

四川攀枝花大田地区混合岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义

姚建¹, 李巨初², 周君¹, 陈志国¹, 姚海平¹

YAO Jian¹, LI Juchu², ZHOU Jun¹, CHEN Zhiguo¹, YAO Haiping¹

1.核工业二八〇研究所, 四川 广汉 618300;

2.成都理工大学, 四川 成都 610059

1. No. 280 Institute of Nuclear Industry, Guanghan 618300, Sichuan, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:广泛分布于扬子地台西缘康滇地轴上的康定杂岩,其形成时代一直争议较大。选取前人少有涉及的大田地区混合岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定,结果表明,其年龄时限集中在744~772Ma之间,为晋宁造山运动期产物,与近年其他学者针对康定杂岩的锆石测年结果一致,说明康滇地轴最大一次混合岩化作用发生在晋宁期。混合岩稀土元素具2种明显不同的配分型式,显示深熔作用特征。深熔作用早期混合岩Eu具正异常特征,晚期则具明显的负Eu异常,显示有分异结晶作用。有利的铀矿赋矿围岩为深熔作用晚期分异结晶形成的混合岩。

关键词:LA-ICP-MS锆石U-Pb测年;地球化学;混合岩;康滇地轴;铀矿

中图分类号:P597+.3 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)02/03-0381-11

Yao J, Li J C, Zhou J, Chen Z G, Yao H P. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of migmatite in Datian, Panzhihua City, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(2/3):381-391

Abstract: The Kangding complex that is extensively distributed in the Kangdian Axis on the western margin of Yangtze Platform is greatly disputed in terms of its formation age. In this paper, migmatite in Datian region which has rarely been referred to before was selected to perform U-Pb zircon LA-ICP-MS age determination. The results show that the ages are mainly concentrated from 744Ma to 772Ma, suggesting that the complex was formed in Jinning orogeny period; moreover, this conforms to the zircon dating results specific to the Kangding complex presented by other researchers, which further indicates that the strongest migmatization event of Xikang-Yunnan Axis occurred in the Jinning period. There exist two distinctly different REE patterns of the migmatite which indicates geochemical characteristics of anatexite. At the early stage of anatexis, the magmatite produced positive anomaly of Eu; whereas at the later stage, Eu negative anomaly implying a process of differentiation crystallization was produced. The beneficial host rock of uranium mineralization is the magmatite formed by differentiation crystallization in the late period of anatexis.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; migmatite; Kangdian Axis; uranium mineralization

扬子地台西缘康滇地轴上广泛出露一套变质-混合杂岩,呈穹窿状断续分布于康定、泸定、冕宁、攀枝花、元谋一带(俗称康定杂岩)^[1],其成因和时代归属一直是争论的焦点。针对该套杂岩,许多学者应用不同方法进行了测年。袁海华等^[2-3]利用Rb-

Sr法测得冕宁沙坝暗色体麻粒岩、混合片麻岩全岩年龄 $2404\pm 189.8\text{Ma}$,获得同德角闪混合片麻岩Pb-Pb等时线年龄 $2957\pm 304\text{Ma}$,认为康定杂岩形成于新太古代-古元古代;丛柏林^[4]利用Sm-Nd法测得冕宁沙坝暗色体麻粒岩年龄 $1100\pm 100\text{Ma}$;李复汉

收稿日期:2016-08-04;修订日期:2016-09-26

资助项目:中国核工业地质矿产事业部生产项目《四川西部地区铀矿资源调查评价与勘查》(编号:201638)

作者简介:姚建(1986-),男,在读硕士生,工程师,从事铀矿勘查工作。E-mail:yaojian280@163.com

等^[5]利用 Rb-Sr 法测得大田混合岩全岩年龄 1171~1255Ma; 胥德恩等^[6]获得大田英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄 827.7Ma。近年来,越来越多的学者用精细测年方法进行测年,陈岳龙等^[7]测得四川冕宁(沙坝)康定杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 721~773Ma,为新元古代。杜利林等^[8-9]利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得康定杂岩中雅江桥奥长花岗岩年龄为新元古代,认为康滇地轴上不存在新太古代—古元古代的古老结晶基底。以往测年方法差异较大,导致测年结果不同;测年对象主要集中于康滇地轴中北段康定、泸定、沙坝等杂岩,大田地区混合岩未进行过系统成岩年龄测定。

与混合岩有关的铀矿床世界上早有发现,中国以连山关为代表^[10]。在康滇地轴上,海塔、大田、牟定等地发现大量铀矿化信息,而海塔、大田地区相继发现巨粒晶质铀矿^[11]。据推测,大田地区有望发展为小—中型铀石墨矿床。野外调查发现,混合岩为铀赋矿围岩,混合岩化作用为铀的初始富集过程,铀矿化与混合岩关系密切。因此,研究大田地区混合岩年代学及其与铀矿化的关系,对该区铀矿的找矿突破有指导意义。

1 地质背景

攀枝花大田地区地处扬子地台西缘康滇地轴中段泸定—米易抬拱之上,位于安宁河—绿汁江断裂西侧。区内出露岩性主要为遭受角闪岩相变的区域变质岩、发生混合岩化作用形成的混合岩和混合花岗岩类,原岩为一套基性火山岩和中酸性火山—沉积岩。大田混合岩分布于大田石英闪长岩和晋宁期花岗岩之间(图1)。

2 样品采集与分析方法

本次采集锆石 U-Pb 测年样品 4 件。按岩性主要为黑云斜长混合岩(浅色体)(DY-1、DY-16)、角闪斜长混合岩(浅色体)(DY-19)。为对比大田以

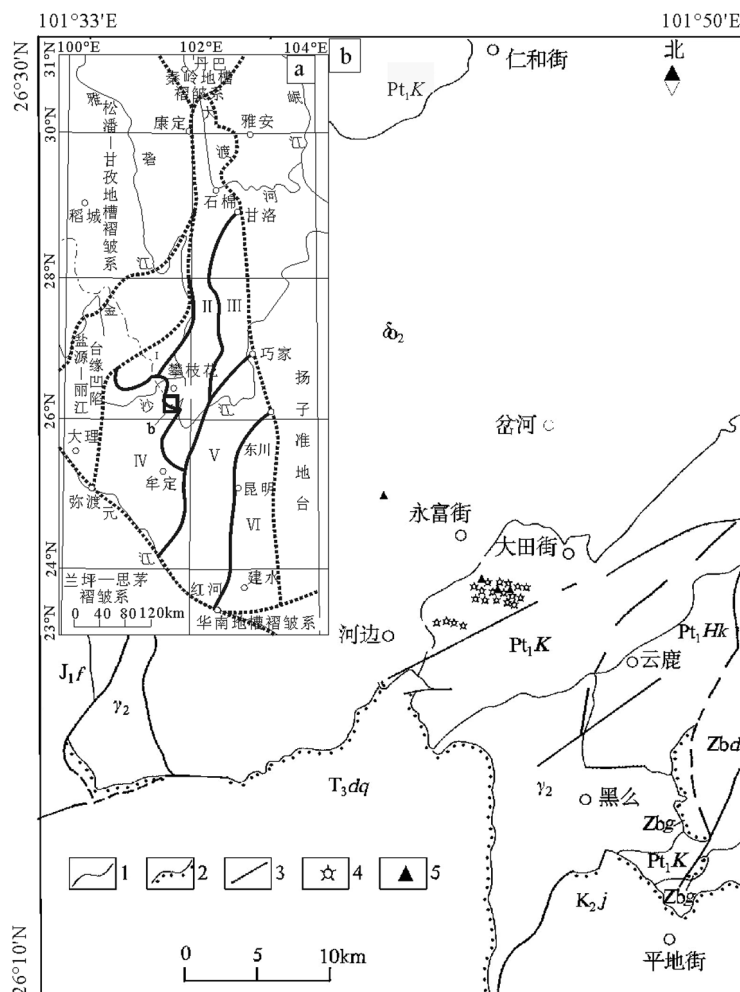


图1 攀枝花大田地区地质与样品分布略图

Fig. 1 Geological sketch map and distribution of samples in the Datan area, Panzhihua

I—盐边台拱; II—泸定—米易台拱; III—江舟—米市断陷; IV—大姚—楚雄拗陷; V—武定—石屏断束; VI—昆明台褶束。K_{2j}—上白垩统江底河组; J_{1f}—下侏罗统冯家河组; T_{3dq}—上三叠统大荞地组; Zbd—上震旦统灯影组; Zbg—上震旦统观音崖组; Pt₁HK—河口群; Pt₁K—康定群; δO₂—晋宁期石英闪长岩; γ₂—晋宁期花岗岩; 1—地质界线; 2—角度不整合界线; 3—断层; 4—稀土元素样品采集位置; 5—锆石样品采集位置

北石英闪长岩成岩时代,采集石英闪长岩(DY-20)进行对比分析。样品均为新鲜基岩,无蚀变,长英质矿物含量大于90%,另含极少量的黑云母或角闪石(图2)。

测年样品锆石挑选由华阳队完成,制靶在天津地质矿产研究所完成。样靶经打磨、抛光后对锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,并对锆石的外观特征进行研究。

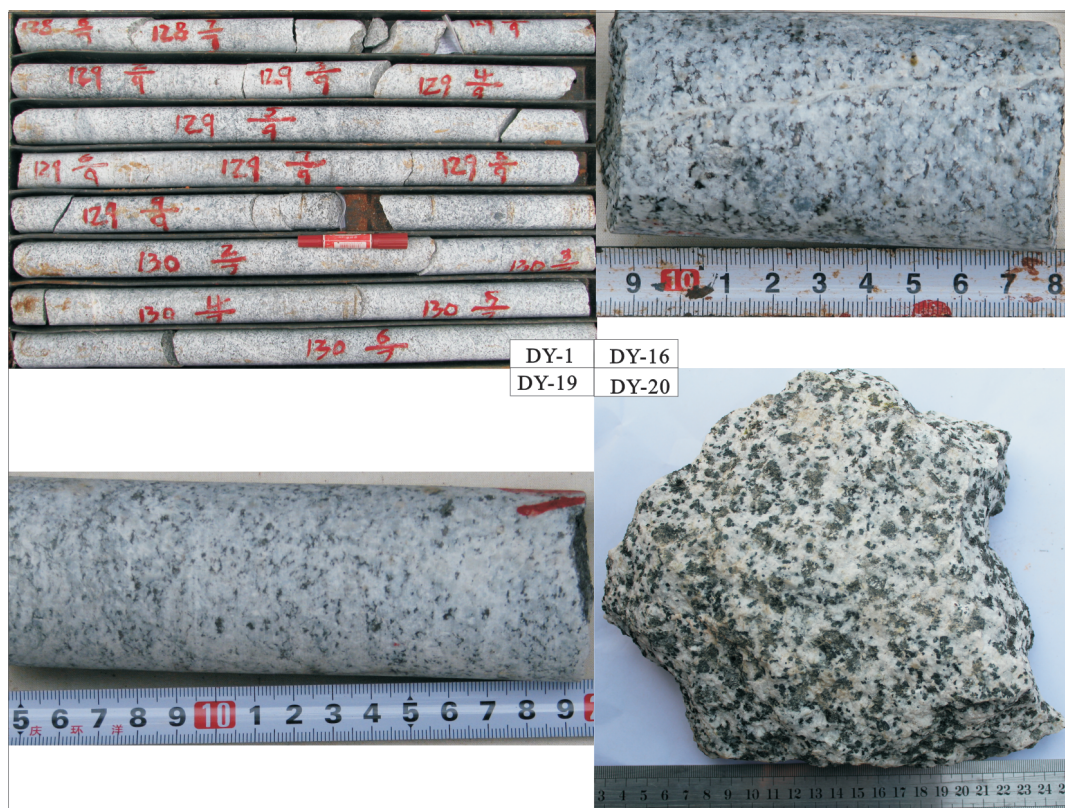


图2 大田地区岩石样品图

Fig. 2 Rock samples photos of the Datian area

LA-MC-ICP-MS法锆石微区U-Pb年龄测定在国土资源部天津地质矿产研究所同位素实验室的激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪上用标准测定程序进行。分析仪器为Thermo Fisher公司制造的Nep-tune型质谱仪和美国ESI公司生产的UP193-FXArF准分子激光器,激光束斑直径为 $35\mu\text{m}$,频率8~10Hz,激光器能量密度 $13\sim 14\text{J}/\text{cm}^2$ 。

实验中采用氦气作为激光剥蚀物质的载气送入Neptune,利用动态变焦扩大色散,可以同时接收质量数相差很大的U-Pb同位素,从而进行锆石U-Pb原位测定。采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成4~5个样品测定,插入测标样1次。采用TEMORA作为外部锆石年龄标准。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的ICPMS-DataCal程序和Ludwig的Isoplot程序进行数据处理^[12],采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正。利用NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。详细的分析步骤和数据处理方法参见文献[12~14]。

3 混合岩同位素地质年龄

测年样品锆石颗粒阴极发光图像显示(图3),锆石呈浅灰色-无色透明,金刚光泽。

晶体多为简单的长柱状双锥体,少部分为复杂的柱状双锥体,棱角清楚,表面光滑,个别锆石晶体表面有熔蚀,普遍发育平行的晶体生长环带,部分具浑圆状边缘的核。4个样品选取97粒晶体生长环带较发育的淡灰色锆石,在内部较均匀晶域进行了LA-MC-ICP-MS定年数据分析(表1)。

3.1 黑云斜长混合岩(浅色体)

这套岩石为铀矿化的主要赋矿围岩,取2件样品(DY-1、DY-16)进行测年分析。

DY-1样品,共有22粒可靠的锆石年龄数据,其中,1、4~9、13、16~18号锆石,无论是同一颗锆石3组年龄数据,还是不同锆石年龄数据,在误差范围内较一致,谐和性很好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $771.4\pm 2.7\text{Ma}$ (MSWD=0.86),代表了混合岩的形成年龄。而20、21号锆石年龄谐和性较差,可能

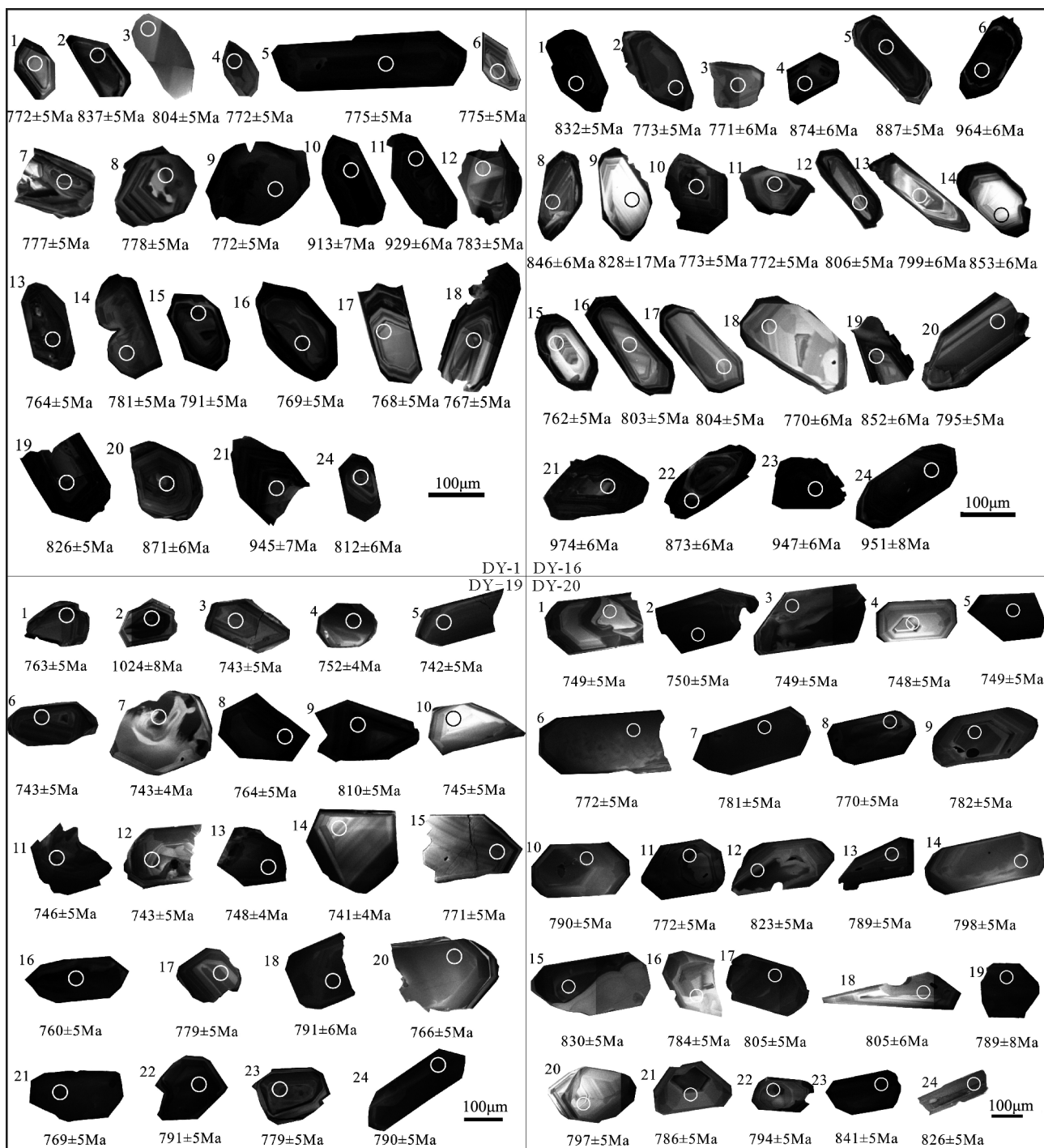


图3 大田地区混合岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of zircon from migmatite of Datian area

DY-1—黑云斜长混合岩;DY-16—黑云斜长混合岩;

DY-19—角闪斜长混合岩;DY-20—石英闪长岩

是由于锆石封闭体系被破坏而使其中的放射性成因铅发生不同程度丢失引起的。其他锆石颗粒年龄集中于780~930Ma之间,年龄偏差值不大,应属

同一构造运动下的产物(图4)。

DY-16样品,共有22粒可靠的锆石年龄数据,每粒锆石3组年龄数据,在误差范围内一致,谐

表 1 黑云斜长混合岩(DY-1) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope data for biotite plagioclase migmatite samples

测试号	含量/ 10^{-6}		同 位 素 比 值							年 龄/Ma					
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
黑云斜长混合岩 DY-1															
DY-1.1	109	741	0.662	0.1273	0.0008	1.1591	0.0132	0.0661	0.0008	772	5	782	9	808	25
DY-1.2	220	1443	0.486	0.1386	0.0008	1.2932	0.0124	0.0677	0.0007	837	5	843	8	859	22
DY-1.3	269	1647	0.037	0.1328	0.0009	1.2601	0.0193	0.0688	0.0011	804	5	828	13	893	33
DY-1.4	160	1106	0.580	0.1272	0.0007	1.2056	0.0106	0.0687	0.0007	772	5	803	7	890	20
DY-1.5	298	1813	1.115	0.1278	0.0008	1.1743	0.0084	0.0667	0.0006	775	5	789	6	827	18
DY-1.6	151	1069	0.521	0.1278	0.0008	1.2049	0.0198	0.0684	0.0011	775	5	803	13	880	34
DY-1.7	339	2254	0.715	0.1281	0.0008	1.2029	0.0085	0.0681	0.0005	777	5	802	6	871	16
DY-1.8	359	2696	0.333	0.1282	0.0008	1.1557	0.0265	0.0654	0.0015	778	5	780	18	786	47
DY-1.9	238	1509	0.705	0.1273	0.0008	1.1584	0.0343	0.0660	0.0019	772	5	781	23	806	60
DY-1.10	119	745	0.332	0.1521	0.0012	1.4633	0.0126	0.0698	0.0005	913	7	915	8	921	15
DY-1.11	273	1781	0.159	0.1551	0.0010	1.5104	0.0075	0.0706	0.0005	929	6	935	5	947	14
DY-1.12	301	2075	0.570	0.1292	0.0008	1.1676	0.0138	0.0655	0.0008	783	5	785	9	792	27
DY-1.13	334	2653	0.096	0.1258	0.0008	1.1340	0.0082	0.0654	0.0005	764	5	770	6	787	16
DY-1.14	497	3065	0.738	0.1289	0.0008	1.2035	0.0283	0.0677	0.0016	781	5	802	19	860	49
DY-1.15	453	2945	0.462	0.1306	0.0009	1.2184	0.0324	0.0677	0.0018	791	5	809	22	858	56
DY-1.16	228	1484	0.703	0.1266	0.0008	1.1763	0.0318	0.0674	0.0018	769	5	790	21	849	55
DY-1.17	111	725	0.573	0.1265	0.0008	1.1534	0.0251	0.0661	0.0015	768	5	779	17	810	46
DY-1.18	181	1252	0.409	0.1264	0.0008	1.1765	0.0291	0.0675	0.0016	767	5	790	20	853	51
DY-1.19	194	1273	0.572	0.1368	0.0008	1.2900	0.0110	0.0684	0.0006	826	5	841	7	881	19
DY-1.20	238	1379	0.754	0.1446	0.0010	1.4104	0.0205	0.0707	0.0010	871	6	893	13	950	30
DY-1.21	290	1608	0.083	0.1579	0.0013	1.6478	0.0194	0.0757	0.0008	945	7	989	12	1087	20
DY-1.24	503	2998	0.543	0.1343	0.0011	1.1775	0.0465	0.0636	0.0025	812	6	790	31	728	84
黑云斜长混合岩 DY-16															
DY-16.1	39	289	0.114	0.1377	0.0008	1.2776	0.0113	0.0673	0.0006	832	5	836	7	846	17
DY-16.2	5	37	0.709	0.1274	0.0008	1.1614	0.0392	0.0661	0.0022	773	5	783	26	811	71
DY-16.3	3	21	0.618	0.1271	0.0010	1.1419	0.0730	0.0652	0.0042	771	6	773	49	780	134
DY-16.4	12	61	1.205	0.1451	0.0010	1.3644	0.0226	0.0682	0.0011	874	6	874	14	874	35
DY-16.5	11	66	0.470	0.1475	0.0009	1.4089	0.0179	0.0693	0.0009	887	5	893	11	907	27
DY-16.6	15	93	0.136	0.1612	0.0010	1.5915	0.0157	0.0716	0.0008	964	6	967	10	975	22
DY-16.8	6	40	0.491	0.1403	0.0010	1.3151	0.0332	0.0680	0.0017	846	6	852	21	868	52
DY-16.9	1	6	0.243	0.1370	0.0028	1.2654	0.2507	0.0670	0.0145	828	17	830	165	837	450
DY-16.10	6	42	0.650	0.1274	0.0008	1.1520	0.0363	0.0656	0.0021	773	5	778	24	793	66
DY-16.11	6	40	0.593	0.1273	0.0008	1.2106	0.0369	0.0690	0.0021	772	5	805	25	898	63
DY-16.12	20	150	0.245	0.1331	0.0008	1.2192	0.0111	0.0664	0.0006	806	5	809	7	820	20
DY-16.13	5	28	1.440	0.1320	0.0009	1.2052	0.0604	0.0662	0.0033	799	6	803	40	813	105
DY-16.14	2	17	0.372	0.1414	0.0010	1.3197	0.0810	0.0677	0.0041	853	6	854	52	858	127
DY-16.15	5	34	0.487	0.1254	0.0008	1.1301	0.0309	0.0653	0.0018	762	5	768	21	786	57
DY-16.16	5	35	0.430	0.1327	0.0009	1.2096	0.0459	0.0661	0.0025	803	5	805	31	809	79
DY-16.17	5	31	0.639	0.1329	0.0009	1.2138	0.0435	0.0662	0.0024	804	5	807	29	814	75
DY-16.18	3	22	0.478	0.1269	0.0010	1.1424	0.0680	0.0653	0.0039	770	6	774	46	784	124
DY-16.19	11	78	0.196	0.1413	0.0010	1.3526	0.0280	0.0694	0.0015	852	6	869	18	912	44
DY-16.20	5	31	0.651	0.1311	0.0008	1.1984	0.0426	0.0663	0.0023	794	5	800	28	816	74
DY-16.21	39	240	0.159	0.1632	0.0010	1.6407	0.0158	0.0729	0.0007	974	6	986	10	1012	20
DY-16.22	8	47	0.350	0.1450	0.0009	1.3763	0.0239	0.0688	0.0012	873	6	879	15	894	35
DY-16.23	43	269	0.113	0.1583	0.0010	1.5501	0.0213	0.0710	0.0009	947	6	951	13	958	26
DY-16.24	60	346	0.077	0.1590	0.0014	1.5612	0.0567	0.0712	0.0021	951	8	955	35	964	61

续表1

测试号	含量/ 10^{-6}		同 位 素 比 值							年 龄/Ma					
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
角闪斜长混合岩 DY-19															
DY-19.1	4	25	0.519	0.1257	0.0008	1.1279	0.0341	0.0651	0.0019	763	5	767	23	777	62
DY-19.2	12	39	0.500	0.1722	0.0014	1.7440	0.0230	0.0735	0.0007	1024	8	1025	14	1027	20
DY-19.3	8	60	0.570	0.1221	0.0007	1.0896	0.0203	0.0647	0.0012	743	5	748	14	765	40
DY-19.4	19	137	0.660	0.1237	0.0007	1.1132	0.0107	0.0653	0.0007	752	4	760	7	783	22
DY-19.5	8	60	0.600	0.1220	0.0007	1.0942	0.0211	0.0650	0.0013	742	5	751	14	776	42
DY-19.6	7	52	0.597	0.1221	0.0008	1.0824	0.0277	0.0643	0.0016	743	5	745	19	751	53
DY-19.7	10	66	0.912	0.1222	0.0007	1.0948	0.0208	0.0650	0.0013	743	4	751	14	774	41
DY-19.8	11	87	0.372	0.1258	0.0007	1.1225	0.0148	0.0647	0.0009	764	5	764	10	765	29
DY-19.9	72	510	0.441	0.1339	0.0009	1.2864	0.0081	0.0697	0.0005	810	5	840	5	919	14
DY-19.10	6	44	0.704	0.1225	0.0008	1.1015	0.0309	0.0652	0.0018	745	5	754	21	781	59
DY-19.11	7	51	0.786	0.1227	0.0008	1.0968	0.0280	0.0648	0.0017	746	5	752	19	769	54
DY-19.12	7	49	0.944	0.1222	0.0007	1.0851	0.0205	0.0644	0.0013	743	5	746	14	754	41
DY-19.13	12	89	0.660	0.1230	0.0007	1.0958	0.0137	0.0646	0.0009	748	4	751	9	761	28
DY-19.14	6	45	0.729	0.1219	0.0007	1.2330	0.0300	0.0734	0.0018	741	4	816	20	1025	50
DY-19.15	4	25	0.447	0.1271	0.0008	1.1552	0.0359	0.0659	0.0020	771	5	780	24	804	62
DY-19.16	12	86	0.572	0.1251	0.0007	1.1318	0.0169	0.0656	0.0010	760	5	769	11	794	33
DY-19.17	7	42	0.890	0.1285	0.0008	1.1685	0.0299	0.0660	0.0017	779	5	786	20	805	53
DY-19.18	4	26	0.708	0.1305	0.0009	1.1817	0.0335	0.0657	0.0018	791	6	792	22	797	58
DY-19.20	5	35	0.864	0.1261	0.0008	1.1715	0.0314	0.0674	0.0018	766	5	787	21	849	56
DY-19.21	4	28	0.643	0.1266	0.0008	1.1715	0.0356	0.0671	0.0020	769	5	787	24	841	63
DY-19.22	12	76	0.748	0.1306	0.0008	1.2409	0.0178	0.0689	0.0010	791	5	819	12	896	30
DY-19.23	5	30	0.668	0.1284	0.0009	1.1668	0.0403	0.0659	0.0022	779	5	785	27	803	71
DY-19.24	6	38	0.655	0.1305	0.0008	1.2063	0.0424	0.0671	0.0023	790	5	804	28	840	73
石英闪长岩 DY-20															
DY-20.1	7	47	0.751	0.1233	0.0008	1.2213	0.0104	0.0718	0.0005	749	5	810	7	982	15
DY-20.2	1	1	0.954	0.1233	0.0008	1.0980	0.0099	0.0646	0.0004	750	5	752	7	760	14
DY-20.3	20	141	0.606	0.1232	0.0008	1.0936	0.0088	0.0644	0.0005	749	5	750	6	754	15
DY-20.4	7	46	0.614	0.1230	0.0008	1.2643	0.0110	0.0745	0.0010	748	5	830	7	1056	28
DY-20.5	10	77	0.256	0.1232	0.0008	1.2476	0.0093	0.0734	0.0007	749	5	822	6	1026	18
DY-20.6	10	63	0.865	0.1272	0.0008	1.1927	0.0128	0.0680	0.0007	772	5	797	9	869	20
DY-20.7	8	52	0.624	0.1288	0.0008	1.2471	0.0298	0.0702	0.0005	781	5	822	20	935	14
DY-20.8	4	30	0.587	0.1268	0.0008	1.1538	0.0110	0.0660	0.0005	770	5	779	7	806	17
DY-20.9	6	38	0.888	0.1289	0.0009	1.1674	0.0135	0.0657	0.0004	782	5	785	9	797	13
DY-20.10	8	49	0.675	0.1304	0.0009	1.2091	0.0102	0.0672	0.0004	790	5	805	7	845	14
DY-20.11	6	37	0.561	0.1273	0.0008	1.1536	0.0098	0.0657	0.0004	772	5	779	7	798	14
DY-20.12	14	92	0.670	0.1361	0.0008	1.2815	0.0098	0.0683	0.0004	823	5	838	6	877	13
DY-20.13	4	24	0.574	0.1302	0.0008	1.2266	0.0120	0.0683	0.0011	789	5	813	8	879	34
DY-20.14	4	28	0.745	0.1318	0.0009	1.2470	0.0114	0.0686	0.0007	798	5	822	7	887	21
DY-20.15	4	24	0.641	0.1374	0.0008	1.3162	0.0262	0.0695	0.0006	830	5	853	17	912	17
DY-20.16	2	12	0.483	0.1293	0.0009	1.1739	0.0223	0.0659	0.0004	784	5	788	15	802	13
DY-20.17	4	22	0.738	0.1331	0.0009	1.2488	0.0170	0.0681	0.0023	805	5	823	11	870	70
DY-20.18	1	4	0.570	0.1333	0.0009	1.2972	0.0142	0.0706	0.0007	806	6	844	9	946	20
DY-20.19	8	54	0.627	0.1302	0.0013	1.2501	0.0130	0.0697	0.0004	789	8	823	9	918	13
DY-20.20	9	64	0.398	0.1315	0.0009	1.2704	0.0102	0.0701	0.0005	797	5	833	7	930	15
DY-20.21	4	27	0.317	0.1298	0.0008	1.2149	0.0103	0.0679	0.0005	786	5	807	7	866	16
DY-20.22	4	25	0.581	0.1311	0.0009	1.1975	0.0097	0.0662	0.0008	794	5	799	6	814	27
DY-20.23	6	41	0.446	0.1393	0.0008	1.3011	0.0169	0.0677	0.0006	841	5	846	11	861	19
DY-20.24	9	66	0.063	0.1367	0.0008	1.2716	0.0094	0.0674	0.0005	826	5	833	6	851	16
DY-20.25	1	10	0.567	0.1242	0.0007	1.1092	0.0117	0.0648	0.0006	755	5	758	8	767	21

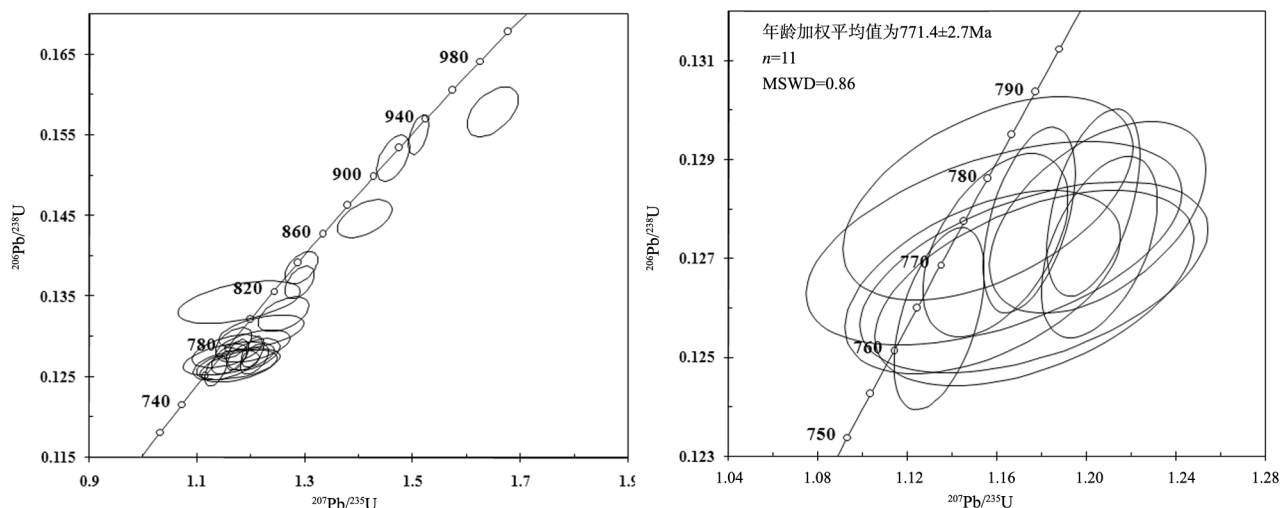


图 4 黑云斜长混合岩(DY-1)锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of biotite plagioclase migmatite

和性很好,说明锆石形成后基本未遭受后期破坏。但年龄数据波动较大,在 760~990Ma 之间变化。可能为同一构造演化序列的产物,也可能为捕获了早期变质锆石的结果。其中,2~3、10~11、18 号锆石,锆石内或粒间年龄结果非常接近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $772 \pm 4.6\text{Ma}$ (MSWD=0.047)(图 5)。

3.2 角闪斜长混合岩(浅色体)

DY-19 样品,其中,9、14、20、22 号锆石的 3 组数据年龄变化太大,后期破坏严重,数据可利用性不大。2 号锆石年龄为 1024Ma,可能为混合岩形成

过程中捕获的早期锆石。其余年龄数据,不论是锆石 3 组数据年龄或粒间年龄结果都较集中,代表混合岩形成时代, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $744.7 \pm 2.8\text{Ma}$ (MSWD=0.53)(图 6)。

3.3 石英闪长岩

DY-20 样品,锆石的 3 组数据变化大,后期遭受破坏明显,仅 2~3、8~11、17~18、22~25 号锆石,锆石的 3 组数据年龄和粒间年龄结果较集中,在 750~850Ma 之间变化(图 7)。应属同一构造作用演化的产物,可以代表成岩年龄。

上述锆石 U-Pb 测年结果显示,研究区混合岩

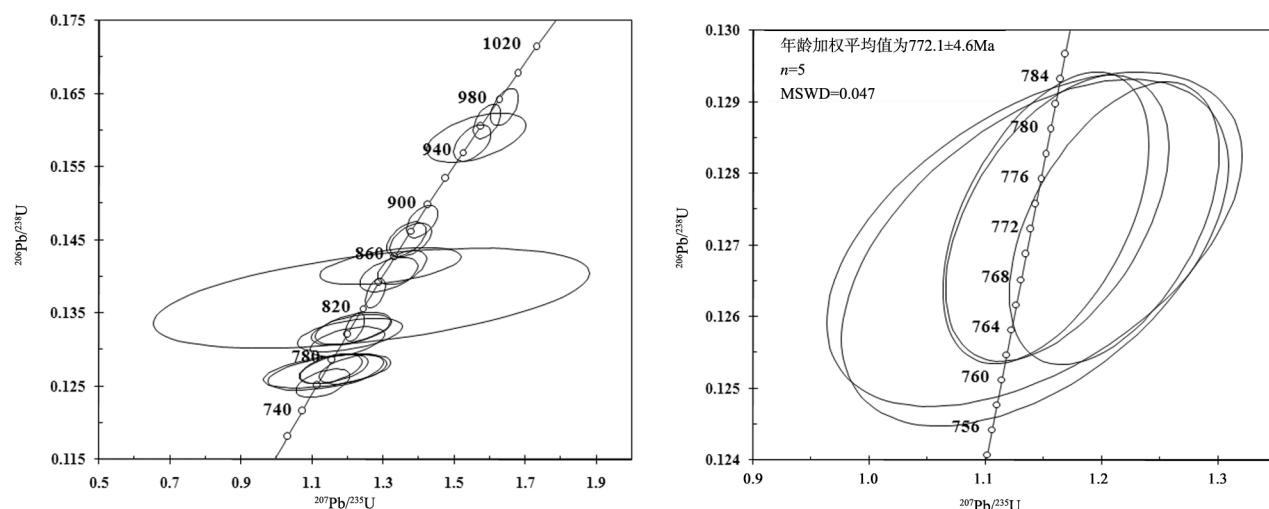


图 5 黑云斜长混合岩(DY-16)锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of biotite plagioclase migmatite

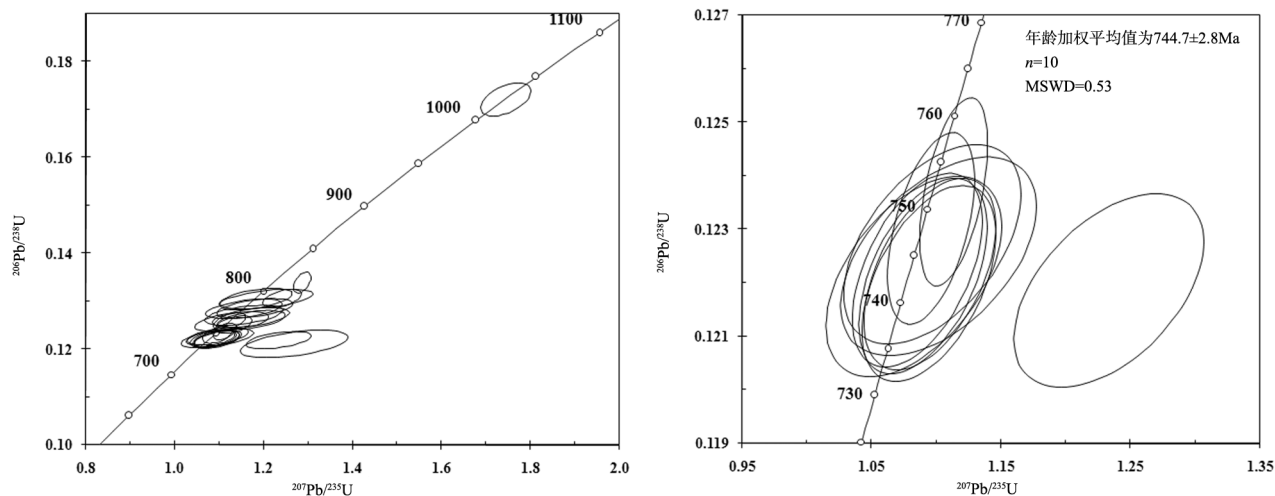


图6 角闪斜长混合岩(DY-19)锆石U-Pb谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams of hornblende plagioclase migmatite

形成于新元古代,时限为740~930Ma。结合前人所测年龄结果^[2-4,15],康定群变质岩原岩形成于古元古代(可能含有更早的岩石组合),受中条运动影响,发生了区域变质作用和混合岩化作用。而康滇地轴最大一次混合岩化作用时期应为晋宁造山运动期,大量的测年数据结果可以佐证^[6-9,16-17]。大田混合岩与大田以北石英闪长岩形成时代相当。

4 混合岩浅色体形成环境及物源

为研究混合岩形成环境及物源,区别矿化混合岩与普通混合岩的特征。选取20件样品进行稀土元素分析,在核工业北京地质研究院分析测

试研究中心完成。

从稀土元素分析看(表2),大田混合岩有2种稀土元素配分型式,显示深熔作用特征^[18]。

(1)混合岩稀土元素分布具明显的倒“V”型式,Eu显示正异常特征(图8-a)。

LREE(轻稀土元素)富集,HREE(重稀土元素)平坦,稀土元素配分曲线呈右倾型式。稀土元素总量为 $44.62 \times 10^{-6} \sim 146.15 \times 10^{-6}$,LREE/HREE值为11.82~24.14, δEu 为1.35~2.57,具正Eu异常。 δCe 在0.95~1.04之间,Ce基本无异常。

此类混合岩是区域变质岩发生深熔作用的初级阶段的产物,判断为大量斜长石分离结晶的结果,亦或是玄武质源区岩石经熔融作用形成的。具体表现为稀土元素总量偏低,除个别矿化混合岩外,U含量均小于 2×10^{-6} 。

(2)具有LREE较HREE富集,稀土配分曲线略显右倾的型式(图8-b)。稀土元素总量为 $108.99 \times 10^{-6} \sim 1118.13 \times 10^{-6}$,LREE/HREE值为3.08~17.36, δEu 为0.18~0.59,具负Eu异常。 δCe 在0.97~1.14之间变化,基本无异常。

此类混合岩为区域变质岩发生深熔作用的高级阶段的产物。岩石呈熔融状态,重熔混合岩的熔融和未熔部分已不能区分,熔体具一定的流动性,发生了交代和混染作用。比较正Eu异常混合岩,其重稀土元素含量明显增加,表明来源于壳源岩石,发生熔融,形成熔体,熔体在流动过程中发生

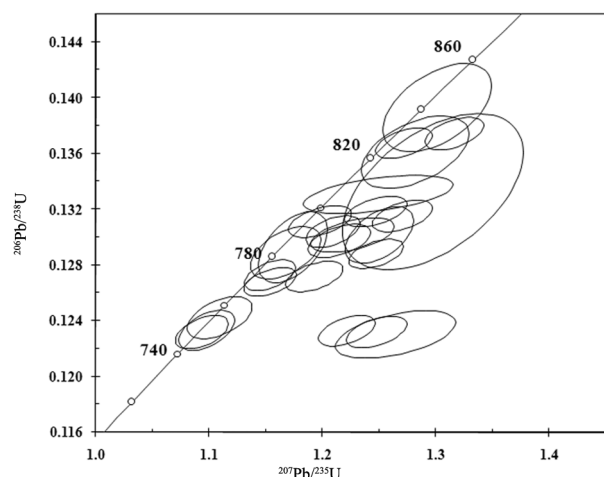


图7 石英闪长岩(DY-20)锆石U-Pb谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagrams of quartz diorite

表 2 混合岩稀土元素分析结果
Table 2 REE compositions of migmatite

样品编号	ZY-13	ZY-17	ZY-33	ZY-49	ZY-50	ZY-51	W-1	W-2	W-8	W-12
La	28.10	37.30	28.60	30.90	15.30	23.00	31.30	23.40	143.00	31.40
Ce	48.20	67.30	54.20	57.10	24.10	39.80	79.90	56.50	264.00	63.90
Pr	4.88	6.97	5.86	5.90	2.19	3.96	10.50	7.03	27.90	7.87
Nd	17.20	24.10	21.20	22.30	6.79	12.60	45.60	28.60	104.00	32.00
Sm	2.37	2.96	3.69	3.56	0.85	1.66	10.50	5.61	17.50	5.90
Eu	1.64	1.71	1.65	1.54	0.73	0.85	1.10	0.34	1.36	1.18
Gd	2.37	2.32	3.81	2.95	0.89	1.46	9.86	5.84	16.00	6.26
Tb	0.30	0.28	0.48	0.42	0.17	0.22	1.90	1.06	2.42	1.08
Dy	1.51	1.38	2.52	1.83	0.92	1.34	10.90	6.22	12.90	6.57
Ho	0.29	0.21	0.44	0.39	0.13	0.23	1.99	1.14	1.95	1.25
Er	0.83	0.64	1.30	1.09	0.34	0.68	6.32	3.47	4.71	3.67
Tm	0.13	0.11	0.17	0.15	0.07	0.11	1.01	0.62	0.71	0.56
Yb	0.82	0.75	0.90	0.96	0.40	0.82	6.18	4.13	3.39	3.40
Lu	0.11	0.12	0.13	0.15	0.05	0.10	0.73	0.62	0.41	0.45
Y	8.08	6.18	11.40	9.67	3.65	6.45	60.00	37.60	56.60	36.20
ΣREE	108.76	146.15	124.95	129.25	52.91	86.83	217.79	144.58	600.25	165.49
LREE	102.39	140.34	115.20	121.30	49.96	81.87	178.90	121.48	557.76	142.25
HREE	6.37	5.81	9.75	7.95	2.95	4.96	38.89	23.10	42.49	23.24
LREE/HREE	16.09	24.14	11.82	15.27	16.94	16.50	4.60	5.26	13.13	6.12
(La/Yb) _N	24.61	35.72	22.77	22.99	27.57	20.07	3.63	4.06	30.26	6.62
δEu	2.12	1.99	1.35	1.45	2.57	1.67	0.33	0.18	0.25	0.59
δCe	1.01	1.02	1.03	1.04	1.02	1.02	1.08	1.08	1.02	1.00
样品编号	W-13	W-15	W-16	W-17	W-18	Y18-1	DT-Y21	XT-1	XT-2	XT-3
La	30.20	266.00	277.00	193.00	108.00	27.10	35.00	45.60	30.90	28.40
Ce	68.00	504.00	547.00	399.00	213.00	61.30	91.80	104.00	82.60	74.70
Pr	8.74	56.10	63.20	46.70	24.30	8.28	12.60	13.70	12.20	10.80
Nd	34.60	214.00	241.00	181.00	90.60	38.30	57.30	54.60	56.10	47.20
Sm	7.84	31.30	43.90	32.90	14.10	10.90	13.60	12.80	16.40	13.10
Eu	0.94	1.50	1.86	2.44	1.72	1.28	1.28	1.74	0.82	0.98
Gd	7.98	22.90	34.70	24.50	11.90	8.99	12.00	9.90	12.00	9.40
Tb	1.50	2.65	5.37	3.37	1.68	2.21	3.68	2.34	3.26	2.64
Dy	8.97	11.10	29.40	15.20	9.81	15.20	23.40	15.00	20.00	16.60
Ho	1.50	1.55	4.96	1.98	1.89	2.98	5.20	3.26	4.28	3.54
Er	3.73	4.00	14.00	4.65	6.95	7.22	14.30	8.96	11.60	9.29
Tm	0.51	0.45	1.81	0.53	1.08	0.88	2.00	1.36	1.64	1.32
Yb	2.56	2.27	10.60	2.55	7.85	4.99	12.90	8.32	9.44	7.50
Lu	0.35	0.31	1.33	0.29	1.20	0.61	1.70	1.20	1.28	1.04
Y	37.00	41.80	124.00	58.00	52.10	65.40	128.00	82.80	101.00	78.20
ΣREE	177.42	1118.13	1276.13	908.10	494.08	190.24	286.76	282.78	262.52	226.51
LREE	150.32	1072.90	1173.96	855.04	451.72	147.16	211.58	232.44	199.02	175.18
HREE	27.10	45.23	102.17	53.06	42.36	43.08	75.18	50.34	63.50	51.33
LREE/HREE	5.55	23.72	11.49	16.11	10.66	3.42	2.81	4.62	3.13	3.41
(La/Yb) _N	8.46	84.05	18.74	54.29	9.87	3.90	1.95	3.93	2.35	2.72
δEu	0.36	0.17	0.15	0.26	0.41	0.38	0.30	0.46	0.17	0.26
δCe	1.03	1.01	1.01	1.03	1.02	0.99	1.07	1.01	1.04	1.05

注:测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心

了分异结晶作用所致。

(3)矿化混合岩具有稀土元素总量较高、强Eu亏损,轻、重稀土元素平坦,V型稀土元素曲线(图8-c),与图8-b相似。

岩石具明显的分异结晶作用,类似于含水(流体)或高度分异的花岗岩类稀土元素配分型式。指示赋矿围岩为深熔作用晚期的产物。

5 讨论

5.1 大田地区混合岩化作用

大田地区石英闪长岩体和变质-混合岩锆石测年时限为740~930Ma,主要集中在744~772Ma之间,与康滇地轴近年众多测年数据较一致^[6-9,16-17],是晋宁造山运动期的产物。

以往的研究表明^{①②③},在康滇地轴中南段的米易、牟定地区广泛发育的一套变质-混合杂岩组成的结晶基底岩系中,亦发生了类似的韧性剪切带控制的变质-混合岩化作用,并有铀矿化。晋宁期大规模韧性剪切-变质-混合岩化作用是康滇地轴晋宁造山运动重要的地质过程。混合岩化发生在晋宁造山运动晚期,由挤压向隆升拉伸的转换阶段,其叠加在古老区域变质作用之上。这就不难理解,在古老结晶基底岩系变质-混合杂岩中测到古元古代年龄,也测到新元古代年龄。

康滇地轴上,晋宁期韧性剪切-变质-混合岩化作用机制类似李兆麟提出的变质深熔作用^[19]。受晋宁运动的影响,地槽回返,强烈的褶皱和断裂活动提供热源,热流上升,达到岩石的深熔作用温压条件,使原岩受改造,长英质低融组分选择性重熔,熔体发生成分分异作用,形成各类混合岩浅色体或混合花岗岩类。

5.2 混合岩化作用与铀矿化

混合岩形成过程中,铀从原岩中被大量向外带出。退化变质作用阶段,发育绿泥石化、绿帘石化、黝帘石化等蚀变,铀在混合岩中以颗粒状晶质铀矿形式赋存。同时,混合岩浅色体中铀背景值大大提高,为后期铀成矿提供了有利的岩性条件。

区内具规模的铀矿化多赋存于含石墨片麻岩与混合岩浅色体接触部位,产于浅色体构造裂隙中。受气水热液作用影响,伴随有硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、辉钼矿化等蚀变,形成高品位的晶

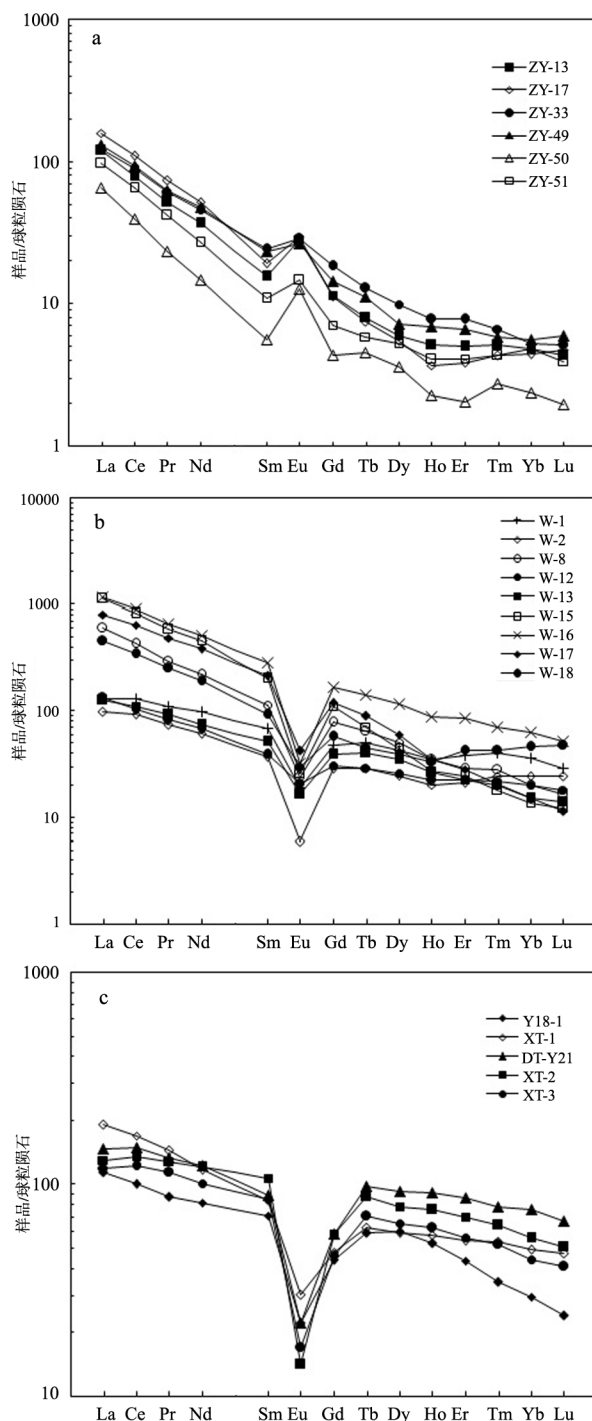


图8 混合岩稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of migmatite

质铀矿,局部铀含量可达58%。据稀土元素特征分析,深熔作用晚期分异结晶形成的混合岩为铀矿化有利赋矿围岩,对工作区铀矿找矿工作具有指导意义。

6 结 论

(1) 锆石测年显示,大田混合岩主要形成时限为740~930Ma,集中在740~770Ma,表明其成岩时代为晋宁造山运动期,为康滇地轴发生最大一次混合岩化作用时期。

(2) 混合岩稀土元素具2种明显不同的配分型式,显示深熔作用特征。深熔作用早期混合岩具正Eu异常特征;晚期具负Eu异常,同时有分异结晶的地球化学特征;有利赋矿围岩为深熔作用晚期分异形成的混合岩(浅色体)。

参考文献

- [1] 辜学达,刘啸虎.四川省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:1-20.
- [2] 袁海华,张树发,张平.渡口市同德混合片麻岩初获太古宙年龄信息[J].成都理工大学学报(自然科学版),1985,8(3):79-84.
- [3] 袁海华,张树发,张平.康滇地轴结晶基底的时代归属[J].成都理工大学学报(自然科学版),1986,13(4):64-70.
- [4] 丛柏林.攀西古裂谷的形成与演化[M].北京:科学出版社,1988:1-96.
- [5] 李复汉,覃嘉敏,申玉连,等.康滇地区的前震旦系[M].重庆:重庆出版社,1988:109-149.
- [6] 胥德恩,陈友良,张应全,等.康定杂岩的时代及成因探讨[J].地质论评,1995,41(2):101-111.
- [7] 陈岳龙,罗照华,赵俊香,等.从锆石SHRIMP年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因[J].中国科学(D辑),2004,34(8):687-697.
- [8] 杜利林,耿元生,杨崇辉,等.扬子地台西缘康定群的再认识:来自地球化学和年代学证据[J].地质学报,2007,81(11):1562-1577.
- [9] 耿元生,杨崇辉,王新社,等.扬子地台西缘结晶基底时代[J].高校地质学报,2007,13(3):429-441.
- [10] 姚建,李巨初,陈志国,等.攀枝花市大田505地区混合岩成因及其与铀矿化关系初探[C]//中国核科学进展报告(第二卷).2011:253-259.
- [11] 张成江,陈友良,李巨初,等.康滇地轴巨粒晶质铀矿的发现及其地质意义[J].地质通报,2015,34(12):2219-2226.
- [12] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-56.
- [13] 李怀坤,耿建珍,郝爽,等.用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石U-Pb同位素年龄的研究[J].矿物学报,2009,(增刊):600-601.
- [14] 梁细荣,李献华,刘永康,等.激光探针等离子体质谱法(LA-ICPMS)用于年轻锆石U-Pb定年[J].地球化学,2000,29(1):1-5.
- [15] 刘文中,徐士进,王汝成,等.攀西麻粒岩锆石U-Pb年代学:新元古代扬子陆块西缘地质演化新证据[J].地质论评,2005,51(4):470-476.
- [16] 刘文中.扬子陆块西缘康定杂岩的形成时代和构造环境[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2006,26(4):1-5.
- [17] 赵俊香,陈岳龙,李志红.康定杂岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义[J].现代地质,2006,20(3):378-385.
- [18] 王水炯,李曙光.混合岩研究及地球动力学意义[J].地学前缘,2014,21(1):21-31.
- [19] 李兆麟.关于变质深熔作用与成岩成矿关系的思考[J].地学前缘,2001,8(3):29-37.
- ① 姚建,张成江.攀枝花市大田地区混合岩成因研究.成都理工大学档案馆,2014.
- ② 赵剑波,陈志国,康友纯,等.四川省米易—云南省元谋地区铀资源潜力评价.核工业二八〇研究所档案馆,2012.
- ③ 李巨初,李莎莎,赵剑波.康滇地轴中南段米易—元谋地区结晶基底岩系混合-交代作用与铀矿化研究.成都理工大学档案馆,2011.