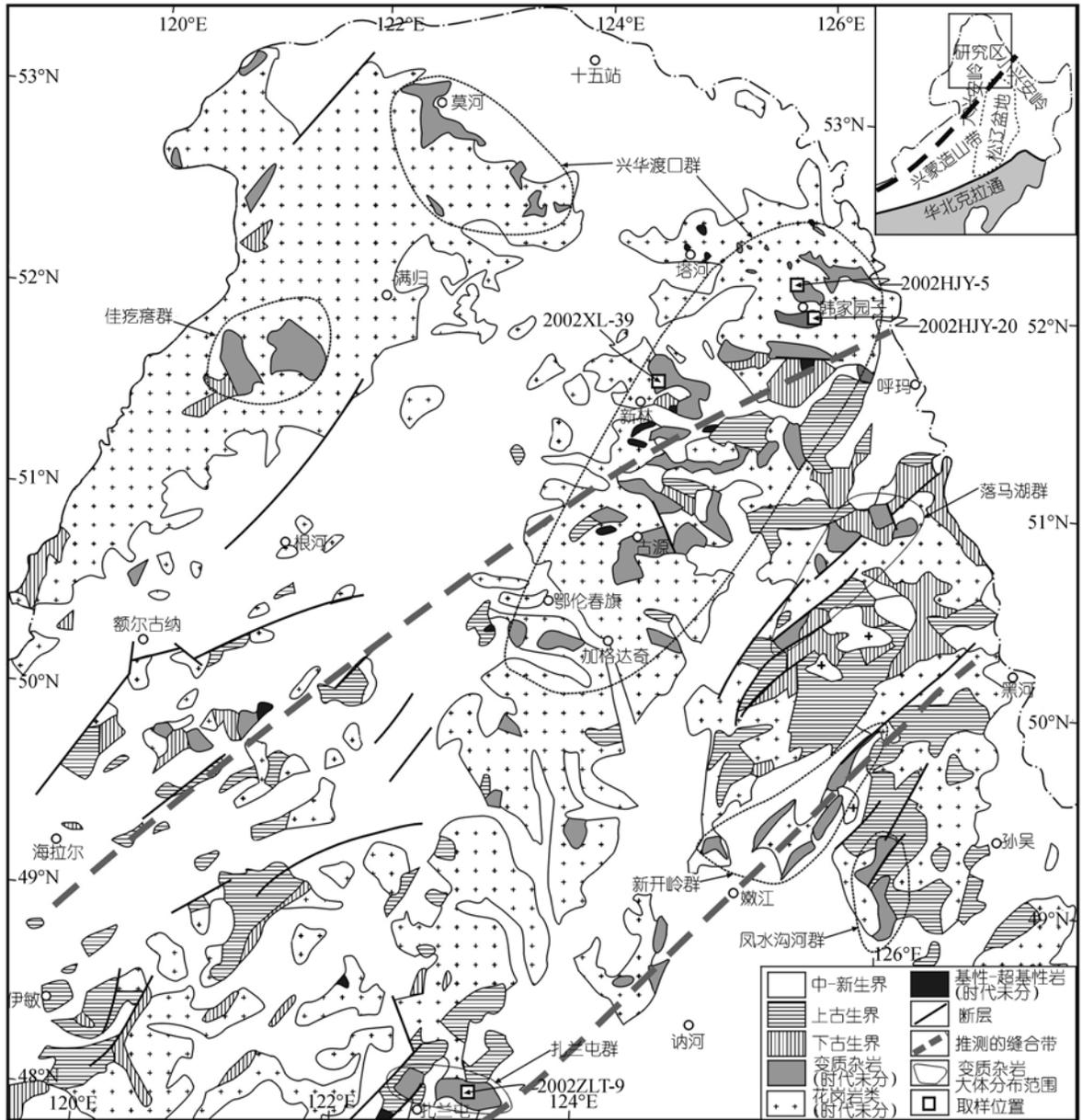


图 1 大兴安岭北部地质简图  
据文献 [1, 2, 5] 修改

区域上, 前中生代未变质地层主要分布于大、小兴安岭接合部位及内蒙博克图-雅克石一带(图 1)。此外, 区域上花岗岩十分发育, 其时代以古生代和中生代为主。黑龙江塔河以北侵入到兴华渡口群变质杂岩的花岗岩曾被认为是元古代花岗岩, 但新的研究表明其侵位于早古生代<sup>[12]</sup>。另外, 侵入其中的辉长岩原也认为是元古代岩体, 但其锆石 U-Pb 年龄仅(333±8) Ma<sup>[13]</sup>。

## 2 样品描述

我们对取自原被划为兴华渡口群和扎兰屯群的 4 个样品进行了锆石 SHRIMP 定年研究(取样位置见图 1)。样品 2002HJY-5 取自黑龙江呼玛县的韩家园子北约 15 km (GPS 坐标: 52°07'44.1"N, 125°37'18.4"E), 可能相当于原来所划分的“兴安桥组”。该样品岩性为含十字石榴二云片岩, 主要由白云母(25~30 vol%)<sup>1)</sup>、石英(25~30 vol%)、斜长石(20~25 vol%)、黑云母(10~15 vol%)和石榴石(10 vol%±)及少量十字石(<5 vol%)组成。白云母为片状, 常见有石英、斜长石和黑云母的包体, 具波状消光和晶体扭曲现象; 黑云母呈红褐-浅黄色片状, 局部见锆石包体, 周围见放射晕。云母类矿物呈明显的定向排列。斜长石和石英均呈它形粒状、浑圆状, 斜长石具绢云母化, 聚片双晶不发育; 石英具波状消光和亚颗粒化, 局部可见石英三晶呈 120°角相接触现象。石榴石呈浅黄色粒状, 有的内包小的石英颗粒。十字石呈浅黄色, 柱状, 柱面平行消光, 局部具绢云母化。副矿物主要为锆石和电气石。上述矿物组合及特征反映该样品原岩应为泥砂质沉积岩类。

2002HJY-20 样品采自黑龙江呼玛县韩家园子东南约 10 km (GPS 坐标: 51°58'49.7"N, 125°44'48.1"E), 岩性为绿帘石化斜长角闪片岩。岩石为细粒变晶结构, 可见弱的片理化, 主要由普通角闪石(40 vol%±)、斜长石(35 vol%±)、绿帘石(15 vol%±)、石英(5~10 vol%±)和少量透辉石(<5 vol%)组成。普通角闪石呈深绿-浅黄绿色柱状, 半定向或杂乱排列, 多被绿帘石和浅色阳起石交代, 局部被黑云母交代, 有的内包有斜长石、钛铁矿及榍石矿物。斜长石部分仍保留半自形板状晶形, 具弱的绿帘石化和绢云母化, 局部可见环带结构; 部分则已完全被绿帘石交代。绿帘石主要为交代矿物, 多呈集体体不均匀

分布。石英呈它形粒状及团块状, 相对成带集中分布, 波状消光及亚颗粒化明显。透辉石它形粒状或柱状, 部分被角闪石和阳起石交代。副矿物主要有锆石、磷灰石、钛铁矿、榍石等。据矿物组成推断, 该样品的原岩可能是中基性的火山岩类。

样品 2002XL-39 取自黑龙江新林镇东北约 20 km (GPS 坐标: 51°45'7.7"N, 124°27'54.0"E), 岩性为黑云钾长透辉角闪片岩, 似片麻状构造, 鳞片粒状变晶结构, 主要矿物组成为角闪石(35~40 vol%)、黑云母(20 vol%±)和钾长石(25~30 vol%±)及少量透辉石(5 vol%±)、斜长石(5 vol%±)和绿帘石(5 vol%±)。角闪石呈深绿-浅黄绿色柱状, 有的内见少量透辉石残留, 但被黑云母、次闪石、绿帘石交代。黑云母呈褐-浅黄褐色片状, 见波状消光和曲折现象, 局部被绿帘石交代。透辉石呈短柱状, 浅绿色, 多色性不明显, 多被角闪石、次闪石、碳酸盐交代而呈残留体。钾长石为微斜长石, 它形粒状, 表面洁净, 无蚀变。斜长石呈它形粒状, 具强烈葡萄石化, 并被钾长石交代。绿帘石呈黄至无色柱状。岩石内浅色长石和镁铁矿物具明显的定向排列, 并发育有微裂隙, 被碳酸盐、绿帘石等充填。副矿物为榍石、锆石及黄铁矿。上述矿物组成表明, 该岩石原岩可能为中基性火山岩或侵入岩类。

样品 2002ZLT-9 取自内蒙古扎兰屯市东北约 20 km (GPS 坐标: 48°03'51.3"N, 123°07'15.9"E), 岩性为绿泥片岩, 片状构造, 显微鳞片变晶结构。主要由绿泥石(>95 vol%)和少量绿帘石(<5 vol%)组成。绿泥石呈细小鳞片状(约 0.05 mm), 半定向排列, 有的呈脉状沿裂隙分布。绿帘石呈细小粒状或柱状(0.02~0.05 mm), 均匀散布于岩石中。副矿物主要为磷灰石和锆石。从岩石结构和矿物成分推断, 其原岩可能为基性火山岩或凝灰岩。

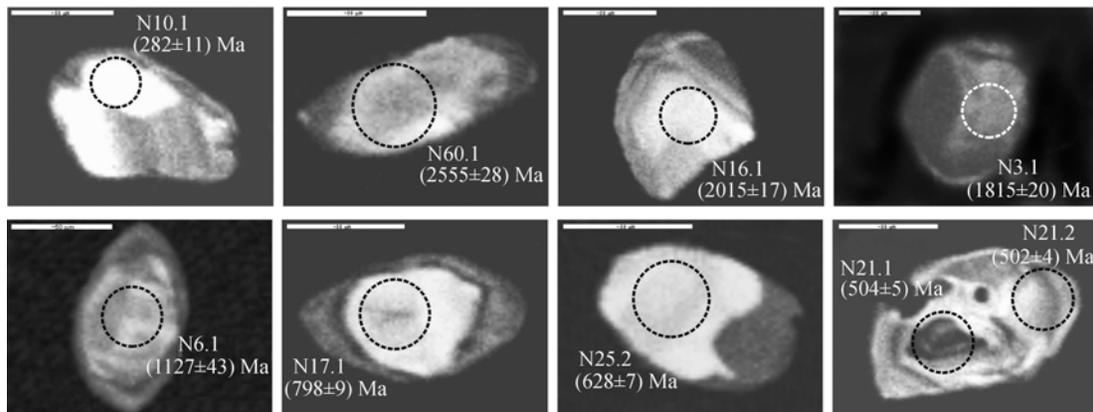
## 3 分析结果

对上述 4 个样品进行了锆石 SHRIMP U-Th-Pb 分析, 具体的分析方法和过程见文献<sup>[14~17]</sup>。在 SHRIMP 分析之前, 首先对锆石进行了阴极发光 (CL) 成像研究, 以查明锆石的内部结构。4 个样品代表性锆石的 CL 图像如图 2 所示, U-Th-Pb 分析结果列于表 1, 并示于图 3。

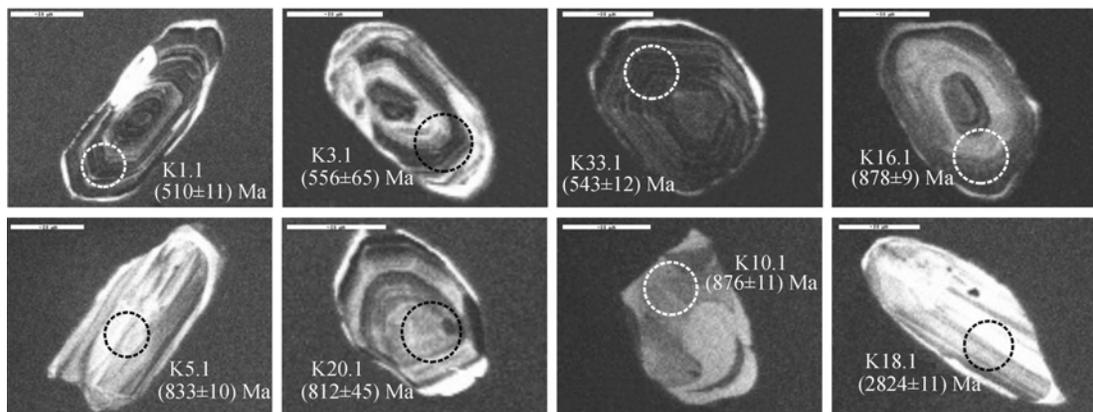
2002HJY-5 样品中的锆石绝大多数呈浑圆状或

1) vol% 表示体积百分数, 下同

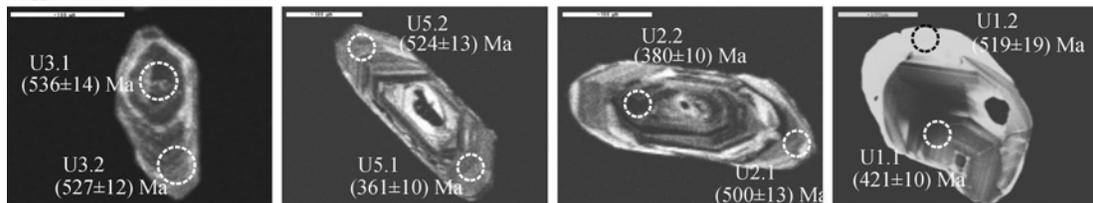
样品2002HJY-5



样品2002HJY-20



样品2002XL-39



样品2002ZLT-9

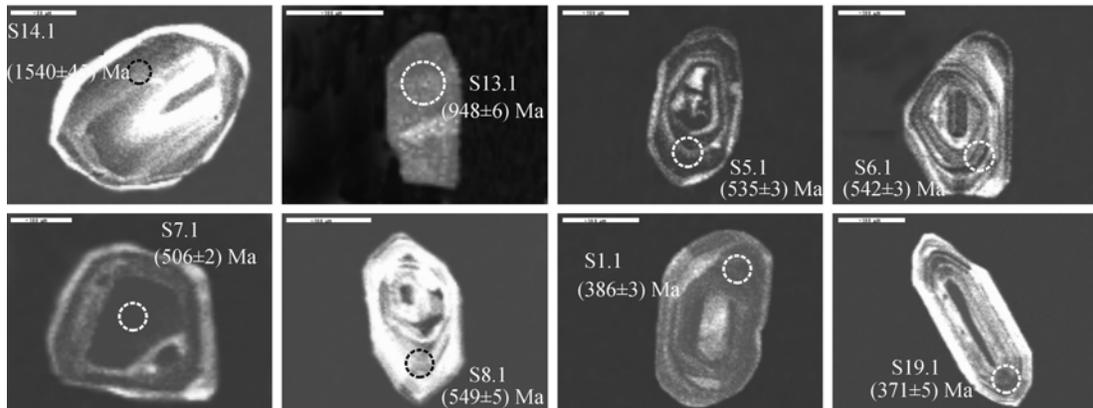


图2 代表性锆石阴极发光(CL)图像及 SHRIMP 测点位置

表 1 大兴安岭北部变质杂岩锆石 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果<sup>a)</sup>

测点 编号	U / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/U	$f_{206}$ /%	$^{206}\text{Pb}^*$ / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	
						比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	年龄/Ma	$\pm$	年龄/Ma	$\pm$
样品 2002HJY-5															
N1.1	330	66	0.21	0.02	92	0.1130	0.6	5.035	0.9	0.3233	0.6	1806	9	1848	12
N2.1	332	174	0.54	0.05	139	0.1709	0.5	11.500	1.1	0.4882	1.0	2563	20	2566	8
N3.1	135	60	0.46	0.07	37	0.1110	1.1	4.818	1.4	0.3149	0.8	1765	13	1815	20
N5.1	302	7	0.02	0.17	53	0.0787	1.3	2.218	1.5	0.2044	0.6	1199	7	1165	27
N6.1	154	132	0.88	0.31	25	0.0772	2.2	2.017	2.4	0.1894	1.0	1118	10	1127	43
N7.1	237	71	0.31	0.32	35	0.0890	1.5	2.115	1.8	0.1723	1.0	1025	10	1405	29
N8.1	424	122	0.30	0.05	74	0.1056	0.7	2.974	1.0	0.2043	0.7	1199	8	1724	13
N8.2	305	148	0.50	0.13	82	0.1215	1.3	5.259	1.7	0.3138	1.1	1759	17	1979	22
N9.1	199	70	0.36	-0.01	53	0.1087	0.9	4.628	1.1	0.3088	0.7	1735	11	1778	16
N10.1	143	78	0.56	0.21	67	0.1998	0.7	14.933	1.2	0.5422	1.1	2792	24	2824	11
N11.1	97	71	0.77	0.11	36	0.1625	0.9	9.622	1.6	0.4296	1.2	2304	24	2481	16
N12.1	333	105	0.32	0.12	105	0.1403	1.3	7.105	1.4	0.3674	0.6	2017	10	2231	22
N15.1	114	145	1.32	0.23	33	0.1137	1.2	5.280	1.8	0.3368	1.3	1871	21	1859	22
N16.1	196	158	0.83	0.18	62	0.1240	1.0	6.300	1.2	0.3685	0.7	2022	12	2015	17
N17.1	368	87	0.25	-0.13	42	0.0729	1.6	1.323	2.0	0.1317	1.1	798	9	1010	33
N18.1	213	113	0.55	0.18	58	0.1167	0.9	5.080	1.2	0.3158	0.7	1769	11	1906	17
N21.1	300	243	0.84	0.58	21	0.0603	2.9	0.676	3.1	0.0813	0.9	504	5	614	63
N21.2	357	371	1.07	0.25	25	0.0589	2.1	0.657	2.3	0.0809	0.7	502	4	564	47
N25.1	93	61	0.67	0.82	33	0.1607	5.9	9.167	6.2	0.4137	1.7	628	7	733	117
N26.1	119	21	0.18	0.57	20	0.1002	2.5	2.696	2.9	0.1952	1.3	1149	14	1627	47
N27.1	195	168	0.89	0.40	56	0.1093	1.7	5.003	2.0	0.3321	1.0	1849	16	1787	32
N28.1	1180	468	0.41	0.07	266	0.0919	0.8	3.316	1.0	0.2618	0.6	1499	7	1465	15
N29.1	297	175	0.61	0.36	50	0.0755	2.3	2.043	2.4	0.1963	0.9	1156	9	1081	45
N30.1	485	173	0.37	0.18	83	0.0956	1.4	2.609	1.6	0.1981	0.7	1165	8	1539	26
N31.1	792	457	0.60	0.19	162	0.0887	1.1	2.910	1.2	0.2380	0.6	1376	8	1398	21
N32.1	256	144	0.58	0.18	94	0.1912	0.9	11.201	1.4	0.4248	1.1	2282	21	2753	15
N33.1	173	126	0.75	0.23	52	0.1183	1.7	5.665	2.0	0.3474	1.1	1922	18	1930	30
N34.1	133	88	0.69	0.05	59	0.1740	1.2	12.464	1.7	0.5195	1.2	2697	26	2597	20
N35.1	303	109	0.37	0.41	83	0.1072	1.5	4.709	1.8	0.3185	0.9	1783	14	1753	28
N36.1	318	271	0.88	0.44	50	0.0747	2.7	1.877	2.9	0.1822	0.9	1079	9	1062	55
N37.1	169	97	0.59	0.22	42	0.1145	1.9	4.547	2.3	0.2879	1.4	1631	20	1873	34
N38.1	429	126	0.30	0.09	126	0.1125	1.0	5.305	1.2	0.3421	0.7	1897	12	1840	18
N39.1	338	117	0.36	0.09	92	0.1499	1.8	6.543	2.0	0.3166	0.8	1773	12	2345	31
N40.1	192	69	0.37	0.33	69	0.1963	1.1	11.317	1.5	0.4181	1.0	2252	19	2796	18
N41.1	429	128	0.31	0.09	115	0.1132	1.0	4.855	1.2	0.3109	0.7	1745	11	1852	18
N42.1	132	119	0.93	0.49	40	0.1118	2.2	5.402	2.5	0.3505	1.2	1937	19	1828	40
N43.1	305	134	0.46	0.39	77	0.1061	1.6	4.293	1.8	0.2935	0.8	1659	12	1733	29
N44.1	194	104	0.55	0.23	53	0.1110	1.4	4.808	1.9	0.3142	1.2	1761	19	1816	26
N44.1	226	82	0.38	0.76	56	0.1133	2.4	4.433	2.7	0.2838	1.1	1610	16	1853	44
N45.1	1213	300	0.26	0.08	331	0.1106	0.6	4.842	0.8	0.3175	0.5	1777	8	1810	11
N46.1	395	207	0.54	0.10	124	0.1143	0.9	5.758	1.2	0.3655	0.8	2008	14	1868	17
N47.1	239	39	0.17	0.50	42	0.0992	3.1	2.755	3.4	0.2014	1.6	1183	17	1609	57
N48.1	200	108	0.56	0.17	56	0.1155	1.8	5.204	2.1	0.3267	1.1	1822	17	1888	32
N49.1	419	110	0.27	0.25	116	0.1067	1.1	4.728	1.4	0.3214	0.8	1797	12	1743	21
N50.1	558	98	0.18	0.23	95	0.0822	3.0	2.231	3.1	0.1968	0.8	1158	9	1250	59
N51.1	94	44	0.49	0.75	28	0.1125	2.9	5.365	3.3	0.3458	1.4	1914	23	1841	53
N51.2	104	50	0.49	1.20	35	0.1066	3.4	5.626	3.8	0.3829	1.6	2090	29	1741	63
N52.1	120	86	0.74	0.80	35	0.1088	2.6	4.971	2.9	0.3314	1.2	1845	20	1779	47
N53.1	172	120	0.72	0.44	82	0.1690	1.3	12.782	1.6	0.5486	1.0	2819	24	2548	21
N54.1	273	152	0.57	0.13	125	0.1872	0.9	13.785	1.3	0.5341	1.0	2759	23	2718	14
N55.1	143	26	0.19	0.50	38	0.1099	2.2	4.641	2.6	0.3063	1.4	1723	22	1797	40

表 1(续)

测点 编号	U / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/U	$f_{206}$ /%	$^{206}\text{Pb}^*$ / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
						比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	年龄/Ma	$\pm$	年龄/Ma	$\pm$
样品 2002HJY-5															
N57.1	452	323	0.74	0.12	127	0.1128	1.1	5.096	1.4	0.3276	1.0	1827	15	1845	20
N58.1	192	105	0.56	0.15	93	0.1679	1.1	13.057	1.6	0.5639	1.2	2883	28	2537	18
N59.1	107	39	0.38	0.13	41	0.1707	1.4	10.389	1.9	0.4415	1.3	2357	25	2564	24
N60.1	234	31	0.14	0.09	117	0.1698	1.7	13.619	2.1	0.5818	1.2	2956	29	2555	28
N61.1	783	418	0.55	0.15	149	0.0805	1.1	2.454	1.3	0.2210	0.6	1287	7	1210	22
N62.1	380	181	0.49	0.37	80	0.0815	1.8	2.726	2.0	0.2425	0.8	1400	10	1235	35
样品 2002HJY-20															
K1.1	452	256	0.58	0.04	32	0.0610	1.5	0.693	2.8	0.0823	2.3	510	11	639	32
K2.1	565	143	0.26	0.24	67	0.0666	1.3	1.267	10.4	0.1380	10.3	834	80	824	27
K3.1	350	221	0.65	0.19	27	0.0585	2.5	0.726	12.4	0.0900	12.2	556	65	547	55
K4.1	128	80	0.65	0.00	17	0.0680	1.8	1.405	2.0	0.1498	0.9	900	8	869	37
K5.1	77	47	0.63	0.69	9	0.0601	3.4	1.142	3.6	0.1379	1.2	833	10	606	74
K6.1	166	76	0.47	0.24	19	0.0686	3.2	1.272	3.4	0.1345	1.2	814	9	887	66
K6.2	163	82	0.52	0.14	24	0.0672	1.7	1.568	2.0	0.1693	0.9	1008	9	843	36
K7.1	248	168	0.70	0.27	29	0.0642	1.9	1.199	2.0	0.1354	0.6	819	5	749	41
K8.1	101	74	0.76	0.44	13	0.0640	3.3	1.266	3.4	0.1436	1.0	865	8	741	70
K9.1	108	61	0.59	0.17	32	0.1158	1.8	5.525	6.6	0.3459	6.3	1915	104	1893	33
K10.1	58	39	0.69	0.58	7	0.0632	4.5	1.268	4.7	0.1456	1.3	876	11	715	96
K11.1	149	98	0.68	0.09	13	0.0573	2.3	0.782	2.5	0.0989	0.8	608	5	505	51
K12.1	147	63	0.44	0.33	16	0.0643	2.6	1.136	2.7	0.1280	1.0	777	7	753	54
K13.1	63	23	0.37	0.48	7	0.0653	4.9	1.201	5.0	0.1333	1.2	807	9	785	102
K14.1	245	28	0.12	0.06	29	0.0654	1.9	1.246	2.0	0.1381	0.7	834	6	787	40
K15.1	154	85	0.57	0.17	34	0.0967	1.9	3.416	2.1	0.2563	0.9	1471	12	1561	36
K15.2	170	33	0.20	0.00	22	0.0820	1.6	1.726	1.8	0.1526	0.8	916	7	1246	31
K16.1	74	35	0.49	0.65	9.3	0.0617	3.6	1.241	3.8	0.1459	1.1	878	9	664	78
K17.1	102	80	0.81	0.08	14	0.0710	2.1	1.568	2.5	0.1602	1.3	958	11	958	44
K17.2	89	56	0.65	0.47	10	0.0660	3.7	1.224	4.0	0.1345	1.4	813	11	807	78
K18.1	92	64	0.72	0.22	22	0.1009	1.5	3.908	1.7	0.2809	0.9	1596	12	1641	28
K19.1	184	55	0.31	0.35	20	0.0649	2.1	1.124	2.2	0.1257	0.8	763	5	771	44
K20.1	253	16	0.06	0.08	29	0.0686	1.5	1.271	6.0	0.1343	5.8	812	45	887	30
K21.1	248	221	0.92	0.26	28	0.0643	1.9	1.162	2.1	0.1311	0.7	794	6	752	41
K22.1	163	18	0.12	0.30	19	0.0656	2.3	1.249	2.4	0.1381	0.9	834	7	794	48
K23.1	102	37	0.37	0.28	8	0.0577	3.4	0.725	3.5	0.0911	1.1	562	6	517	74
K24.1	169	134	0.82	0.28	23	0.0710	2.0	1.561	2.2	0.1596	0.8	954	7	956	42
K25.1	105	67	0.66	0.28	12	0.0649	3.0	1.172	3.2	0.1310	1.1	794	8	771	63
K26.1	152	73	0.49	0.00	38	0.0822	20.9	3.256	20.9	0.2871	0.8	1627	12	1251	409
K26.1	214	121	0.58	0.13	59	0.1150	2.2	5.111	3.7	0.3224	3.0	1802	46	1879	40
K27.1	242	114	0.49	0.49	18	0.0648	4.6	0.781	5.3	0.0874	2.5	540	13	767	98
K28.1	246	250	1.05	0.08	96	0.1792	2.1	11.270	3.2	0.4561	2.4	2422	48	2646	35
K29.1	1075	220	0.21	0.12	81	0.0574	2.2	0.694	3.2	0.0877	2.3	542	12	509	48
K30.1	322	70	0.23	0.39	34	0.0703	2.6	1.173	4.6	0.1211	3.8	737	27	936	53
K31.1	985	57	0.06	0.15	110	0.0665	1.1	1.195	2.6	0.1303	2.3	790	17	822	24
K32.1	354	46	0.14	0.38	42	0.0733	3.7	1.404	4.4	0.1389	2.5	838	19	1022	75
K33.1	1285	1331	1.07	0.07	97	0.0592	1.1	0.718	2.5	0.0879	2.3	543	12	576	25
K34.1	481	63	0.13	0.00	55	0.0669	1.3	1.239	2.7	0.1343	2.4	812	18	836	28
K34.2	145	171	1.22	0.16	16	0.0696	3.0	1.227	3.9	0.1279	2.6	776	19	917	61
样品 2002XL-39															
U1.1	259	454	1.75	0.41	15	0.0558	2.2	0.519	3.3	0.0674	2.4	421	10	446	49
U1.2	25	19	0.74	7.09	2	0.1620	9	1.870	9.7	0.0838	3.7	519	19	2478	150
U2.1	208	129	0.62	-	14	0.0635	2.9	0.706	3.9	0.0806	2.7	500	13	726	62
U2.2	446	435	0.98	0.50	23	0.0539	5.2	0.451	5.9	0.0607	2.7	380	10	368	120

表 1(续)

测点 编号	U / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/U	$f_{206}$ /%	$^{206}\text{Pb}^*$ / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
						比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	比值	$\pm\%$	年龄/Ma	$\pm$	年龄/Ma	$\pm$
样品 2002XL-39															
U3.1	189	132	0.70	0.27	14	0.0587	3	0.702	4.1	0.0868	2.7	536	14	554	66
U3.2	416	548	1.32	0.18	31	0.0594	1.9	0.698	3.1	0.0851	2.4	527	12	583	41
U4.1	77	28	0.37	1.99	5	0.0515	13	0.474	13.0	0.0668	3.1	417	12	262	300
U4.2	538	717	1.33	0.58	31	0.0530	5.4	0.479	6.0	0.0655	2.5	409	10	329	120
U5.1	220	180	0.82	0.86	11	0.0546	10	0.433	11.0	0.0575	2.8	361	10	396	230
U5.2	162	78	0.48	0.48	12	0.0556	5.1	0.649	5.7	0.0847	2.6	524	13	436	110
U6.1	583	1458	2.50	-	32	0.0557	1.8	0.484	3.0	0.0631	2.4	395	9	438	40
U7.1	217	167	0.77	0.22	17	0.0573	3.2	0.699	4.0	0.0884	2.5	546	13	503	70
U8.1	359	605	1.68	0.22	27	0.0573	2.1	0.699	3.2	0.0885	2.4	547	13	501	46
U9.1	253	200	0.79	0.38	17	0.0572	2.4	0.615	3.4	0.0779	2.4	484	11	499	52
U10.1	112	63	0.57	1.01	8	0.0550	5.4	0.613	6.0	0.0808	2.6	501	13	414	120
U11.1	130	66	0.51	0.27	9	0.0641	3	0.721	4.0	0.0816	2.5	506	12	745	64
U12.1	309	251	0.81	0.34	22	0.0573	2.7	0.644	3.7	0.0815	2.4	505	12	503	60
U13.1	243	263	1.08	0.66	16	0.0549	3.8	0.592	4.5	0.0783	2.4	486	11	407	84
U14.1	165	118	0.72	1.12	12	0.0535	5.9	0.639	6.4	0.0866	2.5	535	13	350	130
U15.1	144	81	0.56	1.19	10	0.0517	7.1	0.561	7.5	0.0788	2.5	489	12	270	160
U16.1	160	172	1.07	0.95	12	0.0521	6.1	0.609	6.6	0.0847	2.5	524	13	289	140
U17.1	213	132	0.62	0.24	14	0.0589	2.3	0.638	3.3	0.0786	2.4	488	11	562	49
U18.1	137	50	0.37	1.16	10	0.0543	6.3	0.612	6.9	0.0818	2.8	507	14	384	140
U19.1	83	68	0.81	1.17	6	0.0519	13	0.549	14.0	0.0768	2.8	477	13	280	310
样品 2002ZLT-9															
S1.1	583	71	0.12	0.00	31	0.0570	2.4	0.486	2.5	0.0618	0.81	386	3	492	52
S1.2	201	22	0.11	1.52	11	0.0444	15	0.394	15.0	0.0643	1.9	402	7	-88	370
S2.1	614	303	0.49	0.45	43	0.0552	3.1	0.622	3.1	0.0817	0.57	506	3	422	69
S3.1	468	195	0.42	0.76	35	0.0552	3.5	0.652	3.6	0.0856	0.62	530	3	422	78
S4.1	3171	3520	1.11	0.09	197	0.0571	1.2	0.568	1.9	0.0722	1.5	449	7	494	27
S5.1	462	393	0.85	0.84	35	0.0553	3.4	0.660	3.5	0.0865	0.6	535	3	425	77
S6.1	380	228	0.60	0.44	29	0.0564	2.5	0.681	2.6	0.0876	0.66	542	3	468	55
S7.1	900	197	0.22	0.24	63	0.0564	1.5	0.635	1.5	0.0816	0.42	506	2	467	32
S8.1	185	133	0.72	0.70	14	0.0562	4.2	0.689	4.3	0.0889	1	549	5	460	93
S9.1	618	412	0.67	0.26	46	0.0563	1.8	0.676	1.9	0.0871	0.7	538	4	462	40
S10.1	574	53	0.09	0.39	42	0.0550	2.2	0.643	2.3	0.0848	0.52	525	3	412	50
S11.1	193	105	0.54	0.28	15	0.0591	4.3	0.731	4.8	0.0897	2.2	554	12	572	93
S12.1	395	114	0.29	0.44	30	0.0556	2.6	0.675	2.7	0.0881	0.61	544	3	435	58
S13.1	271	35	0.13	0.27	37	0.0682	1.6	1.488	1.8	0.1584	0.64	948	6	873	34
S14.1	140	15	0.10	0.24	26	0.0956	2.4	2.900	4.0	0.2199	3.2	1281	37	1540	45
S15.1	120	54	0.45	0.73	9	0.0560	7	0.640	7.2	0.0830	1.2	514	6	451	160
S16.1	219	162	0.74	0.90	15	0.0523	4.6	0.571	4.7	0.0791	0.85	491	4	300	110
S17.1	364	256	0.70	0.38	25	0.0552	2.5	0.600	2.6	0.0788	0.65	489	3	422	57
S18.1	342	231	0.67	0.53	24	0.0541	3.3	0.602	3.3	0.0807	0.76	500	4	374	73
S19.1	360	243	0.68	0.56	18	0.0537	4.9	0.438	5.0	0.0592	1.2	371	5	359	110
S20.1	425	148	0.35	0.28	30	0.0566	2	0.647	2.3	0.0829	1.1	513	5	475	45
S21.1	1284	95	0.07	1.75	110	0.0755	1.9	1.017	1.9	0.0977	0.36	601	2	1081	37
S22.1	60	26	0.43	0.00	11	0.0877	3.8	2.640	4.4	0.2180	2.3	1272	26	1375	73
S23.1	237	130	0.55	0.74	17	0.0556	6.5	0.624	6.8	0.0813	2	504	10	437	140
S24.1	699	243	0.35	0.14	53	0.0564	1.2	0.689	1.3	0.0885	0.44	547	2	469	27

a)  $f_{206}$  代表普通  $^{206}\text{Pb}$  占总  $^{206}\text{Pb}$  的百分比;  $\text{Pb}^*$  为放射成因铅; 表中误差为  $1\sigma$

短柱状, 颗粒边界平滑, 不发育振荡环带(见图 2). 对该样品中的 54 颗锆石共进行了 57 个点的分析, 给出的年龄范围为 502~2824 Ma (表 1 和图 3(a), (b)).

在年龄频率曲线(图 3(b))出现多个峰值, 分别在 2800, 2500, 2200, 1800, 1400, 1100 和 600 Ma 附近. 这与该样品是变碎屑岩的特征是一致的, 说明碎屑

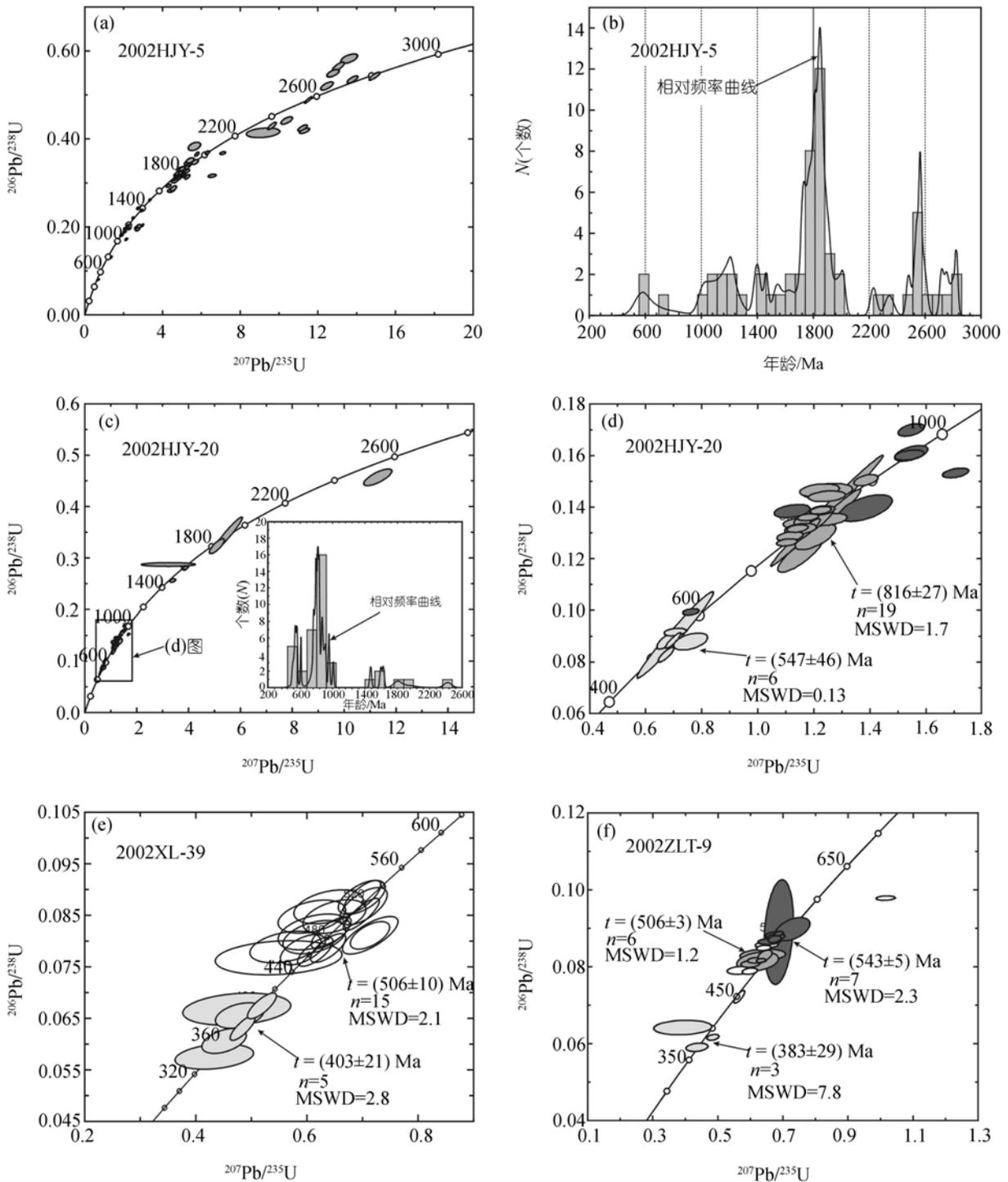


图3 大兴安岭北部变质杂岩锆石 U-Pb 谐和图

(a) 2002HJY-5 样品(兴华渡口群含十字石榴二云片岩)锆石 U-Pb 谐和图; (b) 2002HJY-5 样品锆石( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ )年龄频率统计图; (c) 样品 2002HJY-20 (帘石化斜长角闪片岩)锆石 U-Pb 谐和图及( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ )年龄频率统计图; (d) 图(c)的局部放大; (e) 2002XL-39 样品(黑云钾长透辉角闪片岩)锆石 U-Pb 谐和图; (f) 2002ZLT-9 样品(绿泥片岩)锆石 U-Pb 谐和图(3 个给出大于 900 Ma 的分析点未示于图上)

锆石来源较为复杂。

根据 CL 图像, 样品 2002HJY-20 的锆石明显可

分为两组: 一组表明为晶棱明显的柱状晶体, 并发育完好的振荡环带; 另一组晶棱不甚明显, 振荡环

带多不发育(图 2)。此外,部分锆石发育一层很薄的增生边(表现为强发光特征),可能系后期变质或蚀变作用结果。对该样品中 34 颗锆石进行了 39 个点的分析,得到的年龄范围为 510~2646 Ma(表 1 和图 3(c))。除 10 个分析点给出分散的较老年龄(2600~950 Ma)外,其余 29 个分析构成 2 个相对集中的年龄组。第一组由 21 个分析组成,除去其中 2 个统计离群点外,其他 19 个分析给出的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为(816±27) Ma, MSWD 值为 1.7。第二组由 7 个分析组成,除去其中一个明显离群点外,其他 6 个分析给出的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为(547±46) Ma, MSWD 值为 0.13(图 3(d))。

样品 2002XL-39 中的锆石具有相似的形貌特征,如均表现为长柱状晶体,晶棱明显,振荡环带发育(图 2),个别锆石也发育有发光较强的增生边。对 2002XL-39 样品中的 19 颗锆石进行了 24 个点的分析,其结果大体可分为两组:第一组由 18 个分析组成,其年龄范围为(477±13)~(547±13) Ma(表 1 和图 3(e)),加权平均值为(509±11) Ma (MSWD = 3.1)。进一步回归,即剔除 2 个最大和 1 个最小值后,余下的 15 个分析的加权平均年龄为(506±10) Ma (MSWD = 2.1);第二组由 6 个分析构成,年龄范围为(361±10)~(421±10) Ma,其加权平均年龄为(395±24) Ma (MSWD = 5.4)。剔除最小的 1 个分析(点 U5.1; 表 1),其余 5 个分析的加权平均年龄为(403±21) Ma (MSWD = 2.8)。

样品 2002ZLT-9 的锆石多数为短柱状晶体,振荡环带发育,少数为浑圆状振荡环带不清晰或不发育,个别锆石也发育有薄的增生边(图 2)。对其中 24 颗锆石进行了 25 个点的分析,给出的年龄范围为 371~1540 Ma(表 1)。除 4 个分析点(S13.1, S14.1, S21.1, S22.2)和 4 个分析点(S1.1, S1.2, S4.1, S19.1)分别给出较老和较小年龄外,其余 17 个分析点给出的年龄范围为(489±3)~(554±12) Ma。由于这些年龄仍较为分散,对其进行进一步处理可以发现它们大体可划分为 2 个组(图 3(f)):第一组包括其中年龄较大的 7 个分析,给出的加权平均年龄为(543±5) Ma(MSWD = 2.3);第二组由其中 6 个分析点组成,其加权平均年龄为(506±3) Ma(MSWD = 1.2)。另外,有 2 个分析点(S3.1, S10.1)分别给出中间年龄(约(525±3), (530±3) Ma);还有 2 个分析点(S16.1, S17.1)给出稍年轻年龄((491±4), (489±3) Ma)。此外,本样品有 4 个分析还

给出更小的年龄,其中有 3 个给出较为相近的年龄为(371±5), (386±3)和(402±7) Ma,其加权平均值为(383±29) Ma(MSWD = 7.8; 图 3(f))。

## 4 讨论和结论

### 4.1 兴华渡口群和扎兰屯群形成时代

大兴安岭北部的兴华渡口群和扎兰屯群有关的同位素年龄资料十分稀少,仅见有兴华渡口群的 2 个 Sm-Nd 等时线年龄 1729 和 1157 Ma,其中前者曾被解释为原岩形成年龄,而后者被解释为变质年龄 [1, 10]。尽管没有这两个 Sm-Nd 年龄的详细分析资料,难以对其可信度进行评论,但同一种方法的分析结果相差如此悬殊,要么是被测对象不是同时代的,要么它们是假等时线。若是后者,其年龄可能并不具地质意义。

本次测试的样品 2002HJY-5 岩性为含十字石榴二云片岩,其原岩应为泥砂质沉积岩,其中锆石应为碎屑或变质成因,故其年龄应反映蚀源区或变质作用的时代信息。从锆石 CL 图像可以看出,其锆石形貌特征以浑圆状为主,且颗粒边界圆滑,具有碎屑锆石特征。锆石内部相对均匀,且无振荡环带发育,但有的发育有发光较强的“补丁”(图 2),这指示它们可能是具变质成因的碎屑锆石。分析结果中众多的年龄峰值的出现表明,该碎屑岩的蚀源区可能包括不同时代的地质体。通常,碎屑锆石中的最小年龄应大体限定其沉积成岩年龄的年龄下限。根据前述分析结果,该样品中的最小的碎屑锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为(502±4)和(504±45) Ma,但仅测出一颗(2 个分析点 N21.1 和 N21.2),这两个年龄不太谐和( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄分别为(564±47)和(614±63) Ma),有可能在后来的变质变形等构造-热事件发生过铅丢失。因此,该最小年龄代表性不强,能否代表其形成年龄下限还难以肯定。尽管从目前的分析还不能准确确定该样品的形成年龄,但众多 1.0~1.1 Ga 碎屑锆石的出现,指示该片岩的成岩年龄小于 1.0 Ga,而不是先前认为的古元古代,而很可能是寒武纪或晚元古代。

样品 2002HJY-20 和 2002XL-39 的原岩均为中基性火成岩类,可能相当于原来划分的兴华渡口群中的“兴华组”岩性段。样品 2002HJY-20 给出两组年龄,分别为(816±27)和(547±46) Ma。由于后者是从晶形完好且具岩浆成因振荡环带发育的锆石上得到的,

而前者是从振荡环带不甚发育的锆石上测得的,所以尽管前者数量较多,我们仍将后一组年龄((547±46) Ma)解释为该样品的形成年龄,而前一组年龄及更老的年龄解释为继承或捕获锆石的年龄.样品 2002XL-39 给出的主锆石年龄组的加权平均年龄(506±10) Ma,另有少数分析点给出为分散的年轻年龄(403±10) Ma( $n=5$ , MSWD = 2.8). 由于该样品中的锆石均发育典型的岩浆成因振荡环带,因此我们将主锆石组的年龄(506±10) Ma 解释为其形成年龄.对于较年轻的年龄,我们认为可能是放射成因铅丢失的结果.例如分析点 U1.1 和 U1.2 位于同一颗锆石上(图 2),前者位于振荡环带发育的核部,给出年龄为(421±10) Ma,后者位于振荡环带不发育的边部,却给出(519±19) Ma 的年龄,明显大于核部年龄,但与其他多数锆石年龄相近,所以该锆石的核部明显发生过铅丢失,推测这可能是锆石核部 U 含量较高(表 1)而导致铅丢失的结果.再如分析点 U5.2 和 U5.1,尽管它们均位于同一锆石颗粒边部振荡环带发育的部位(图 2),应该是同时形成的,但前者给出的年龄为(524±13) Ma,与其他多数锆石年龄相近,而后者则给出(361±10) Ma 的年龄,明显偏小,指示点 U5.1 部位可能发生过铅丢失.点 U5.1 的 U, Th 含量(220 和 180  $\mu\text{g/g}$ )比点 U5.2(162 和 78  $\mu\text{g/g}$ )稍高,这可能是导致铅丢失的一个原因.但另外一种可能是,放射成因铅丢失发生在后来的变质事件或更晚期的构造-热事件中.因此,将主锆石组年龄(506±10) Ma 解释为形成年龄是合理的.该年龄与样品 2002HJY-20 样品中较小一组年龄((547±46) Ma)在误差范围内是相近的,表明它们均形成于寒武纪,而非古元古代.

本次被测的扎兰屯群样品(2002ZLT-9)岩性为绿泥片岩,原岩为基性火山岩或凝灰岩.结合 CL 图像,我们认为样品中 4 个给出>600 Ma 的锆石应为捕获或继承锆石.样品中给出加权平均年龄为(543±5)和(506±3) Ma 的两组锆石均发育有岩浆成因的振荡环带,因此我们将其中较小的一组年龄((506±3) Ma)解释为该岩石的形成年龄,而较老一组年龄((543±5) Ma)有两种可能的解释:一是它可能与更老的锆石一样,代表捕获或继承锆石的年龄;二是它可能代表岩浆活动开始的时间.由于该样品原岩是火山岩类,因此我们认为第一种可能性更大,因为如果不考虑误差的话,这两个年龄相差达 40

Ma,对一次火山活动持续时间而言可能显得太长了.此外,该样品中几个较分散的较小年龄(371~449 Ma)同样被解释为受变质作用及更晚岩浆-热事件干扰的结果.该样品的形成年龄((506±3) Ma)与样品 2002HJY-20((547±46) Ma)和样品 2002XL-39((506±10) Ma)的形成年龄在误差范围内是相同或相近的,表明扎兰屯群也是形成于中寒武世,而不是古元古代.

总之,本次 SHRIMP 测定结果表明被测露头区的兴华渡口群和扎兰屯群无论是其中的变沉积岩类或变火成岩类,时代上均不是原先认为的古元古代,其中的变质火山(成)岩类的时代为早-中寒武世,变质碎屑岩可能与变火山岩类同时或稍早(晚元古代).因此,它们不代表该区的前寒武纪基底.此外,新林(2002XL-39)和扎兰屯(2002ZLT-9)2 个变火成岩样品中均存在 380~400 Ma 的较小年龄,如上所述我们认为这可能是放射成因铅丢失的结果,而且这种铅丢失可能与样品所经历的变质变形事件有关,也可能与更晚的岩浆-热事件(如中生代大规模花岗岩侵位)有关.所以目前资料还难以确定这些变质岩的变质年龄,进一步的 Ar-Ar 定年研究可能有助于这一问题的解决.同时,还需说明的是,兴华渡口群露头比较零散,分布地区跨度也比较大,本文研究结论可能只适于被测露头区的兴华渡口群和扎兰屯群,对其他地区兴华渡口群能否一概而论还有待进一步的研究.

#### 4.2 构造启示

目前对大兴安岭北部地区的构造属性及构造演化的认识还缺乏明确结论,但有研究者提出在大兴安岭地区自北而南存在 3 个主要地块,即额尔古纳、兴安和松嫩地块 [4~5,18~19],并认为后两者在晚古生代沿贺根山-扎赉特-嫩江一带碰撞拼合 [20,21],而对前两个地块间的碰撞拼合时代及位置目前还缺乏相关的研究资料.最近,葛文春等 [12]根据花岗岩及辉长岩的研究,认为这两个地块间的碰撞缝合在早古生代早期(>490 Ma)业已完成.按此划分,本文研究的兴华渡口群 3 个样品位置均属于额尔古纳地块(南缘),而扎兰屯群样品则属于兴安地块(南缘).

兴华渡口群岩性组合中包括大量的火山岩和碎屑沉积岩及大理岩,以前根据推测的时代,认为兴华渡口群为典型的古元古代(优)地槽型沉积,并于古元古代未发生地槽回返,成为额尔古纳地块的一

部分 [13,41]。但我们的上述研究结果表明兴华渡口群变质岩是寒武纪或晚元古代形成的,也就是说,兴华渡口群代表一套寒武纪或稍早的活动大陆边缘的火山-沉积建造。这与本次测定的变火成岩样品中存在前寒武纪继承锆石,尤其是变沉积岩样品中出现大量的古老碎屑锆石(>1.0 Ga)的特征相一致。所以,寒武纪及晚元古代时期兴华渡口群所在的大兴安岭北部应处于活动大陆边缘的构造环境,而非稳定的盖层发育阶段 [11]。结合新近研究,如果该地区塔河花岗杂岩体(约为 490 Ma)是碰撞后伸展体制下侵位形成 [12],具活动陆缘性质的兴华渡口群中变火山岩的形成时代(506~547 Ma)应限定了该区碰撞时间的下限,即碰撞作用可能发生在晚寒武世期间(490~506 Ma)。

扎兰屯群主要出露于内蒙古自治区布达哈旗扎兰屯市附近,其原岩是一套以火山岩及火山碎屑岩为主、夹少量碎屑沉积岩的火山-沉积建造 [2]。从岩性及岩性组合看,它大体可与兴华渡口群中的以火山岩为主的岩性段(“兴华组”)相对比,这暗示它们可能形成于相似的构造环境。本次 SHRIMP 定年结果也表明它们为同时代产物,即寒武纪。然而,扎兰屯群目前的出露位置应相当于前面提到的“兴安地块”的最南缘,与兴华渡口群相距遥远,它们之间是何联系目前还难以定论。我们推测,有 3 种可能的情况:( ) 它们目前的空间配置代表它们形成时的空间分布,即它们分别代表两个不同地块的寒武纪边缘;( ) 扎兰屯群可能是由北而南的构造推覆而形成的飞来峰;( ) 两者初始为同一活动陆缘或岛弧,后来发生裂解,扎兰屯群代表裂解出来的那部分。鉴于该地区研究程度相对较低,究竟哪种可能性更大还有待进一步研究确定。

从以上讨论可以得出以下两点结论:

( ) 大兴安岭新林和韩家园子地区的兴华渡口群和扎兰屯群变火成岩类均形成于寒武纪时期,变碎屑岩类可能与火成岩类同时形成或稍早,这表明这两个岩群均不是如先前认为的那样形成于古元古代。

( ) 结合原岩建造特征,本次测年结果表明兴华渡口群及扎兰屯群可能均代表寒武纪或晚元古代的活动大陆边缘建造,但两者之间的关系有待深入研究。

致谢 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在北京离子探针中心完成,并得到简平、张玉海、陶华、张巧大、杨淳、宋彪、万渝生、王彦斌和李柏的帮助,在野外及室内工作中得到李承

东、许雅文等的帮助,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993
- 2 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 3 姜春潮. 小兴安岭北西部的前震旦系——黑龙江流域及毗邻地区地质. 北京: 地质出版社, 1963
- 4 张兴洲, Sklyarov E V. 中国东北及邻区蓝片岩带的构造意义. 见: 长春地质学院地质研究所文集. 北京: 地震出版社, 1992. 99—106
- 5 叶惠文, 张兴洲, 周裕文. 从蓝片岩及蛇纹岩特点看满洲里-绥芬河断面岩石圈结构与演化. 见: M-SGT 地质课题组, 编. 中国满洲里-绥芬河地质断面域内岩石圈结构及其演化的地质研究. 北京: 地震出版社, 1994. 73—83
- 6 叶茂, 张世红, 吴福元. 中国满洲里-绥芬河地质断面域古生代构造单元及其地质演化. 长春地质学院学报, 1994, 24: 241—245
- 7 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996
- 8 李春昱. 亚洲大地构造 1:800 万图及说明书. 北京: 地质出版社, 1982
- 9 李锦轶. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 1998, 44(4): 339—347
- 10 表尚虎, 李仰春, 何晓华, 等. 黑龙江省塔河绿林林场一带兴华渡口群岩石地球化学特征. 中国区域地质, 1999, 18(1): 28—33
- 11 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义. 科学通报, 2003, 48(22): 2315—2323
- 12 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报, 2005, 50(12): 1239—1247
- 13 周长勇, 吴福元, 葛文春, 等. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因. 岩石学报, 2005, 21(3): 763—775
- 14 Compston W, Williams I S, Mayer C. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a Sensitive High Resolution Ion Microprobe. Proc. XIV Lunar Planetary Science Conference. J Geophys Res, 1984, 89 (Suppl): B525—B534
- 15 Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. J Geol Soc London, 1992, 149: 171—184
- 16 Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high-grade paragneisses from the Deve Nappes, Scandinavian Caledonides: : Ion microprobe zircon U-Th-Pb. Contrib Mineral Petrol, 1987, 97: 205—217 [DOI]
- 17 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 滇川西部金沙江石炭纪蛇纹岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋盆演化的同位素年代学制约. 地质学报, 2003, 77(2): 217—228
- 18 吴福元, 孙德有, 李惠民. 松辽盆地基底岩石的锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 2000, 45(6): 656—660
- 19 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: Geochemical and isotopic constraints. Phys Chem Earth, 2001, 26(9-10): 793—803 [DOI]
- 20 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系. 科学通报, 2000, 45(20): 2217—2222
- 21 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chem Geol, 2002, 187(1-2): 143—173 [DOI]