doi: **10.12029/gc20170408**

刘晓阳, 王杰, 任军平, 龚鹏辉, 何胜飞, 贺福清. 2017. 赞比亚谦比西铜矿花岗岩年龄及其指示意义[J]. 中国地质, 44(4): 755−765.
Liu Xiaoyang, Wang Jie, Ren Junping, Gong Penghui, He Shengfei, He Fuqing. 2017. Age of granites from the Chambishi copper mine in Zambia and its implications[J]. Geology in China, 44(4): 755−765(in Chinese with English abstract).

赞比亚谦比西铜矿花岗岩年龄及其指示意义

刘晓阳 王杰 任军平 龚鹏辉 何胜飞 贺福清

（中国地质调查局天津地质调查中心,300170）

提要:赞比亚谦比西铜矿位于新元古代卢菲利安弧构造带内。矿体呈似层状分布于新元古代罗安组的砂页岩中。罗安组地层不整合于古元古代穆瓦系砂砾岩之上,穆瓦系砂砾岩不整合于下部谦比西花岗岩基底之上。锆石U−Pb测年结果表明谦比西花岗岩年龄为(1984±6)Ma~(1986±6)Ma;穆瓦系年龄上限为(1932±8) Ma。谦比西花岗岩岩石地球化学、稀土元素与球粒陨石配分特征均表现为S型花岗岩的特征。区域地质资料表明,可能由于古元古代班韦卢地块与坦桑尼亚太古宙克拉通碰撞作用诱发了卢菲利安古元古代花岗岩基底的形成;太古宙刚果克拉通于早元古代(2100~1800 Ma)期间活化,并形成一稳定块体。

关 键 词:赞比亚;谦比西铜矿;花岗岩;锆石U−Pb年龄

中图分类号: P588.12^{+};P597^{+}.3;P618.41 **文献标志码**:A **文章编号**:1000−3657(2017)04−0755−11

Age of granites from the Chambishi copper mine in Zambia and its implications

LIU Xiaoyang, WANG Jie, REN Junping, GONG Penghui, HE Shengfei, HE Fuqing

(*Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170*, China*)

Abstract: The Chambishi copper mine in Zambia is located in the central Africa copper− cobalt metallogenic belt. The bedded orebodies occur in the Neoproterozoic sandshales of Roan Formation. The Roan Formation unconformably overlies the Early Proterozoic sandy conglomerate of Muwa System, which in turn overlies the lower Chambishi granite basement. U−Pb zircon dating yielded the age of 1984 ± 6− 1986 ± 6 Ma for Chambishi granite, and the upper age limit is 1932 ± 8 Ma for Muwa System. The lithogeochemistry and chondrite− normalized REE patterns of Chambishi granites have the characteristics of S− type granites. Combined with the data of regional geological evolution, the authors believe that Archean Congo craton may have experienced activation over a large area during Early Proterozoic period, and a stable ancient block had been formed in the Early Proterozoic period.

Keywords: Zambia; Chambishi copper mine; granite; zircon U−Pb age

About the first author: LIU Xiaoyang, male, born in 1977, senior geologist, engages in the study of geology and mineral resources exploration; E−mail: lxylyw2003@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 121201006000150014).

收稿日期:2017−07−18;**改回日期**:2017−08−10

基金项目:中国地质调查局项目(121201006000150014)资助。

作者简介:刘晓阳,男,1977生,高级工程师,主要从事地质矿产勘查工作;E−mail:lxylyw2003@163.com。

1 引 言

赞比亚谦比西铜矿位于新元古代泛非构造运动带卢菲利安弧的外部褶皱-冲断带内,此构造带内广泛产出以砂页岩型为主的铜钴多金属矿,称为中非铜钴成矿带。关于此成矿带内的矿床成因模式,部分学者指出矿体的形成可能与卢菲利安弧下伏基底花岗岩或花岗片麻岩等存在成因联系:罗安系在沉积成岩时蒸发的海水向下迁移,使其温度达到115~220℃,当流体迁移至基底时,与基底花岗类岩石发生强烈的水岩相互作用,导致成矿流体富集金属(Ross et al.,2006; Muchez et al.,2005)。基底花岗岩类可能为成矿热液或流体提供了成矿物质。关于卢菲利安弧下伏基底的研究由于缺少系统的年代学数据,而没有确切的定论。早期认为其基底可能是刚果太古宙克拉通的一部分,太古宙的还原环境有利于铜的富集。而最近年代学数据指出此基底形成于古元古代,与北东部的班韦卢地块年龄一致(De Waele et al.,2005; Fleischer,1984; Annels et al.,1983; Sweeney et al.,1991)。本文报道了获得的谦比西铜矿基底花岗岩锆石U-Pb年龄,并结合微量元素地球化学分析数据,初步探讨了谦比西花岗岩的岩石成因,并试图探讨卢菲利安弧下部基底于古元古代时期可能存在的地质演化。

2 地质背景

卢菲利安弧由赞比亚中部向西北方向延至刚果(金)境内,南部界线为姆韦博西(Mwembeshi)断层带,北部边界为古元古代班韦卢(Bangweulu)地块,北西部边界为中元古代基巴拉带和太古宙刚果克拉通,南东部边界为中元古代伊鲁米德(Irumide)带(图1A)。矿床分布于卡富埃(Kafue)背斜的东北翼,位于孔科拉—恩昌加—谦比西—恩卡纳—卢安厦构成的南西次级矿带中部的谦比西盆地的北缘(图1B)。此次级成矿带北向延伸约150 km,产出孔科拉、恩昌加、谦比西、尺布鲁玛西(chibuluma

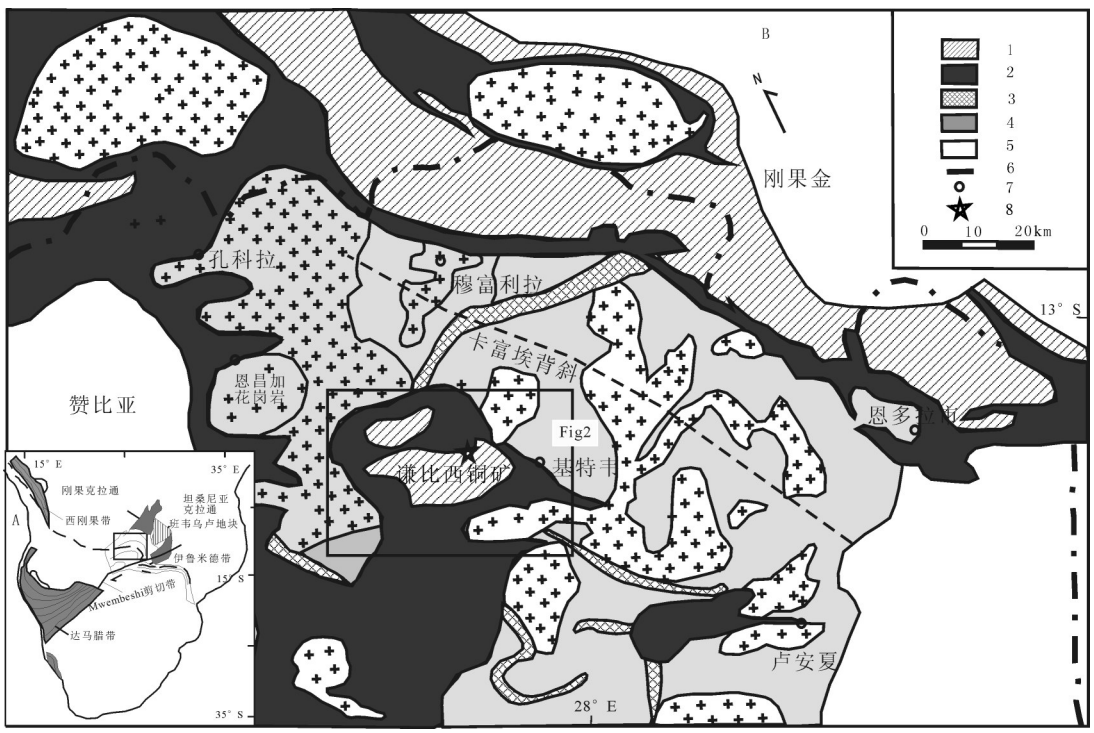

图1 谦比西铜矿区域地质简图(A—大地构造位置;B—区域地质简图)

1—昆德隆古群;2—罗安群; 3—穆瓦系; 4—卢富布片岩; 5—花岗岩; 6—国界; 7—城市;8—取样位置

Fig. 1 Simplified geological map of the Chambishi copper mine

(A- Tectonic location; B-Simplified regional geological map)

1-Kundelungu Group; 2-Roan Group; 3-Muva System; 4 Lufubu schist; 5-Granite; 6-Country boundary; 7-City; 8-Sampling location

west)、恩卡纳、巴鲁巴(baluba)、卢安夏等多个矿床。此成矿带地层主要由基底杂岩和加丹加超群两部分构成。基底杂岩包括基底花岗岩或片麻岩,卢布富(Lufubu)系和上覆的穆瓦系;其中卢布富系为石英-云母片岩,穆瓦系为石英岩或变质砂砾岩。加丹加超群主要包括下部罗安组和上部昆德隆古组两部分,主体岩性为陆源碎屑沉积岩,向上演变为浅海相泥质碎屑岩和碳酸盐沉积,局部各沉积相岩石交互出现。基底杂岩构成宽泛的卡富埃背斜的轴部,形成褶皱隆起区;两翼为加丹加沉积岩,加丹加沉积岩形成了NNW向褶皱,与卡富埃背斜平行(颜平等,2006; 肖波等,2014)。

3　矿床地质及取样位置

矿区主体为一单斜构造。基底花岗岩出露于矿区四周,其上不整合接触卢富布片岩。穆瓦系变质沉积岩不整合于卢布富片岩之上,局部直接不整合于基底花岗岩之上,其上不整合接触新元古界加丹加系沉积岩(图2)。加丹加系地层岩性自下至上分别为下罗安组砂岩、泥质板岩夹石英岩互层,其底部以含有巨粒的底砾岩为特征,上罗安组片岩、石英岩和厚层白云岩,木瓦夏组板岩,下昆德隆古组冰碛岩、灰岩和中上昆德隆古组砂岩、页岩夹石英岩。矿体位于下罗安组泥质板岩中,上盘围岩还

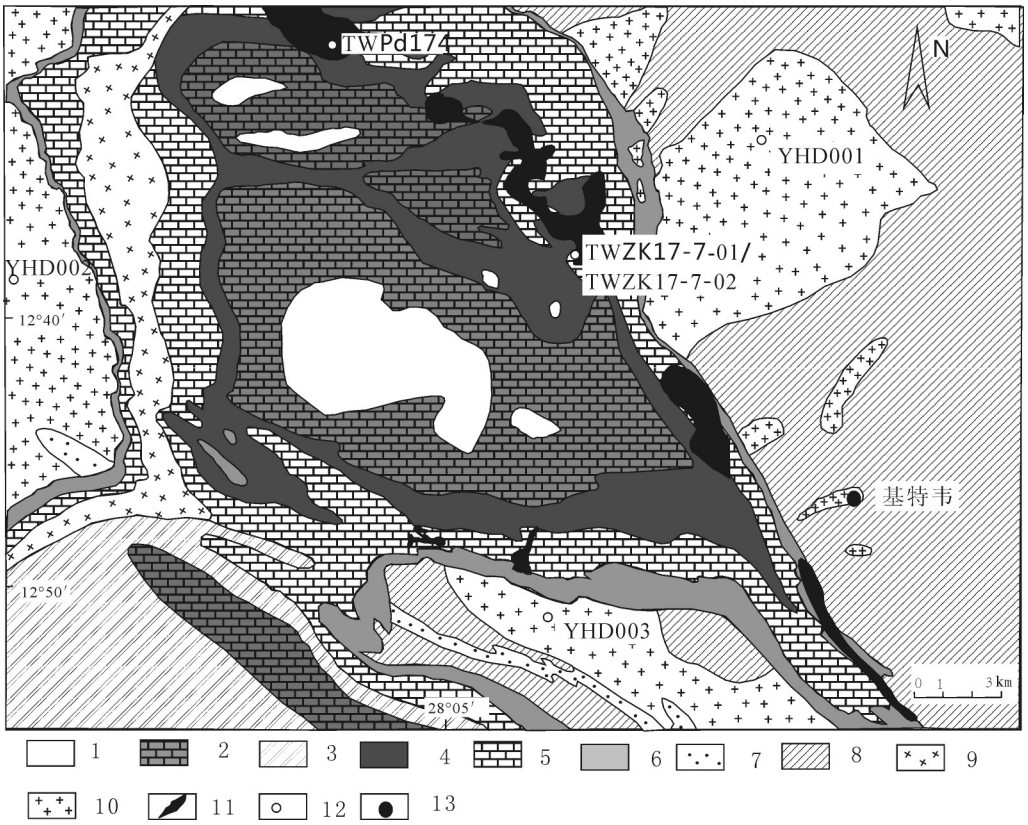

图 2 谦比西铜矿地质简图及取样位置

1—中上昆德古龙组砂、页岩夹石英岩;2—下昆德古龙组灰岩、冰碛岩;3—木瓦夏板岩;4—上罗安组泥岩;5—上罗安组白云岩;6—下罗安组砂质砂岩、泥岩夹石英岩互层;7—穆瓦系变质砂砾岩;8—卢富布片岩;9—辉长岩;10—谦比西花岗岩;11—谦比西矿体;12—取样位置;13—城镇

Fig. 2 Simplified geological map of the Chambishi copper mine and sampling positions

1 −Sandstone and shale intercalated with quartzite, upper and middle Kundelungu Formation; 2 −Limestone and tillite of Lower Kundelungu Formation; 3 −Mwashia slate; 4 −Upper Roan mudstone; 5− Upper Roan dolomite; 6− Lower Roan sandy mudstone interbedded with quartzite; 7− Muwa metamorphic conglomerate; 8− Lufubu schist; 9− Gabbro; 10− Chambishi granite; 11 −Chambishi orebody; 12 −Sampling location; 13 −Town

包括石英岩和泥质板岩互层、石英岩、燧石白云岩等;下盘围岩主要有砾岩、石英岩和下盘石英岩、长石砂岩。

本文所取样品YHD001、YHD002和YHD003位于谦比西铜矿外围出露的花岗岩,TWPd174位于谦比西主矿体原露天采场174 m斜巷中,为浅部花岗岩。TW17-7-01位于东南矿体ZK17-7钻孔中(图2),钻孔深度650 m,为深部花岗岩。TW17-7-02不整合覆盖于TW17-7-01之上,矿区地质资料将其归入穆瓦系砂砾岩,见有少量碳酸盐化、绿泥石化和斑铜矿(仅限所取岩心标本)。TW17-7-02之上则为加丹加系矿化片岩。

4 分析方法

锆石是在河北廊坊物化勘察研究所采用浮选和电磁选方法获得的。锆石阴极发光(CL)显微照相在北京锆年领航科技有限公司完成。样品全分析、微量、稀土元素测试、锆石U-Pb定年测试在中国地质调查局天津地质调查中心完成。锆石U-Pb定年利用LA-MC-ICPMS完成,其多接收器电感耦合等离子体质谱仪为Thermo Fisher公司制造的Neptune, 激光器为美国ESI公司生产的UP193nm, FX ArF准分子激光器。利用193 nm激光器对锆石进行剥蚀, 通常采用的激光剥蚀的束斑直径为35 μm或50 μm。采用的激光能量密度为13~14 J/cm, 频率为8 ~10 Hz, 激光剥蚀物质以He为载气送入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同位素原位测定。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ICPMSDataCal程序和Kenneth R. Ludwig的Isoplot程序进行数据处理, 采用Tom Andersen的方法对普通铅进行校正(李怀坤等,2009)。利用NIST612玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。

5 测试结果

5.1 锆石U-Pb年龄

本文仅对矿区内的3个样品TWPd174、TWZK17-7-01和TWZK17-7-02进行了锆石U-Pb年龄测试,结果见表1。样品TWPd174锆石多为长柱状晶体,锆石长宽约比为3:1;锆石多破损,亦可见少量不规则状(图3)。锆石阴极发光图像可见规则的震荡环带,无明显增生边,表明锆石为岩浆锆石。测试的32个测试点拟合的不一致线与谐和线的上交点年龄为(2009±10) Ma,下交点年龄为(384±74) Ma(MSWD=3.0)。32个点中有8个点落在谐和线上,其$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为(1986±6)Ma(MSWD=0.0056)(图4a)。样品TWZK17-7-01与TWPd174锆石形态一致,多为岩浆锆石。测试的32个测试点拟合的不一致线与谐和线的上交点年龄为(1983±10) Ma,下交点年龄为(284±53) Ma(MSWD=5.0)。32个点中有11个点落在谐和线上,其$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为(1984±6)Ma(MSWD=1.7)(图4b)。样品TWZK17-7-02与TWPd174和TWZK17-7-01锆石形态差异较大,样品TWZK17-7-02锆石多为近椭圆形,锆石阴极发光图像可见锆石多为破损的长柱状锆石部分经磨圆而成,锆石亦可见震荡环带,但多破损,锆石未见明显的增生边。测试过程中分别对锆石核部及边缘进行了分类测试。其中锆石核部测试的50个点拟合的不一致线与谐和线的上交点年龄为(1949±12) Ma,下交点年龄为(136±110) Ma(MSWD=3.1)(图4c)。50个点中有14个点落在谐和线上,其$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为(1932±8)Ma(MSWD=1.19)。锆石边缘部位测试24个测试点拟合的不一致线与谐和线的上交点年龄为(1987±13)Ma,下交点年龄为(736±83) Ma(MSWD=1.3)。24个点中有10个点落在谐和线上,其$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为(1968±9)Ma(MSWD=2.5)(图4d)。

5.2 全岩地球化学

本文还对所取样品进行了全岩地球化学测试,其结果见表2。其中除TWZK17-7-02样品外,其余花岗岩样品以具有较高的SiO_2含量(71.50% ~ 73.41%),较富的全碱含量(7.71% ~ 9.22%)、较高的K_2O/Na_2O(1.38 ~ 2.34)比值为特征(图5a)。在成分上属高钾钙碱到钾玄岩系列的花岗岩(图5b)。具有较高的铝饱和指数(1.44 ~ 1.60),较低的样品CIPW分异指数(86.4 ~ 88.68),较高的CIPW刚玉分子数(1.59 ~ 2.04),总体上为一套分异程度较低的弱过铝质花岗岩。

稀土元素特征表现为较高的稀土元素总量(∑REE=166.16×10^{-6} ~ 191.41×10^{-6});较高的轻重稀土

表1 锆石U−Pb测年结果

Table 1 Results of U−Pb dating of zircon samples

测点号	Pb 10^{-6}	U 10^{-6}	同位素比值						表面年龄值/Ma					
			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1 σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1 σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1 σ	$*^{207}Pb/^{206}Pb$	1 σ	$*^{207}Pb/^{235}U$	1 σ	$*^{206}Pb/^{238}U$	1 σ
TWPD174，花岗岩														
4-1-1	63	168	0.1241	0.0005	5.819	0.028	0.3402	0.0019	2015	7	1949	9	1888	10
4-1-2	176	514	0.1221	0.0005	5.254	0.038	0.312	0.0023	1988	7	1861	13	1750	13
4-1-3	135	340	0.1237	0.0005	5.753	0.033	0.3373	0.0021	2010	7	1939	11	1874	12
4-1-4	65	162	0.124	0.0005	5.881	0.028	0.344	0.0018	2014	7	1958	9	1906	10
4-1-5	226	718	0.1201	0.0005	4.674	0.035	0.2824	0.0022	1957	7	1763	13	1603	12
4-1-6	40	133	0.117	0.0005	4.202	0.023	0.2606	0.0016	1910	8	1674	9	1493	9
4-1-7	164	536	0.1186	0.0005	4.462	0.032	0.2728	0.002	1936	7	1724	12	1555	11
4-1-8	153	439	0.1213	0.0005	5.303	0.03	0.3171	0.002	1975	7	1869	11	1775	11
4-1-9	127	345	0.1228	0.0005	5.609	0.029	0.3313	0.0019	1997	7	1917	10	1845	11
4-1-10	122	334	0.1226	0.0005	5.525	0.036	0.3269	0.0026	1994	8	1904	12	1823	14
4-1-11	70	210	0.1209	0.0005	4.926	0.022	0.2954	0.0015	1970	7	1807	8	1668	9
4-1-12	75	208	0.1221	0.0005	5.495	0.03	0.3263	0.0021	1988	7	1900	10	1820	12
4-1-13	102	256	0.122	0.0006	5.389	0.027	0.3204	0.0017	1986	8	1883	10	1791	9
4-1-14	79	219	0.1222	0.0006	5.415	0.026	0.3215	0.0017	1988	8	1887	9	1797	10
4-1-15	70	186	0.1222	0.0006	5.434	0.027	0.3225	0.0017	1989	8	1890	9	1802	10
4-1-16	127	284	0.1218	0.0005	6.029	0.028	0.359	0.0019	1983	7	1980	9	1977	10
4-1-17	80	222	0.1213	0.0005	5.128	0.027	0.3065	0.0019	1976	7	1841	10	1724	11
4-1-18	51	136	0.1237	0.0005	5.704	0.028	0.3345	0.0018	2010	8	1932	9	1860	10
4-1-19	104	309	0.1209	0.0005	4.81	0.045	0.2886	0.0025	1969	8	1787	17	1634	14
4-1-20	51	139	0.1226	0.0005	5.588	0.027	0.3306	0.0018	1994	8	1914	9	1841	10
4-1-21	79	194	0.1235	0.0005	5.737	0.026	0.337	0.0018	2007	7	1937	9	1872	10
4-1-22	72	185	0.1219	0.0009	6.033	0.045	0.359	0.0019	1984	13	1981	15	1977	11
4-1-23	88	429	0.1089	0.0005	2.874	0.022	0.1914	0.0015	1782	8	1375	10	1129	9
4-1-24	39	93	0.1227	0.0006	6.082	0.033	0.3594	0.0019	1996	9	1988	11	1979	10
4-1-25	85	233	0.1222	0.0005	5.059	0.032	0.3004	0.0021	1988	7	1829	11	1693	12
4-1-26	134	307	0.1225	0.0005	6.068	0.028	0.3594	0.0019	1992	7	1986	9	1979	11
4-1-27	208	878	0.1123	0.0005	3.48	0.021	0.2247	0.0015	1838	7	1523	9	1307	9
4-1-28	129	319	0.1222	0.0005	6.087	0.032	0.3613	0.0021	1989	7	1988	11	1988	12
4-1-29	123	317	0.1216	0.0005	6.046	0.028	0.3607	0.0019	1980	7	1983	9	1985	11
4-1-30	57	135	0.1236	0.0006	5.888	0.033	0.3455	0.0018	2009	9	1959	11	1913	10
4-1-31	178	403	0.1216	0.0005	6.05	0.03	0.361	0.0019	1979	8	1983	10	1987	10
4-1-32	46	117	0.122	0.0005	6.071	0.033	0.3608	0.0021	1986	8	1986	11	1986	11
TWZK17-7-01，花岗岩														
1-1-01	54	122	0.1226	0.0005	5.993	0.027	0.3545	0.002	1995	7	1975	9	1956	11
1-1-02	79	581	0.1333	0.0007	1.866	0.014	0.1015	0.0008	2142	9	1069	8	623	5
1-1-03	272	843	0.1174	0.0005	4.443	0.031	0.2744	0.0019	1918	7	1720	12	1563	11
1-1-04	247	756	0.1173	0.0004	4.58	0.022	0.2832	0.0017	1915	7	1746	9	1608	10
1-1-05	169	508	0.1187	0.0005	4.962	0.049	0.3032	0.0029	1937	7	1813	18	1707	16
1-1-06	133	391	0.1206	0.0004	5.204	0.028	0.313	0.002	1965	6	1853	10	1755	11
1-1-07	147	313	0.1211	0.0004	5.957	0.026	0.3567	0.002	1973	6	1970	8	1967	11
1-1-08	145	457	0.1194	0.0004	4.733	0.025	0.2875	0.0018	1947	6	1773	9	1629	10
1-1-9	200	877	0.1105	0.0004	3.199	0.026	0.21	0.0017	1808	7	1457	12	1229	10
1-1-10	143	503	0.1179	0.0004	4.323	0.045	0.266	0.0028	1924	6	1698	18	1520	16
1-1-11	76	190	0.1217	0.0004	5.958	0.03	0.3551	0.0021	1981	6	1970	10	1959	12
1-1-12	63	196	0.1206	0.0006	4.844	0.026	0.2914	0.0016	1965	8	1793	10	1648	9
1-1-13	96	302	0.1209	0.0004	4.872	0.025	0.2923	0.0018	1969	6	1797	9	1653	10
1-1-14	194	801	0.1127	0.0004	3.419	0.019	0.2201	0.0014	1843	7	1509	8	1282	8
1-1-15	170	604	0.1174	0.0005	4.154	0.045	0.2566	0.0027	1917	7	1665	18	1472	16
1-1-16	127	655	0.1129	0.0006	2.489	0.048	0.1598	0.0025	1847	9	1269	24	956	15
1-1-17	143	586	0.1417	0.0009	3.676	0.03	0.1882	0.0011	2248	12	1566	13	1111	6
1-1-18	98	287	0.1204	0.0004	4.741	0.031	0.2856	0.0021	1962	6	1775	12	1620	12
1-1-19	61	229	0.1154	0.0005	3.785	0.023	0.2379	0.0017	1886	8	1590	10	1376	10
1-1-20	69	407	0.1146	0.0006	2.441	0.018	0.1545	0.001	1874	9	1255	9	926	6
1-1-21	62	202	0.1174	0.0005	4.217	0.044	0.2604	0.0026	1918	7	1677	18	1492	15
1-1-22	213	688	0.118	0.0004	4.421	0.036	0.2717	0.0024	1926	6	1716	14	1549	14
1-1-23	152	361	0.1228	0.0004	5.962	0.028	0.3521	0.002	1997	6	1970	9	1945	11
1-1-24	72	253	0.1179	0.0004	4.037	0.026	0.2483	0.0017	1925	7	1642	10	1430	10
1-1-25	79	112	0.1223	0.0006	5.985	0.036	0.3548	0.0022	1991	9	1974	12	1957	12
1-1-26	153	365	0.122	0.0004	5.967	0.025	0.3546	0.0019	1986	6	1971	8	1957	11
1-1-27	112	252	0.1221	0.0004	5.971	0.026	0.3546	0.002	1987	6	1972	9	1957	11
1-1-28	107	235	0.1221	0.0004	5.975	0.028	0.355	0.0021	1987	6	1972	9	1958	11
1-1-29	69	166	0.1218	0.0004	5.987	0.027	0.3565	0.002	1983	6	1974	9	1965	11
1-1-30	167	440	0.1202	0.0004	5.445	0.026	0.3285	0.0019	1959	6	1892	9	1831	11
1-1-31	43	102	0.1211	0.0005	5.956	0.03	0.3567	0.0022	1972	7	1969	10	1966	12
1-1-32	75	185	0.1212	0.0004	5.972	0.025	0.3574	0.0019	1974	6	1972	8	1970	11

续表1

测点号	Pb 10^{-6}	U 10^{-6}	同位素比值						表面年龄值/Ma					
			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1 σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1 σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1 σ	$*^{207}Pb/^{206}Pb$	1 σ	$*^{207}Pb/^{235}U$	1 σ	$*^{206}Pb/^{238}U$	1 σ
TWZK17-7-2.1，变质砂砾岩 ,内部核 50 个测点														
2-1-1	64	188	0.1183	0.0006	5.038	0.097	0.3088	0.0019	1931	9	1826	35	1735	11
2-1-2	69	188	0.1197	0.0006	5.501	0.106	0.3334	0.0021	1951	9	1901	37	1855	12
2-1-3	44	98	0.1205	0.0006	5.837	0.113	0.3513	0.0021	1964	9	1952	38	1941	12
2-1-4	45	115	0.1227	0.0006	5.724	0.11	0.3382	0.0021	1997	9	1935	37	1878	12
2-1-5	37	86	0.1214	0.0006	5.838	0.112	0.3488	0.0021	1977	9	1952	38	1929	11
2-1-6	82	189	0.1317	0.0009	7.007	0.139	0.3859	0.0023	2121	12	2112	42	2104	12
2-1-7	25	60	0.119	0.0007	5.346	0.105	0.3257	0.0019	1942	11	1876	37	1818	11
2-1-8	20	45	0.1204	0.0007	5.8	0.113	0.3492	0.0021	1963	10	1946	38	1931	12
2-1-9	30	610	0.1557	0.0008	0.6555	0.0126	0.0305	0.0013	2409	9	512	10	194	9
2-1-10	27	72	0.1222	0.0007	5.897	0.115	0.3499	0.0021	1989	10	1961	38	1934	11
2-1-11	58	151	0.1188	0.0006	5.31	0.102	0.3241	0.0019	1939	8	1870	36	1810	11
2-1-12	60	146	0.1226	0.0006	5.727	0.11	0.3388	0.002	1994	8	1935	37	1881	11
2-1-13	42	98	0.1205	0.0006	5.782	0.118	0.3481	0.0021	1963	8	1944	40	1926	12
2-1-14	90	255	0.1172	0.0006	4.815	0.093	0.298	0.0026	1914	10	1788	35	1682	15
2-1-15	23	58	0.1173	0.0006	5.317	0.102	0.3288	0.002	1915	8	1872	36	1832	11
2-1-16	91	236	0.1191	0.0007	5.622	0.11	0.3424	0.002	1942	10	1919	37	1898	11
2-1-17	42	77	0.1222	0.0006	5.862	0.112	0.3478	0.0021	1989	8	1956	38	1924	11
2-1-19	78	207	0.1213	0.001	5.802	0.12	0.3469	0.0021	1975	15	1947	40	1920	11
2-1-20	36	115	0.1193	0.0006	5.237	0.101	0.3183	0.002	1946	8	1859	36	1781	11
2-1-21	75	163	0.1207	0.0009	5.733	0.118	0.3446	0.0021	1966	13	1936	40	1909	12
2-1-22	62	189	0.1178	0.0007	4.976	0.096	0.3063	0.002	1923	10	1815	35	1722	11
2-1-23	47	130	0.1193	0.0006	5.136	0.099	0.3123	0.0019	1945	9	1842	36	1752	11
2-1-24	82	205	0.1163	0.0005	4.817	0.093	0.3005	0.002	1899	8	1788	34	1694	11
2-1-25	26	63	0.1259	0.0007	5.57	0.108	0.321	0.0019	2041	9	1911	37	1795	11
2-1-26	57	131	0.1213	0.0006	5.768	0.112	0.3449	0.0021	1976	9	1942	38	1910	12
2-1-27	59	161	0.1153	0.0007	4.857	0.096	0.3055	0.0019	1884	11	1795	36	1719	10
2-1-28	25	60	0.1172	0.0007	5.034	0.098	0.3116	0.002	1913	10	1825	36	1749	11
2-1-29	42	114	0.1163	0.001	4.991	0.105	0.3112	0.002	1900	16	1818	38	1747	11
2-1-30	18	46	0.1176	0.0005	5.09	0.098	0.3138	0.002	1921	8	1834	35	1759	11
2-1-31	106	303	0.1207	0.0006	5.537	0.106	0.3328	0.002	1966	8	1906	37	1852	11
2-1-32	65	185	0.1147	0.0005	4.907	0.094	0.3102	0.0019	1875	8	1803	35	1742	10
2-1-33	287	906	0.1185	0.0006	5.252	0.101	0.3214	0.002	1934	9	1861	36	1797	11
2-1-34	44	102	0.122	0.0008	5.675	0.114	0.3374	0.0021	1985	12	1928	39	1874	12
2-1-35	22	45	0.1212	0.0006	5.8	0.113	0.347	0.0022	1974	10	1946	38	1920	12
2-1-36	35	121	0.1121	0.0007	3.629	0.073	0.2348	0.0016	1833	12	1556	31	1360	9
2-1-37	26	165	0.111	0.0005	2.087	0.04	0.1364	0.0009	1815	8	1144	22	824	5
2-1-38	56	152	0.1201	0.0006	5.593	0.108	0.3378	0.0022	1958	9	1915	37	1876	12
2-1-39	30	72	0.1203	0.0006	5.851	0.113	0.3526	0.0023	1961	8	1954	38	1947	13
2-1-40	65	147	0.1209	0.0007	5.846	0.115	0.3507	0.0022	1970	11	1953	38	1938	12
2-1-41	139	398	0.1189	0.0008	5.803	0.116	0.3539	0.0024	1940	12	1947	39	1953	13
2-1-42	49	126	0.1137	0.0006	4.588	0.089	0.2927	0.0022	1860	9	1747	34	1655	12
2-1-43	80	268	0.1135	0.0007	4.494	0.089	0.2872	0.0018	1856	12	1730	34	1627	10
2-1-44	24	64	0.1169	0.0007	5.042	0.101	0.3129	0.002	1909	11	1826	37	1755	11
2-1-45	29	76	0.1174	0.0009	5.114	0.103	0.316	0.0022	1917	14	1838	37	1770	12
2-1-46	25	67	0.1161	0.0005	4.892	0.094	0.3056	0.0022	1897	8	1801	35	1719	12
2-1-47	78	176	0.1196	0.0005	5.837	0.113	0.3539	0.0022	1951	8	1952	38	1953	12
2-1-48	73	197	0.12	0.0006	5.796	0.112	0.3503	0.0023	1956	8	1946	37	1936	13
2-1-49	68	178	0.1194	0.0006	5.444	0.106	0.3307	0.0021	1947	10	1892	37	1842	12
2-1-50	32	70	0.1206	0.0006	5.864	0.27	0.3525	0.0023	1966	10	1956	90	1947	13
2-1-51	77	205	0.1136	0.0006	4.614	0.09	0.2945	0.0029	1858	10	1752	34	1664	16
TWZK17-2-2.2，变质砂砾岩,外部边缘 24 个测点														
2-2-01	118	343	0.117	0.0005	4.802	0.026	0.2978	0.0017	1910	7	1785	10	1680	10
2-2-02	177	508	0.121	0.0005	5.746	0.031	0.3443	0.0021	1971	7	1938	11	1908	11
2-2-03	107	321	0.1165	0.0005	4.907	0.026	0.3056	0.0017	1903	7	1803	9	1719	10
2-2-04	80	196	0.121	0.0005	5.752	0.03	0.3447	0.002	1971	8	1939	10	1909	11
2-2-05	207	610	0.1194	0.0005	5.692	0.03	0.3457	0.0021	1947	7	1930	10	1914	11
2-2-06	70	134	0.1199	0.0005	5.697	0.031	0.3445	0.002	1955	8	1931	10	1908	11
2-2-07	158	428	0.1159	0.0005	4.754	0.025	0.2975	0.0017	1894	7	1777	9	1679	10
2-2-08	154	491	0.1155	0.0005	4.614	0.025	0.2897	0.0018	1888	8	1752	9	1640	10
2-2-09	193	525	0.1157	0.0005	4.914	0.027	0.3082	0.0019	1890	7	1805	10	1732	11
2-2-10	83	210	0.1155	0.0005	4.821	0.025	0.3027	0.0018	1888	7	1789	9	1705	10
2-2-11	124	385	0.1138	0.0005	4.352	0.023	0.2774	0.0016	1861	7	1703	9	1578	9
2-2-12	158	458	0.1208	0.0005	5.736	0.03	0.3443	0.002	1969	7	1937	10	1907	11
2-2-13	35	91	0.1166	0.0007	4.947	0.033	0.3078	0.0018	1904	11	1810	12	1730	10
2-2-14	42	113	0.1155	0.0005	4.646	0.033	0.2917	0.0023	1888	8	1758	12	1650	13
2-2-15	53	145	0.1211	0.0005	5.718	0.031	0.3425	0.002	1972	8	1934	11	1899	11
2-2-16	44	129	0.1214	0.0005	5.733	0.034	0.3425	0.0022	1977	7	1936	12	1899	12
2-2-17	108	360	0.1145	0.0005	4.474	0.026	0.2833	0.0019	1873	8	1726	10	1608	11
2-2-18	77	259	0.1136	0.0005	4.258	0.03	0.2719	0.0018	1857	8	1685	12	1550	10
2-2-19	211	566	0.1224	0.0006	5.771	0.044	0.3421	0.0023	1991	8	1942	15	1897	13
2-2-20	172	535	0.1174	0.0005	5.235	0.027	0.3235	0.0019	1916	7	1858	10	1807	11
2-2-21	227	656	0.1202	0.0005	5.686	0.029	0.343	0.002	1960	7	1929	10	1901	11
2-2-22	338	978	0.116	0.0005	4.912	0.028	0.307	0.002	1896	8	1804	10	1726	11
2-2-23	156	527	0.1152	0.0005	4.75	0.029	0.2991	0.002	1883	8	1776	11	1687	12
2-2-24	62	175	0.1211	0.0006	5.73	0.037	0.3431	0.0023	1973	8	1936	13	1901	13

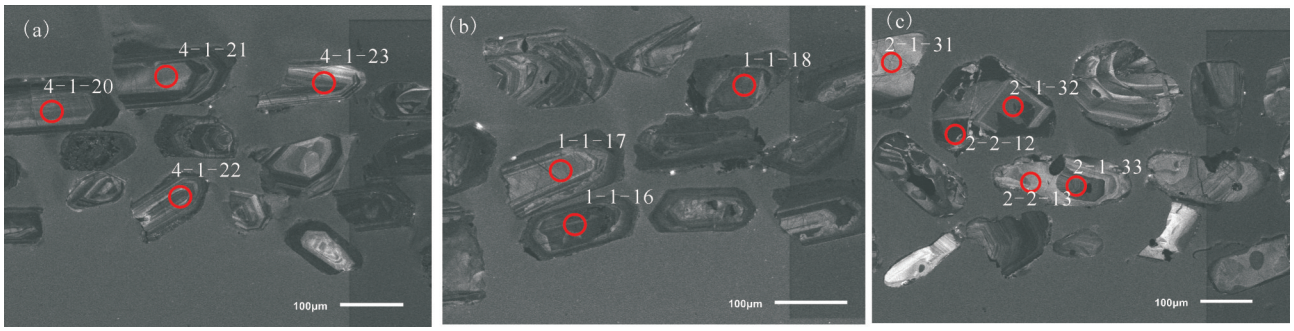

图3 锆石阴极发光照片(a-样品TWPd174;b-样品TWZK17-7-01;c-样品 TWZK17-7-02)
Fig.3 Zircon Cl image of three samples (a-TWPd174; b- TWZK17-7-01; c-TWZK17-7-02)

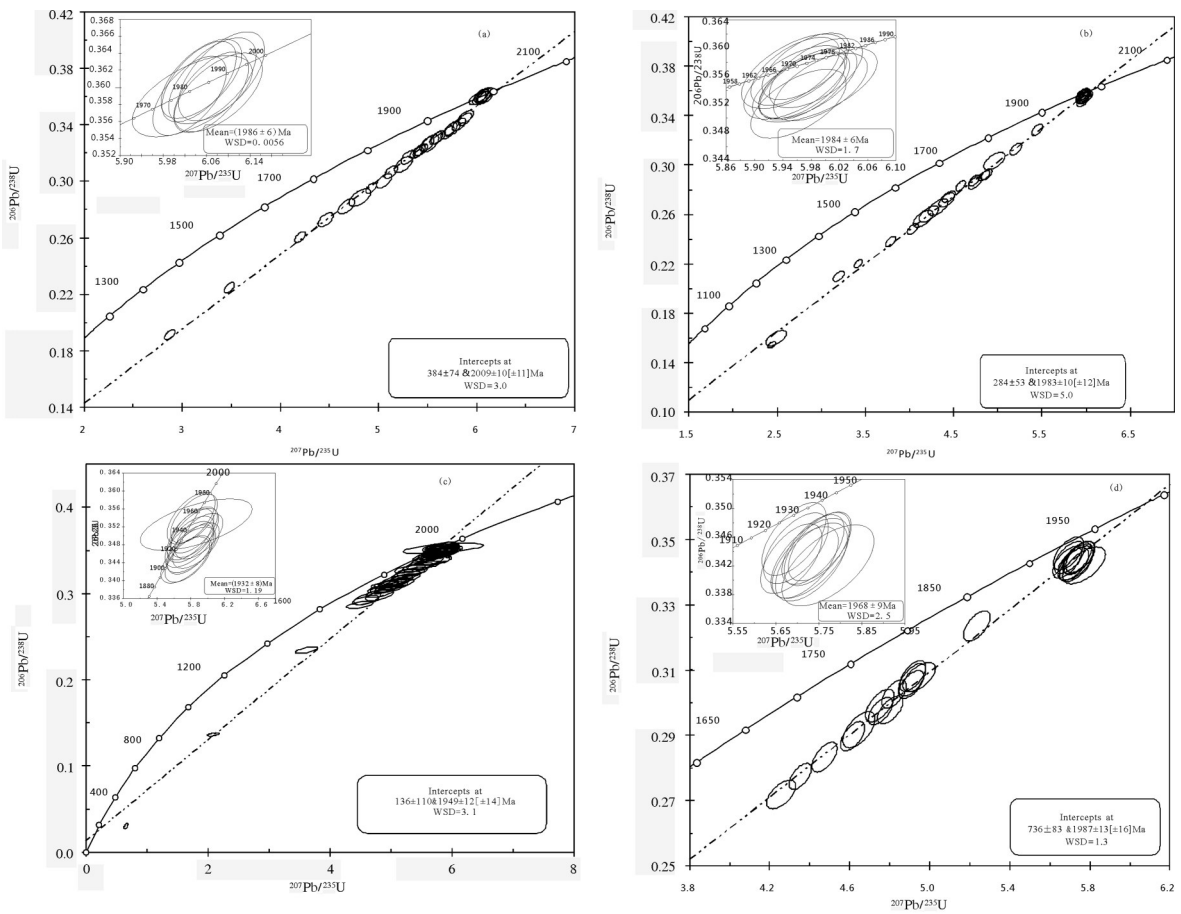

图4 谦比西铜矿花岗岩锆石U-Pb谐和图
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram of granites from the Chambishi copper mine

分馏程度(LREE/HREE=4.70~10.09,$(La/Yb)_N$=11.49~29.77);较低的负Eu异常(δEu=0.67~0.77),(图5c)。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛图上,样品富集大离子亲石元素(如Rb、K、Th和U),明显亏损高场强元素(如Nb、Ta、P和Ti)以及Ba、Sr等(图5d)。

6 讨 论

6.1 谦比西花岗岩形成时代

本文获得的2个花岗岩样品(TWPd174和TWZK17-7-01)锆石测年数据部分点表现为一定程度的Pb丢失(图4a,b),位于谐和线以外。而部分

表2 谦比西铜矿样品全岩地球化学数据

Table 2 Whole rock geochemical data of samples from the Chambishi copper mine

主量元素氧化物/%

样品号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	灼失	A/CNK	A/Nk	K_2O/NaO	AL_2O_3/TiO_2	10000×Ga/AL
TWPD174	72.76	0.28	14.40	1.29	1.03	0.08	1.09	1.22	3.26	4.50	0.07	0.01	1.16	1.41	1.38	50.71	2.05
TWZK17-7-01	71.50	0.27	14.13	1.88	0.71	0.05	1.58	0.59	2.76	6.46	0.07	0.01	1.21	1.23	2.34	51.56	2.11
TWZK17-7-02	67.67	0.87	11.00	9.70	0.76	0.07	0.96	2.17	6.34	0.41	0.04	0.02	0.74	1.01	0.07	12.61	2.16
YHD001	73.29	0.22	14.73	1.43	0.72	0.06	0.59	1.12	3.20	4.58	0.06	0.02	1.20	1.44	1.43	66.95	2.00
YHD002	73.41	0.21	14.11	1.59	0.98	0.05	0.64	1.12	3.25	4.57	0.07	0.01	1.14	1.37	1.41	67.19	1.99
YHD003	72.38	0.17	14.70	1.62	0.67	0.05	0.96	1.66	3.16	4.55	0.08	0.02	1.12	1.45	1.44	86.47	1.70

标准矿物计算/%

样品号	石英(Q)	正长石(Or)	钠长石(Ab)	钙长石(An)	刚玉(C)	硅灰石(Wo)	透辉石(Di)	紫苏辉石(Hy)	磁铁矿(Mt)	赤铁矿(Hm)	钛铁矿(Il)	磷灰石(Ap)	合计
TWPD174	32.28	26.6	27.63	5.56	2.12	0	0	3.25	1.87	0	0.54	0.17	100.02
TWZK17-7-01	27.3	38.15	23.36	2.47	1.69	0	0	3.94	1.67	0.73	0.52	0.16	99.99
TWZK17-7-02	25.44	2.42	53.65	0.34	0	1.48	5.18	0	0.13	9.61	1.66	0.1	100.01
YHD001	34.04	27.07	27.08	5.16	2.62	0	0	1.47	1.88	0.13	0.42	0.14	100
YHD002	33.75	27.01	27.5	5.1	1.95	0	0	1.83	2.31	0	0.4	0.16	100
YHD003	31.82	26.89	26.74	7.71	1.75	0	0	2.39	1.83	0.36	0.32	0.19	100

稀土元素/10^{-6}

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	∑REE	LREE	HREE	LREE/HREE
TWPD174	34.60	79.00	8.42	29.40	5.29	1.12	4.78	0.68	3.72	0.70	2.10	0.32	2.16	0.32	18.80	191.41	157.83	33.58	4.70
TWZK17-7-01	33.20	80.10	7.70	25.00	4.18	1.00	3.55	0.38	1.68	0.27	0.80	0.12	0.80	0.14	7.24	166.16	151.18	14.98	10.09
TWZK17-7-02	42.00	82.80	9.48	32.00	5.21	0.78	4.50	0.60	3.24	0.65	1.98	0.33	2.43	0.42	16.60	203.02	172.27	30.75	5.60
YHD001	32.38	80.25	7.92	27.80	4.40	1.05	3.70	0.42	3.79	0.50	1.12	0.27	2.17	0.28	12.60	178.65	153.80	24.85	6.19
YHD002	32.80	83.90	7.87	29.80	4.30	1.12	4.24	0.52	3.60	0.59	2.08	0.30	1.98	0.35	16.87	190.32	159.79	30.53	5.23
YHD003	33.96	82.80	8.24	27.90	4.80	1.05	4.94	0.49	3.21	0.72	2.12	0.28	1.77	0.19	13.84	186.31	158.75	27.52	5.77

微量元素/10^{-6}

样品号	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Rb	Sr	Ba	Sc	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	U	Th
TWPD174	25.40	6.05	19.10	10.30	6.22	160.00	157.00	775.00	9.04	10.61	1.50	91.00	3.60	15.60	4.20	14.40
TWZK17-7-01	16.36	4.52	12.40	6.12	6.64	153.00	61.20	1300.00	6.72	8.21	0.78	112.00	3.84	15.80	2.44	19.80
TWZK17-7-02	12.60	5.12	13.90	86.40	5.92	18.20	52.60	25.60	11.80	29.80	3.66	805.00	22.10	12.60	7.02	54.20
YHD001	18.52	4.65	11.90	11.21	5.84	123.00	97.82	679.00	8.37	13.37	0.98	97.00	7.38	15.60	3.58	15.32
YHD002	13.25	5.23	19.83	9.98	6.06	187.00	87.35	825.00	7.72	7.98	1.23	105.00	7.23	14.90	4.12	18.97
YHD003	11.68	4.12	20.12	7.96	4.98	192.00	145.80	761.00	9.87	11.13	1.07	117.00	5.35	13.21	4.39	17.68

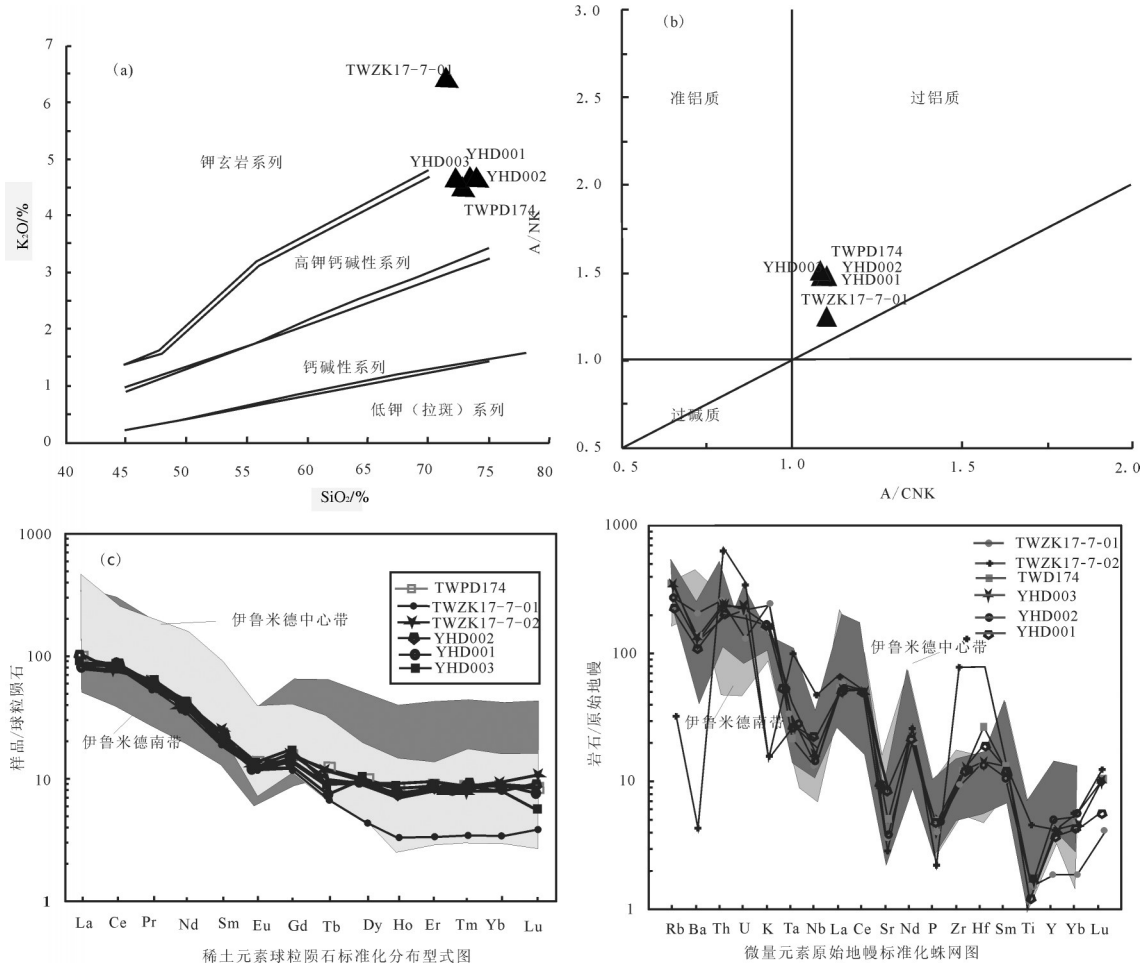

图5 谦比西铜矿花岗岩地球化学图解

a—SI−K图解(实线据 Peccerillo R, Taylor S R. 1976;虚线据 Middlemost E A K. 1985);b—A/CNK−A/NK图解(据Maniarand and piccoli,1989);c—稀土元素模式图;d—微量元素蜘蛛图(球粒陨石数值和原始地幔数值均据Sunand McDonough,1989)

Fig.5 Geochemical diagrams of granites from the Chambishi copper mine

a −Si−K diagram (after Peccerillo R, Taylor S R. 1976; Middlemost E A K. 1985); b −A/CNK−A/NK diagram (after Maniarand and Piccoli, 1989); c −REE patterns; d −Spider diagrams of trace elements (chondrite and primitive mantle data after Sunand McDonough, 1989)

锆石则获得了谐和年龄,谐和年龄代表锆石封闭性较好,具有更高的可信度。2个花岗岩样品锆石U−Pb年龄分别为(1986±6)Ma和(1984±6)Ma。对比谦比西另一钻孔NN75内花岗岩样品获得的年龄数据(1983±5)Ma(Rainaud et al.,2005),测试结果在误差范围内一致,这表明谦比西花岗岩形成于古元古代。另一样品TWZK17−7−02在区域上被认为是穆瓦系变质砂砾岩。其锆石多为碎屑锆石,且测年结果年龄域值集中分布,并未出现多个域值的现象。这说明穆瓦系变质砂砾岩的碎屑成分来源是同时代的。所测锆石边部年龄大于核部年龄,但是核部年龄的谐和性要优于边部年龄,因此其核部谐和年龄(1932±8)Ma可能更能代表所测锆石的准确年龄。此年龄代表穆瓦系砂砾岩形成时间的上限。De Waele et al.(2009)于东北部班韦卢地块穆瓦系凝灰岩夹层中获得了1880 ~ 1850 Ma的碎屑锆石年龄,并获得了侵入穆瓦系和基底花岗岩的黑云母花岗岩1650 ~ 1550 Ma的年龄数据(Greyling et al., 2005),此数据代表了穆瓦系地层年龄形成下限。

6.2 谦比西花岗岩岩石成因

谦比西花岗岩中未见角闪石矿物;其地球化学特征为较高的K_2O/Na_2O(1.38 ~ 2.34);A/CNK>1.1(1.12~1.20);刚玉分子指数>1%(1.59~2.04)明显不同于I型花岗岩,而类似于S型花岗岩。并且1000×Ga/Al比值<2.6; 较低的负Eu异常(δEu=0.67 ~ 0.77)而区别A型花岗岩(马鸿文,1992)。一般认为,I

型花岗岩由壳内变中基性火成岩部分熔融而来，而S型花岗岩则来源于中上地壳的变沉积岩（马鸿文，1992；陈建林,郭原生,付善明，2004；林强，1994）。据此可推断存在早于古元古代的变质沉积岩，而此变质沉积岩很可能是太古宙刚果克拉通陆壳的一部分，而且B. Dewale等也于班韦卢地块南部边缘伊鲁米德带基底花岗岩中获得了2730 Ma年龄信息(Rainaud et al.,2005)。因此谦比西花岗岩可能是太古宙刚果克拉通地壳经重熔作用形成。

6.3 地质意义

近几年一些学者陆续报导了卢菲利安弧构造基底的一些年龄数据。其中Rainaud et al.(2005)分别获得了莫库西（Mkushi）花岗片麻岩锆石U−Pb年龄(2049 ± 6)Ma；莫土嘎（Mtuga）细晶岩锆石U−Pb年龄2.07 ~ 2.00 Ga；穆隆古希（Mulungushi）眼球状片麻岩锆石U−Pb年龄(1976±5) Ma；穆富利拉（Mufulira）肉红色片麻岩锆石U−Pb年龄(1994 ± 7) Ma卢布富片岩（变质火山岩）锆石U−Pb年龄1874 ~ 1980 Ma。这些数据均集中于古元古代。有意义的是早期一些地质学家（Brewer, et al.,1979；Schandelmeier，1981；Kabengele et al.,1990）于北东部的班韦卢地块中也获得了相近的年龄数据(1869 ± 20) Ma ~(1695 ± 43) Ma（Rb−Sr全岩）。因此部分地质学家指出卢菲利安弧基底可能与班韦卢地块于古元古代（2100 ~ 1800 Ma）时期形成一稳定块体（Rainaud et al.,2005；Ngoyi et al.,1991）。而班韦卢地块南部边缘的伊鲁米德带基底花岗岩也获得了2050 ~ 1930 Ma的年龄信息（B. De Waele et al.,2005）。本文测试的2个花岗岩样品微量元素和稀土元素分配特征均与伊鲁米德带基底花岗岩近一致(图5c，图5d),说明伊鲁米德带基底也可能是此地块的一部分。A J pedreira和B De wale等更进一步指出刚果克拉通曾于1800~1750 Ma接受沉积，其范围包括巴西、安哥拉、纳米比亚、赞比亚等地区，主要以砾岩、砂岩或页岩夹火山岩为特征；主要包括3个群：chela超群（（1790 ± 19）Ma）、kagra超群（（1780±9）Ma）和穆瓦系（（1879±3）Ma）（Pedreira, et al.，2008）。所有以上证据均指向一个事实：刚果克拉通可能于古元古代时期已形成一稳定的块体。而此时间与班韦卢地块与坦桑尼亚太古宙克拉通碰撞拼合期间吻合，二者于2100~1850 Ma期间汇聚到一起（Shwal et al.,1994；Boven et al.,1999；Cosi et al.,1992；Daly 1982；De Waele et al.,2002 ；Key et al.,2000; Lenoir et al.,1994; Seth et al.,1998）。结合存在S型花岗岩的事实，笔者推断可能班韦卢地块与坦桑尼亚太古宙克拉通碰撞作用诱发了古元古代花岗岩基底的形成；太古宙刚果克拉通活化，并于古元古代期间形成一稳定块体。

7 结 论

（1）谦比西花岗岩为谦比西铜矿基底，与上部穆瓦系砂砾岩呈不整合接触。测年结果表明谦比西花岗岩产出时代为古元古代（1984 ~ 1986 Ma），而穆瓦系可能最早于古元古代（1932±8 Ma）开始沉积。

（2）谦比西花岗岩为一套高硅、高钾钙碱到钾玄岩系列的花岗岩；富含轻稀土元素和大离子亲石元素（如Rb、K、Th和U），明显亏损高场强元素（如Nb、Ta、P和Ti）以及Ba、Sr等。具有S型花岗岩的特征。

（3）班韦卢地块与坦桑尼亚太古宙克拉通碰撞作用诱发了古元古代谦比西花岗岩的形成。

References

Andersen L S, Unrug R. 1984. Geodynamic evolution of the Bangweulu Block, northern Zambia[J]. Precambrian Research, 25 (1/3): 187−212.

Annels A E, Vaughan D J, Craig J R. 1983.Conditions of ore mineral formation in certain Zambian Copperbelt deposits with special reference to the role of cobalt[J]. Mineralium Deposita, 18(1): 71−88.

Ashwal L D, Twist D. 1994.The Kunene complex, Angola/Namibia: a composite massif− type anorthosite complex[J]. Geological Magazine, 131(5): 579−591.

Boven A, Theunissen K, Sklyarov E, Klerkxb J, Melnikovc A, Mrumad A, Punzalana, L. Timing of exhumation of a high−pressure mafic granulite terrane of the Paleoproterozoic Ubende belt (West Tanzania)[J]. Precambrian Research, 93(1): 119−137.

Brewer M S. 1979.Rb−Sr age determinations in the Bangweulu Block, Luapula Province, Zambia[M]. HM Stationery Office,

Chen Jianlin, Guo Yuansheng, Fu Shanming. 2004. Research progress of ISMA granite granite classification review[J]. Journal of Gansu Geology, 13(1): (in Chinese with English abstract).

Cosi M, De Bonis A, Gosso G, Hunziker J, Martinotti G, Moratto S, Robert J P, Ruhlman F. 1992. Late Proterozoic thrust tectonics, high− pressure metamorphism and uranium mineralization in the Domes area, Lufilian Arc, northwestern Zambia[J]. Precambrian Research, 58(1/4): 215−240.

Daly R. 1982. The Muva Supergroup of northern Zambia: A craton to mobile belt sedimentary sequence[J]. South African Journal of Geology, 85(3): 155−165.

De Waele B, Fitzsimons I C W, Wingate M T D, Tembo F, Mapani B, Belousova E A. 2009. The geochronological framework of the Irumide Belt: A prolonged crustal history along the margin of the Bangweulu Craton[J]. American Journal of Science, 309(2): 132−187.

De Waele B, Johnson S P, Nkemba S, Tembo F. 2005. High− temperature, low− pressure tectono− thermal evolution of the Irumide Belt, central, Southern Africa: Lithosphere delamination during arc− accretion[J]. Frontier Research on Earth Evolution Report 2002−2004, V2: 9.

De Waele B, Mapani B. 1984. Geology and correlation of the central Irumide belt[J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35(3): 385−397.

Fleischer V D. 1984. Discovery, geology and genesis of copper—cobalt mineralisation at Chambishi Southeast prospect, Zambia[J]. Precambrian Research, 119−133.

Greyling L N, Robb L J, Master S, Boiron M C, Yao Y. 2005. The nature of early basinal fluids in the Zambian Copperbelt: A case study from the Chambishi deposit[J]. Journal of African Earth Sciences, 42(1): 159−172.

Kabengele M, Tshimanga K, Lubala R T, Kapenda D.1990. Geochronology of the calc− alkaline granitoids of the Marungu plateau (Eastern Zaïre− Central Africa) [J]. New data in African Earth Sciences. Ext. abstr. 15th Coll. Afr. Geol., CIFEG Occ. Publ, 22: 51−55.

Key R M, Armstrong R A. 2000. Geology and geochronology of pre− Katangan igneous and meta− igneous rocks north of the Lufilian Arc in northwest Zambia[J]. Journal of African Earth Sciences, 31 (1): 36−36.

Lenoir J L, Liégeois J P, Theunissen K, Klerkx J. 1994. The Palaeoproterozoic Ubendian shear belt in Tanzania: geochronology and structure[J]. Journal of African Earth Sciences, 19(3): 169−184.

Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009. Determination of zircon U−Pb isotopic age by laser ablation multi ion receiver plasma mass spectrometry (LA−MC−ICPMS). Mineral Science, 29(S_1): 600− 601(in Chinese with English abstract).

Lin Qiang. 1994. Research progress of Archean granites. foreign Precambrian Geology, 67(3): 68− 76(in Chinese with English abstract).

Ma Hongwen. 1992. Discriminant analysis of genetic types of granites. Chinese Journal of Petrology. 8(4): 341− 350(in Chinese with English abstract).

McGowan R R, Roberts S, Boyce A J. 2006. Origin of the Nchanga copper−cobalt deposits of the Zambian Copperbelt[J]. Mineralium Deposita, 40(6/7): 617.

Muchez P, Vanderhaeghen P, El Desouky H. 2008. Anhydrite pseudomorphs and the origin of stratiform Cu− Co ores in the Katangan Copperbelt (Democratic Republic of Congo) [J]. Mineralium Deposita, 43(5): 575.

NGOYI K, Liégeois J P, Demaiffe D. 1991. Age tardi− ubendien (Protérozoïque inférieur) des dômes granitiques de l'arc cuprifère zaïro− zambien[J]. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 313(1): 83−89.

Pedreira A J, De Waele B. 2008. Contemporaneous evolution of the Palaeoproterozoic−Mesoproterozoic sedimentary basins of the São Francisco− Congo Craton[J]. Geological Society, London, Special Publications, 294(1): 33−48.

Rainaud C, Master S, Armstrong R A, Robb L J. 2005. Geochronology and nature of the Palaeoproterozoic basement in the Central African Copperbelt (Zambia and the Democratic Republic of Congo), with regional implications[J]. Journal of African Earth Sciences, 42(1): 1−31.

Schandelmeier H. 1981. The Precambrian of NE Zambia in relation to the dated Kate, Mambwe and Luchewe intrusives[J]. Geologische Rundschau, 70(3): 956−971.

Seth B, Kröner A, Mezger K, Nemchine A A, Pidgeone R T, Okruscha M. 1998. Archaean to Neoproterozoic magmatic events in the Kaoko belt of NW Namibia and their geodynamic significance[J]. Precambrian Research, 92(4): 341−363.

Sweeney M A, Binda P L, Vaughan D J. 1991. Genesis of the ores of the Zambian Copperbelt[J]. Ore Geology Reviews, 6(1): 51−76.

Xiao Bo, Qin Kezhang, Zhang Donghong. 2014. The prospecting potential in Northwest Zambia Province copper and cobalt deposit geology[J]. Geology and Exploration. 50(1):182− 191 (in Chinese with English abstract).

Yan Ping, Liu Wencheng. 2006. The characteristics and origin of Chambishi copper deposit in Zambia[J]. China Mine Engineering, 35(1): 1−8 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈建林, 郭原生, 付善明. 2004. 花岗岩研究进展——ISMA 花岗岩类分类综述[J].甘肃地质学报, 13(1): 67−73.

李怀坤, 耿建贞, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009.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, 29(S1): 600−601.

林强. 太古代花岗岩研究进展[J]. 1994. 国外前寒武纪地质. 67(3): 68−76.

马鸿文. 1992. 花岗岩成因类型判别分析[J]. 岩石学报, 8(4): P 341−350.

肖波, 秦克章, 张东红. 2014. 赞比亚西北省铜−钴矿地质及找矿潜力[J]. 地质与勘探, 50(1): 182−191.

颜平, 刘文成. 2006. 赞比亚谦比西铜矿矿床特征及成因[J]. 中国矿山工程, 35(1): 1−8.