第 26 卷第 12 期 中国有色金属学报 2016 年 12 月
Volume 26 Number 12 The Chinese Journal of Nonferrous Metals December 2016
文章编号：1004-0609(2016)-12-2613-12

厄瓜多尔 Beroen 侵入岩体的年代学与地球化学及其地质意义

席 振[1,2]，李 斌[1,2]，高光明[1,2]，郭小冬[3]

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院，长沙 410083；
2. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室，长沙 410083；
3. 桂林理工大学 地球科学学院，桂林 541004)

摘 要：对位于厄瓜多尔中新世金属成矿带的 Beroen 金银矿床不同位置的英云闪长岩和花岗闪长岩进行锆石 U-Pb 定年及地球化学研究。结果表明：加权平均年龄分别为(15.92±0.4) Ma 和(34.73±0.7) Ma。结合两个岩体的地球化学特征对比，认为由于俯冲洋壳板片脱水后，交代软流圈地幔楔形成相似的母源岩浆在后期演化过程中差异化，渐新世的花岗闪长岩母源岩浆在区域伸展应力背景下上侵，倾向发育斜长石的结晶分异。而英云闪长岩是深层熔浆在上侵过程中受到挤压应力作用影响造成停滞形成的，熔体在中下地壳层进行以角闪石(±榍石)为主的结晶分异作用。构造背景的改变与 Beroen 绢云母蚀变形成时间都在中新世，成矿作用与中新世岩浆侵位有密切关系。

关键词：厄瓜多尔；Beroen 矿床；锆石 U-Pb 年龄；埃达克型；成岩；成矿
中图分类号：P588.121；P597.3 **文献标志码**：A

厄瓜多尔地壳是由白垩纪以来增生的大洋地体和原生大陆地体拼接而成。在厄瓜多尔南部发育大量热液贵金属和斑岩铜钼矿床。这些矿床成矿基本在中新世，与秘鲁北部、哥伦比亚南部的中新世金属矿床一起构成中安第斯西部的中新世金属成矿带[1−4]。成矿带区域发育大面积的新生代岩浆岩，年龄从晚始新世到早上新世都有。对于中新世矿化和围岩的相互关系，前人分析大量矿床和岩浆岩围岩、秘鲁北部灰岩形成时代、厄瓜多尔南部板块俯冲会聚模型重建以及围岩和矿石的地球化学分析等角度入手，认识到中新世成矿与洋脊和南美板块的碰撞、俯冲板块的变浅、应力背景的转变有密切联系[5−10]。

Beroen矿床是一个赋存在火山岩地层中的低硫型(绢云母−冰长石型)浅成低温热液矿床[11]。矿区内发育两期不同岩性的侵入岩体，本文作者以两个岩体年代学和地球化学特征为依托，深入探讨 Beroen 矿床成岩与成矿背景，为区域成矿规律研究提供参考。

1 地质背景

Beroen矿床位于厄瓜多尔南部外来白垩纪到始新世的 Macuchi 大洋地体和原地 Chaucha 陆壳地体的接触部位，靠近两者之间北北东方向 Calacali-Pallatanga-Pujili(CPP)断层带的南部延伸 Bulubulu 断层[12](见图 1(a))。区域上发育大面积的渐新世−中新世 Saraguro 群中酸性熔岩，凝灰岩层，有 Chaucha 岩基侵位。该岩基主要位于矿床西侧和南侧，超过数百平方公里大小。为多期多次侵入体，其中较晚期的闪长岩、花岗斑岩侵位到早期的花岗闪长岩到英云闪长岩组合中(见图 1)。矿体赋存于 Saraguro 群安山岩，安山质火山砾凝灰岩中。火山岩区北部发育闪长岩、花岗闪长岩，南西部发育英云闪长岩、花岗闪长岩等。矿区构造以北东为主，且有右旋作用特征，在矿区脉体和沟谷发育中有所体现。还有一组东西向构造存在，表现为岩层边界、节理、褶皱等，Saraguro 火山岩层在矿区北部向北倾，在矿区南部向南倾，形成一个宽广东西向的褶皱构造，其轴部位于 Alejandra Sur 区域(见图 2)。

矿体主要是 Alehandra 矿脉和 San Luis 矿脉。呈脉状、网脉状和厚板状发育，走向北东约 70°，倾向南东，倾角浅部较陡为 70°~80°，深部变缓为 60°~70°。矿体赋存于石英脉和热液角砾岩中，发育壳状、纹层

基金项目：国家自然科学基金资助项目(41227803, 41204054)；中南大学庄胜矿业研究院秘鲁−厄瓜多尔地质调查项目
收稿日期：2015-12-11；**修订日期**：2016-05-09
通信作者：李 斌，讲师，博士；电话：15802577906；E-mail: cutelb@126.com

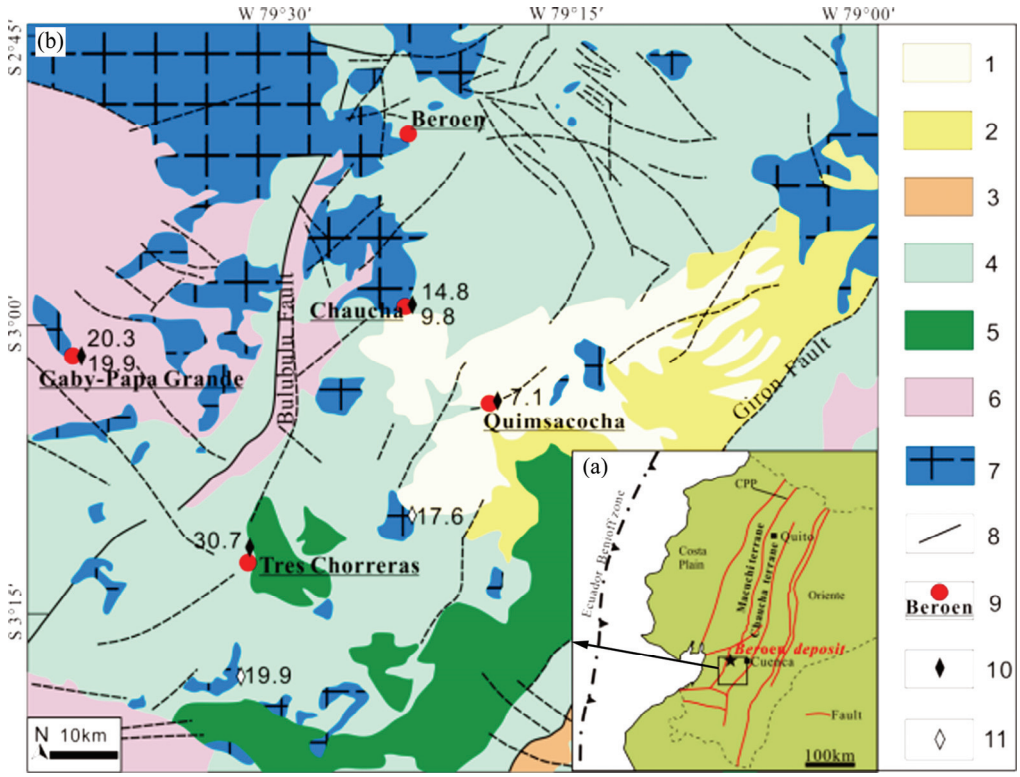

图 1 Chaucha 地区地质图及大地构造位置图[9−10, 13−14]

Fig. 1 Geological map and its geotectonic location of Chaucha area[9−10, 13−14] (Late Miocene to recent: 1—Volcanic; 2—Volcaniclastic; 3—Sedimentary; Oligocene to mie-Miocene: 4—Volcanic; 5—Volcaniclastic; 6—Mesozoic volcanic; 7—Tertiary intrusive; 8—Fault or inferred fault; 9—Mineral deposit; Intrusive age (in Ma): 10—U-Pb zircon; 11—K-Ar zircon fission track)

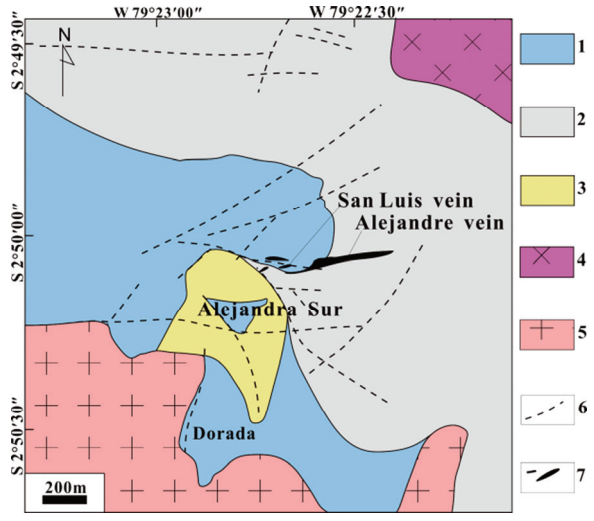

图 2 Beroen 矿区地质图

Fig. 2 Geological sketch map of Beroen deposit: 1—Lapilli tuff; 2—Andesite; 3—Colluvium; 4—Granodiorite; 5—Tonalite; 6—Fault; 7—Ore veins

状石英。在 Alejandra 脉的角砾岩中发育有超高品位金矿体。矿脉经历多个热液阶段，形成壳状、纹层状石英，并大多发育热液角砾岩化，可能重叠构造角砾岩。有叶片状角砾岩中的空洞局部内衬壳状石英和冰长石，形成鸡冠构造。壳层状石英中黑色条带金品位较高，包含可见的红银矿(淡红银矿−深红银矿)及银金矿。矿化与硅化、绢云母化蚀变关系最为密切，主要的矿石矿物包括自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、深红银矿等，脉石矿物主要有石英、伊利石、方解石、绿泥石、白云母、电气石和绿帘石等。金主要以银金矿和自然金形式存在，大部分为显微金，赋存在石英、黄铁矿等矿物附近，或被黄铁矿、磁黄铁矿等包裹。

2 样品岩相学特征

英云闪长岩：细粒结构。主要矿物为斜长石(60%)，辉石 5%，角闪石和黑云母，约 15%。斜长石呈半自形−自形板片状，大小为 0.1×0.2~1×4 mm。副矿物为石英和碱性长石。石英约 20%，作为独立结晶或蠕虫结构存在。碱性长石约 3%，与斜长石共生，也有独立的碱性长石存在。

花岗闪长岩：灰白色，中细粒结构，石英含量约 20%~30%，大小为 0.1×0.5~2×5 mm。斜长石较多，含少量钾长石，它们共占矿物体积的 50%~60%。角闪

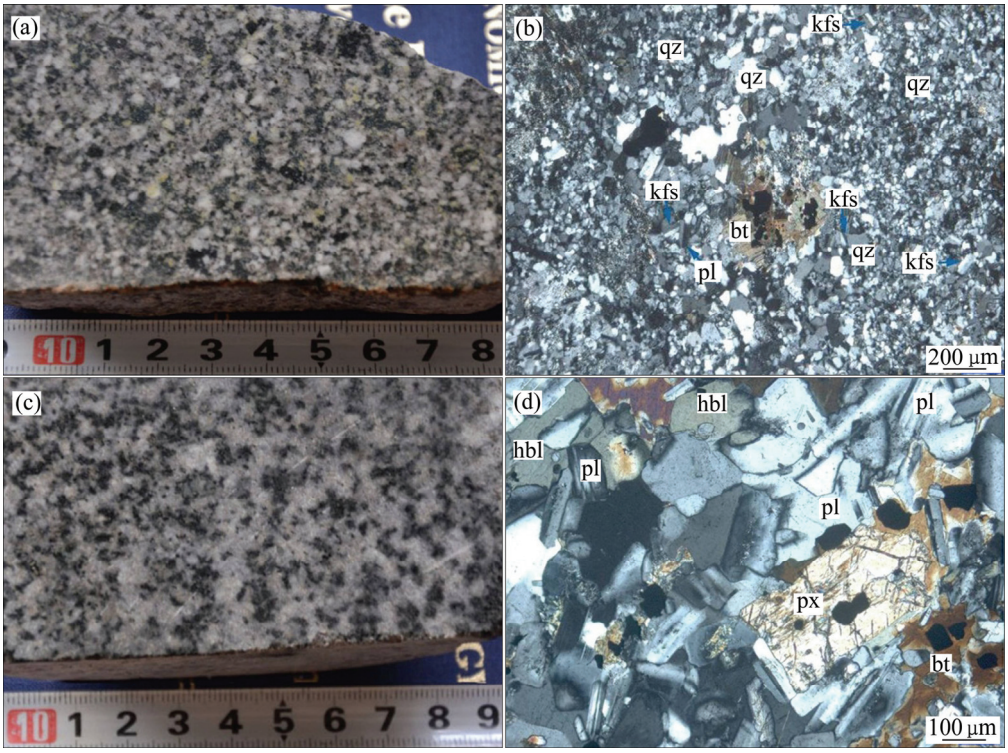

图 3　Beroen 岩体的野外和正交偏光镜下特征

Fig. 3　Field and orthogonal polarization microscopic photos of host rocks of Beroen deposit (pl—plagioclase; px—pyroxene; act—actinolite; hbl—amphibole; bt—biotite; kfs—potash feldspar; qz—quartz): (a), (b) Specimen of tonalite and its texture in microscope; (c), (d) Specimen of granodiorite and its texture in microscope

石占 15%左右，辉石和黑云母很少见，它们总含量约 5%。可见到绿泥石化，阳起石化。

3　分析方法

本次测试样品采自矿区地表，分别是英云闪长岩(RB11，RB12，RB13)和花岗闪长岩(RB21，RB22，RB23，RB24)。锆石阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司完成。使用 JEOLJXA8100 电子探针仪，加速电压 15 kV，束电流 2×10^{-8} A。LA-ICP-MS U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 GeoLas2005 完成。详细实验原理及测试方法见文献[15]。数据处理使用 ICPMSDataCal 程序，计算同位素比值、年龄和误差。普通铅校正采用 ANDERSEN[16]提出的方法。图解采用 ISOPLOT 程序[17]。全岩主量和微量元素在广州澳实分析检测有限公司及南京大学内生金属矿产成矿机制研究国家重点实验室完成。采用 X 射线荧光光谱仪 XRF−1500 进行主量元素测定，分析精度高于优于 1%。微量元素用 ICP−MS 测定(仪器型号为 Finnigan Element Ⅱ)，分析方法参考文献[18]。

4　分析结果

4.1　锆石 U-Pb 同位素测年

本实验中测试样品英云闪长岩和花岗闪长岩中的锆石无色透明，部分略浅黄色。结晶良好，多呈柱状，个别锥状或椭圆状。绝大部分具有岩浆振荡环带结构，可认为是岩浆成因锆石。锆石长度为 40~300 μm 之间，长宽比 1.2~5.5。受到热液流体活动影响，锆石可能出现一些溶蚀边。其中 RB11 中锆石 Th/U 值 0.27~0.79，RB21 中锆石 Th/U 值 0.52~0.86，均显示出岩浆成因锆石特征(见表 1)。对于样品 RB11，21 个测点结果在谐和图上组成密集一簇(见图 5(a))，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(15.92±0.4) Ma (MSWD=1.16)。样品 RB21 的 22 个测点结果在谐和图上同样组成密集一簇(见图 5(b))，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(34.73±0.7) Ma (MSWD=1.17)，加权平均年龄应该分别代表了两个岩体的侵位年龄(见图 4 和 5)。

4.2　主元素及微量元素

英云闪长岩和花岗闪长岩样品的全岩主量和微量元素分析结果见表 2 和 3。TAS 图解中，英云闪长岩

表 1 Beroen 岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analytical results of zircons from intrusions of Beroen

Sample No.	$w/10^{-6}$		Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$	
	Th	U		Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age/Ma	1σ	Age/Ma	1σ	Age/Ma	1σ
RB11-1	30	107	0.28	0.0974	0.0226	0.0222	0.0031	0.0025	0.0002	0.0008	0.0002	22.34	3.06	15.91	0.97	15.54	3.20
RB11-2	73	112	0.65	0.0812	0.0152	0.0288	0.0035	0.0024	0.0001	0.0009	0.0001	28.82	3.50	15.34	0.71	18.48	1.92
RB11-4	40	107	0.38	0.0854	0.0191	0.0364	0.0069	0.0026	0.0002	0.0024	0.0013	36.31	6.80	17.04	0.97	48.81	26.69
RB11-5	56	128	0.44	0.0787	0.0183	0.0257	0.0037	0.0026	0.0002	0.0008	0.0001	25.75	3.63	16.94	0.97	17.08	1.79
RB11-6	33	109	0.30	0.0464	0.0138	0.0145	0.0065	0.0022	0.0001	0.0010	0.0001	14.58	6.49	14.37	0.82	19.72	2.02
RB11-7	27	79	0.35	0.0929	0.0202	0.0314	0.0033	0.0026	0.0001	0.0013	0.0002	31.35	3.20	16.68	0.92	26.11	4.21
RB11-8	43	132	0.32	0.0841	0.0245	0.0195	0.0052	0.0024	0.0001	0.0011	0.0001	19.57	5.13	15.50	0.81	21.50	2.58
RB11-9	35	128	0.27	0.0714	0.0151	0.0213	0.0037	0.0025	0.0001	0.0012	0.0001	21.44	3.64	16.04	0.78	23.91	3.02
RB11-10	28	84	0.34	0.0883	0.0208	0.0263	0.0049	0.0023	0.0001	0.0012	0.0001	26.32	4.81	15.04	0.77	23.48	2.29
RB11-11	62	179	0.34	0.1178	0.0328	0.0304	0.0041	0.0027	0.0001	0.0008	0.0001	30.36	4.01	17.13	0.70	16.77	2.67
RB11-12	49	136	0.36	0.0641	0.0150	0.0184	0.0039	0.0026	0.0001	0.0009	0.0001	18.53	3.88	16.90	0.91	18.36	2.13
RB11-15	125	197	0.64	0.0472	0.0101	0.0156	0.0024	0.0026	0.0001	0.0007	0.0001	15.70	2.43	16.47	0.66	14.68	1.38
RB11-16	57	118	0.48	0.0522	0.0214	0.0151	0.0056	0.0027	0.0002	0.0009	0.0001	15.17	5.65	17.17	0.97	18.01	1.85
RB11-17	40	118	0.34	0.0920	0.0236	0.0289	0.0053	0.0025	0.0001	0.0013	0.0001	28.90	5.27	16.20	0.78	26.39	2.70
RB11-19	31	79	0.39	0.0762	0.0233	0.0238	0.0083	0.0023	0.0002	0.0009	0.0001	23.85	8.19	14.68	1.09	18.21	2.40
RB11-20	81	131	0.62	0.0469	0.0126	0.0130	0.0010	0.0026	0.0001	0.0007	0.0001	13.12	1.05	16.58	0.79	14.92	1.70
RB11-21	83	161	0.51	0.0715	0.0150	0.0206	0.0047	0.0024	0.0001	0.0006	0.0001	20.69	4.71	15.17	0.74	11.52	1.60
RB11-22	46	137	0.34	0.0588	0.0119	0.0163	0.0031	0.0023	0.0001	0.0010	0.0002	16.40	3.09	14.62	0.63	19.99	3.09
RB11-23	51	121	0.42	0.0737	0.0203	0.0176	0.0041	0.0025	0.0001	0.0015	0.0011	17.74	4.07	16.05	0.87	29.47	21.22
RB11-24	214	273	0.79	0.0619	0.0104	0.0185	0.0025	0.0025	0.0001	0.0008	0.0000	18.62	2.47	16.07	0.55	15.79	0.93
RB11-25	32	78	0.41	0.1127	0.0244	0.0356	0.0067	0.0024	0.0001	0.0012	0.0002	35.48	6.57	15.58	0.91	23.64	3.35
RB21-1	37	61	0.60	0.0639	0.0162	0.0452	0.0078	0.0059	0.0003	0.2908	0.0017	44.87	7.55	37.78	1.88	34.55	3.52
RB21-2	74	101	0.73	0.0744	0.0128	0.0455	0.0065	0.0053	0.0002	0.2732	0.0017	45.19	6.32	34.00	1.33	33.69	2.46
RB21-3	38	73	0.52	0.0773	0.0199	0.0450	0.0080	0.0054	0.0002	0.2525	0.0015	44.71	7.79	34.85	1.56	29.92	2.69
RB21-4	37	62	0.61	0.0846	0.0171	0.0577	0.0110	0.0055	0.0003	0.2627	0.0018	57.00	10.54	35.20	1.75	37.20	3.45
RB21-5	59	80	0.74	0.0601	0.0138	0.0361	0.0056	0.0059	0.0003	0.3231	0.0019	36.02	5.44	38.02	1.89	39.35	3.06
RB21-6	163	189	0.86	0.0590	0.0092	0.0377	0.0041	0.0051	0.0002	0.3618	0.0016	37.57	3.99	33.03	1.29	32.74	1.88
RB21-7	84	110	0.77	0.0542	0.0100	0.0376	0.0065	0.0055	0.0002	0.2211	0.0020	37.45	6.40	35.09	1.35	39.45	2.16
RB21-8	37	61	0.60	0.0849	0.0191	0.0484	0.0102	0.0058	0.0003	0.2454	0.0017	48.01	9.84	37.22	1.91	33.94	3.21
RB21-9	67	100	0.67	0.0553	0.0114	0.0403	0.0111	0.0058	0.0003	0.1561	0.0025	40.12	10.88	37.26	1.60	51.15	13.86
RB21-10	40	69	0.58	0.0715	0.0150	0.0465	0.0062	0.0056	0.0002	0.3341	0.0019	46.16	6.04	35.91	1.60	37.87	3.50
RB21-11	54	77	0.70	0.0652	0.0124	0.0452	0.0067	0.0055	0.0003	0.3326	0.0016	44.85	6.54	35.32	1.75	32.81	2.70
RB21-12	86	109	0.78	0.0483	0.0126	0.0299	0.0062	0.0053	0.0002	0.1832	0.0017	29.94	6.13	34.19	1.30	34.79	2.21
RB21-15	41	79	0.52	0.0708	0.0142	0.0434	0.0089	0.0052	0.0002	0.2006	0.0019	43.18	8.70	33.51	1.38	38.21	2.84
RB21-16	48	77	0.62	0.0753	0.0177	0.0358	0.0059	0.0051	0.0002	0.2779	0.0016	35.67	5.76	32.71	1.49	31.67	2.58
RB21-17	52	92	0.56	0.0636	0.0155	0.0366	0.0063	0.0053	0.0003	0.2868	0.0023	36.53	6.21	33.84	1.67	46.07	3.95
RB21-19	43	77	0.56	0.0634	0.0154	0.0433	0.0090	0.0058	0.0002	0.2069	0.0017	43.00	8.77	37.25	1.60	34.43	3.18
RB21-20	50	74	0.67	0.0658	0.0117	0.0396	0.0049	0.0052	0.0002	0.3340	0.0019	39.43	4.77	33.66	1.38	38.83	3.23
RB21-21	34	62	0.55	0.0519	0.0108	0.0385	0.0053	0.0051	0.0002	0.3528	0.0017	38.37	5.18	32.92	1.59	35.05	3.64
RB21-22	55	90	0.61	0.1014	0.0197	0.0584	0.0076	0.0051	0.0002	0.3565	0.0016	57.66	7.26	32.97	1.52	32.58	2.42
RB21-23	58	91	0.64	0.0771	0.0159	0.0496	0.0087	0.0052	0.0002	0.2602	0.0015	49.19	8.39	33.48	1.52	30.58	3.05
RB21-24	40	65	0.61	0.0341	0.0079	0.0288	0.0066	0.0058	0.0003	0.1981	0.0013	28.84	6.54	37.28	1.69	26.08	2.99
RB21-25	65	119	0.55	0.0690	0.0105	0.0445	0.0056	0.0054	0.0002	0.2687	0.0020	44.17	5.42	34.56	1.16	39.99	2.50

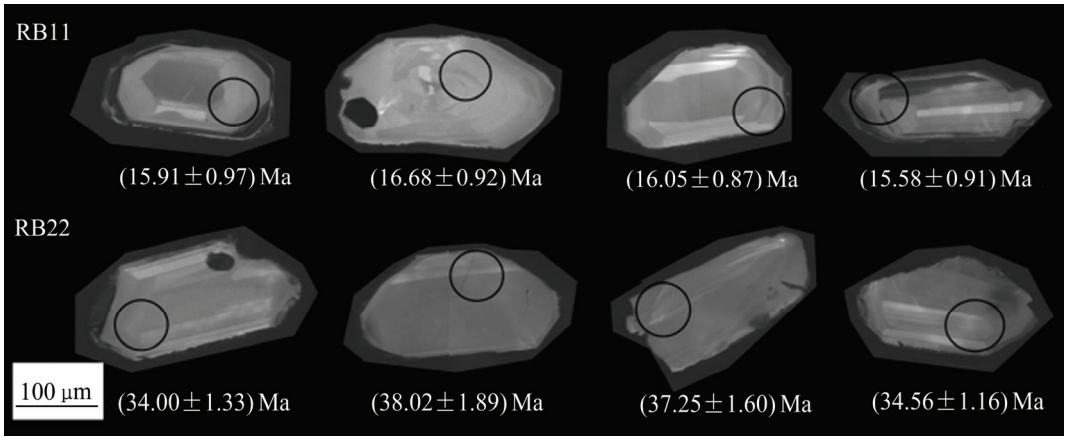

图 4　型锆石的阴极发光像

Fig. 4　Cathodoluminescence(CL) images of zircons of intrusions in Beroen deposit

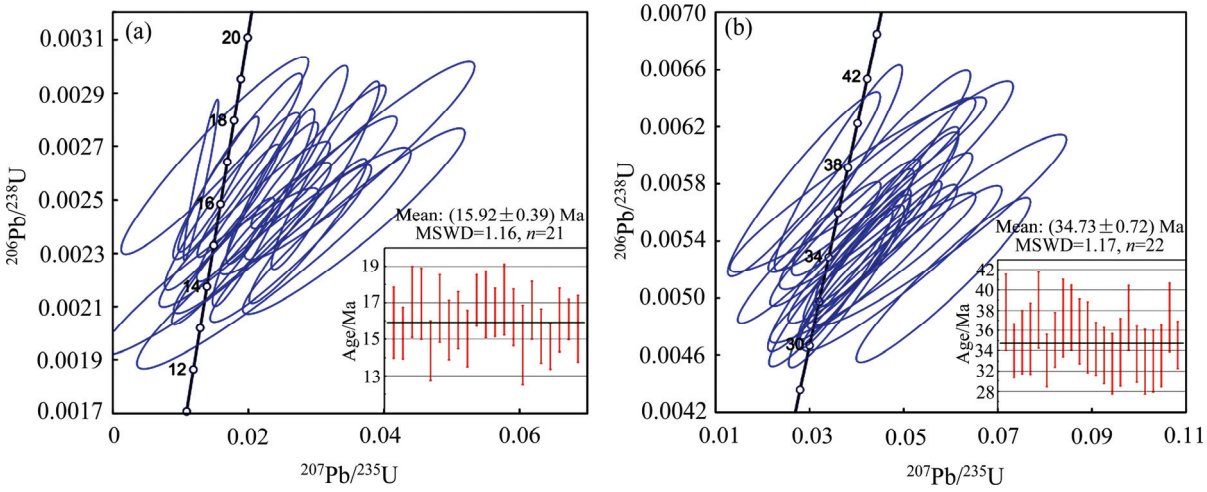

图 5　Beroen 岩体的锆石 U-Pb 年龄谐和及加权平均图

Fig. 5　Zircon U-Pb concordian and weighted mean ages of host intrusions of Beroen

表 2　Beroen 岩体英云闪长岩和花岗闪长岩体中主元素含量

Table 2　Major elements content of tonalite and granodiorite of intrusions in Beroen

Major element	Mass fraction in tonalite/%			Mass fraction in granodiorite/%			
	RB11	RB13	RB14	RB21	RB22	RB23	RB24
SiO_2	63.90	63.24	63.35	61.51	61.81	61.19	61.38
TiO_2	0.44	0.48	0.46	0.60	0.61	0.63	0.59
Al_2O_3	15.74	15.78	15.71	16.58	16.61	16.56	16.59
Fe_2O_3	4.86	5.47	5.31	5.84	5.86	6.01	5.77
MnO	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
MgO	1.94	2.19	2.08	3.04	3.02	3.17	3.07
CaO	4.74	4.83	4.92	5.61	5.64	5.63	5.60
Na_2O	3.07	3.08	3.08	3.39	3.40	3.32	3.37
K_2O	2.93	2.87	2.98	2.05	2.02	2.12	1.98
P_2O_5	0.08	0.09	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12
LOI	1.13	1.12	1.18	1.03	0.62	0.55	0.62
Total	98.91	99.23	99.25	99.87	99.81	99.40	99.19
A/CNK	0.94	0.93	0.91	0.92	0.92	0.92	0.93
A.R.	1.83	1.81	1.83	1.65	1.64	1.65	1.64

表 3 Beroen 岩体英云闪长岩和花岗闪长岩体中微量元素含量

Table 3 Trace elements content of tonalite and granodiorite of intrusions in Beroen

Trace element	Mass fraction in tonalite/10^{-6}			Mass fraction in granodiorite/10^{-6}			
	RB11	RB13	RB14	RB21	RB22	RB23	RB24
Sc	16.82	19.87	11.10	22.77	13.70	5.28	21.36
V	109.62	122.93	104.82	101.49	154.39	150.59	146.92
Cr	28.11	27.77	34.21	31.31	38.98	31.48	33.90
Co	9.10	9.31	12.67	17.81	23.46	25.92	20.80
Ni	9.28	9.09	17.46	15.36	30.28	24.44	22.85
Ga	17.56	17.63	18.89	19.51	21.58	18.50	20.97
Rb	104.06	110.24	49.73	147.93	40.41	52.93	126.14
Sr	626.15	588.95	785.04	567.39	530.00	356.32	640.39
Y	9.08	9.38	9.83	12.47	11.92	11.90	12.55
Zr	108.88	114.92	113.46	136.89	164.54	166.12	150.68
Nb	5.87	6.15	7.11	6.94	8.15	7.58	7.34
Sn	1.08	1.25	0.89	1.07	0.96	0.98	1.02
Cs	2.33	3.13	2.55	8.13	6.03	4.94	7.75
Ba	985.46	958.65	1073.00	844.95	774.04	597.96	876.11
La	21.39	14.21	32.08	26.54	25.57	11.91	30.18
Ce	61.26	52.70	53.99	31.64	43.00	33.04	34.42
Pr	4.57	3.62	6.71	6.07	6.44	3.58	6.84
Nd	17.50	15.42	23.21	22.93	23.41	14.67	24.41
Sm	3.46	3.48	3.89	4.60	4.58	3.15	4.81
Eu	0.98	0.94	1.07	1.01	1.01	0.74	1.08
Gd	2.93	2.88	3.16	3.87	3.79	2.43	4.03
Tb	0.50	0.55	0.46	0.71	0.65	0.47	0.71
Dy	2.79	3.16	2.05	4.21	3.52	2.74	3.94
Ho	0.57	0.65	0.38	0.83	0.69	0.56	0.78
Er	1.41	1.58	0.97	2.09	1.71	1.38	1.94
Tm	0.28	0.32	0.18	0.41	0.34	0.28	0.38
Yb	1.73	1.95	1.04	2.43	1.99	1.62	2.24
Lu	0.24	0.27	0.14	0.31	0.26	0.21	0.29
Hf	3.49	3.76	3.21	4.30	4.88	4.79	4.66
Ta	0.53	0.56	0.48	0.53	0.55	0.53	0.54
Pb	12.09	11.90	14.76	11.22	10.25	8.38	11.38
Th	6.89	7.85	3.35	10.48	6.40	2.10	9.10
U	2.17	2.44	1.16	3.35	2.57	2.09	2.82
Eu/Eu*	0.92	0.88	0.90	0.71	0.72	0.79	0.73
LREE	109.17	90.36	120.94	92.79	104.01	67.10	101.74
HREE	10.45	11.35	8.39	14.85	12.96	9.69	14.31
∑REE	119.62	101.71	129.32	107.64	116.96	76.79	116.06

位于闪长岩和花岗闪长岩之间，花岗闪长岩则在闪长岩范围内；碱度率(AR)在 1.64~1.83，SiO_2-K_2O 图解中，分别在高钾钙碱性和钙碱性范围内；A/CNK 值为 0.91~0.94，属于准铝质(见图 6)。稀土元素总含量两者都较低(76.79×10^{-6}~129.32×10^{-6})，LREE 轻度富集，HREE 较为平坦分布，具有弱负 Eu 异常，呈平滑右缓倾 REE 配分模式。富集大离子亲石元素和活泼不相容元素，亏损高场强(HFSE)元素，特别是 Nb、Ta 元素(见图 7)。

5　讨论

5.1　成岩年龄

分别位于 Beroen 南部和北部的英云闪长岩及花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为(15.92±0.4) Ma 和(34.73±0.7) Ma。英云闪长岩体侵位时间为中中新世，花岗闪长岩侵位在早渐新世。从图 1 和表 4 中可见，在 Chaucha 区域，侵入岩年龄首先是 Beroen 矿床的花岗闪长岩成岩年龄为 35.773 Ma，然后是 Gaby-Papa Grande 斑岩金矿的斑岩成岩年龄为 19.9~20.3 Ma，Tres Chorreras 热液金矿的长英质岩体成岩年龄为 17.6~19.9 Ma[22−23]，其后是 Beroen 的花岗闪长岩成岩年龄为 15.92 Ma，Chaucha 斑岩铜矿花岗闪长岩体的成岩年龄为 14.84 Ma 及花岗闪长斑岩的成岩年龄为 9.8 Ma。火山岩年龄分为 Beroen 的成岩年龄为 33.45~34.67 Ma，Tres Chorreras 的成岩年龄为 30.7 Ma，Quimsacocha 的成岩年龄为 7.1 Ma[8]。从晚始新世到晚中新世都有岩浆岩活动。在岩石形态方面，晚始新世到早渐新世的火山活动和侵入体岩基构成了区域地表露头基础。中中新世时期的花岗闪长岩、斑岩以小岩体、岩墙、岩脉等形式出露。晚中新世以闪长岩、花岗闪长斑岩及覆盖地表的长英质熔岩为主。与成岩有时空关系的矿床中，矿化形成时代以中中新世和晚中

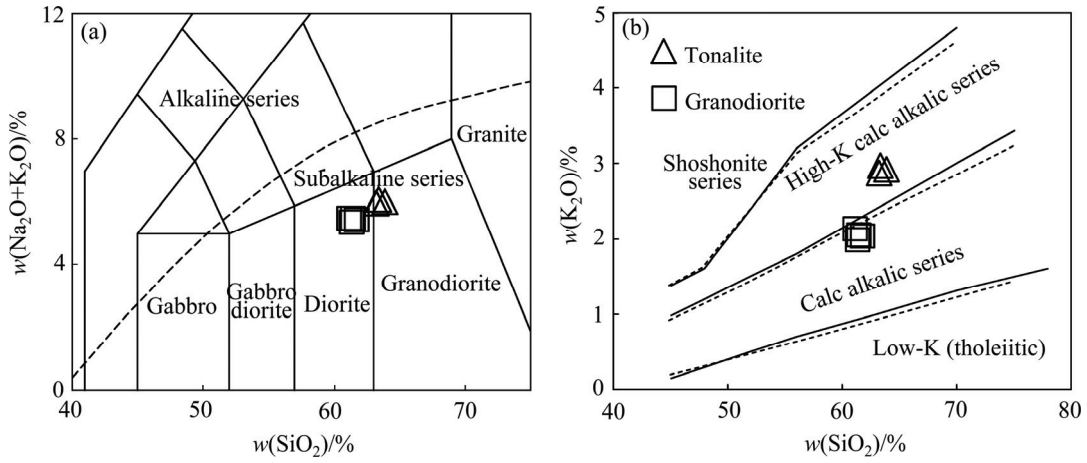

图 6　岩体地球化学分类图解

Fig. 6　Geochemical discrimination diagrams for host magmatic rocks from Beroen: (a) TAS diagram[19]; (b) K_2O-SiO_2 diagram[20]

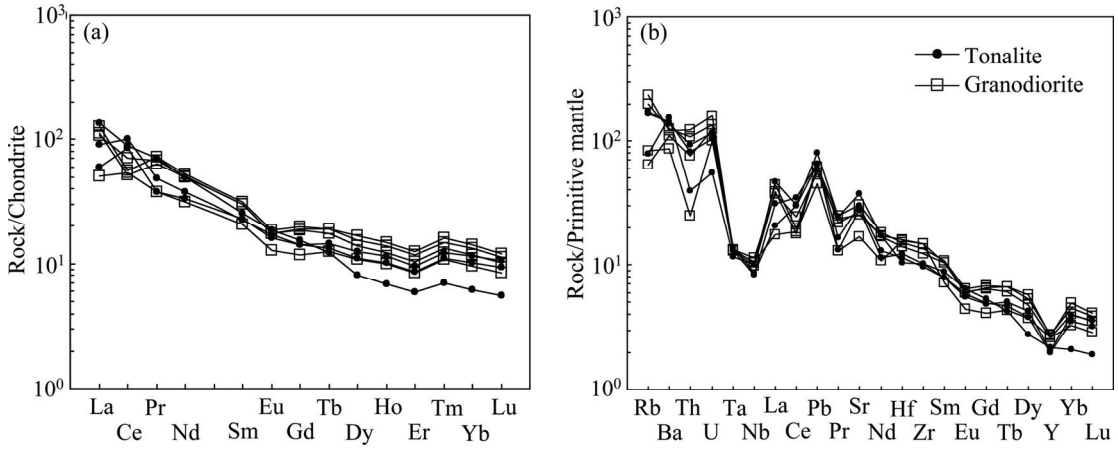

图 7　岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图[21]

Fig. 7　Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for Beroen intrusions[21]

表 4 Chaucha 区岩/矿石同位素年代学数据

Table 4 Geochronology data of oro and wall rocks in Chaucha area

Deposit	Sample	Lithology/Ore	Mineral	Method	Age/Ma	Reference
Beroen	RB41	Andesite	Zircon	ICP-MS	33.45±0.53	Unpublished data
	RB51	Tuff	Zircon	ICP-MS	34.67±0.36	Unpublished data
	TB003	Diorite	Zircon	TIMS	15.70±0.085	[11]
	TB072	Granodiorite	Zircon	TIMS	35.77±0.049	[11]
	TB143	Ore	Sericite	^{40}Ar-^{39}Ar	18.91±0.49	[11]
Chaucha	E07006	Ore	Molybdenite	Re-Os	9.92±0.04	[10]
	E06175	Ore	Molybdenite	Re-Os	9.54±0.05	[10]
	E07002	Ore	Biotite	^{40}Ar-^{39}Ar	10.6±0.3	[10]
	E07003	Granodiorite	Zircon	TIMS	14.84±0.43	[8]
	E07005	Granodioritic porphyry	Zircon	TIMS	9.79±0.29	[8]
Gaby-Papa Grande	E05075	Ore	Molybdenite	Re-Os	20.54±0.8	[10]
	E05083	Amphibolite porphyry	Zircon	TIMS	20.26±0.32	[8]
	E05090	Amphibolite porphyry	Zircon	TIMS	19.89±0.3	[8]
Tres Chorreras	E07010	Ore	Molybdenite	Re-Os	12.93±0.05	[10]
	E07012	Ore	Molybdenite	Re-Os	12.75±0.06	[10]
	E07011	Felsite	Zircon	ICP-MS	30.7±1.6	[8]
Quimsacocha	E05103	Ore	Alunite	^{40}Ar-^{39}Ar	9.5±0.5	[10]
	E06017	Dacite	Zircon	TIMS	7.13±1	[8]

新世为主，前者包括 Beroen 和 Gaby-Papa Grande。后者包括 Tres Chorreras、Chaucha 和 Quimsacocha。除了 Quimsacocha，其他矿床都以晚始新世到早渐新世的 Saraguro 群火山岩为主要赋矿围岩，但成矿年龄与各个矿区发育的侵入岩和次火山岩形成年龄相近。

SCHÖTTE 等[8]对中南厄瓜多尔的第三纪岩浆弧和斑岩矿床、热液矿床分别进行了大量的锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 和榍石 U-Pb 等定年。结果显示：厄瓜多尔西科迪勒拉中部和南部的第三纪岩浆弧是一次集中晚始新世到中新世时期的大规模的火山/岩浆活动，该时期内形成的岩浆岩组合及岩性特征具有相似性和可对比性。Beroen 南部的英云闪长岩可以类比紧挨的 Chaucha 斑岩铜矿中花岗闪长岩体，北部的花岗闪长岩应该与区域火山岩组属于同期岩浆活动产物[8−9]。

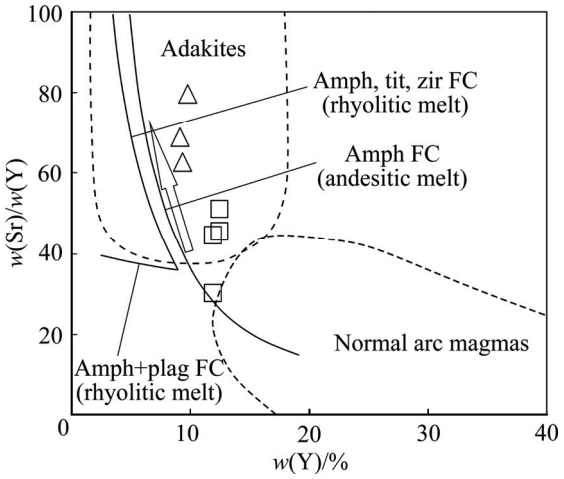

图 8 Beroen 岩体 Sr/Y−Y 图解[24−25]

Fig. 8 Sr/Y−Y diagram for Beroen intrusions[24−25] (△: Progressive mineral fractionation trend; amph—Amphibole; tit—Titanite; zir—Ziron; plag—Plagioclase; Symbols are same as those in Fig. 6(b)

5.2 形成环境及大地构造意义

英云闪长岩中 SiO_2 含量为 63.24%~63.90%，花岗闪长岩中 SiO_2 含量为 61.19%~61.81%，为钙碱性的中酸性岩浆系列。在岩体稀土球粒陨石标准化配分图中，形成 LREE 到 HREE 较缓倾斜变平坦，稍微右侧向上的趋势。同时，亏损高场强元素，Nb 和 Ta 负异常明显，富集 Th，w(Th)/w(Ta)＞4 时[26]，具有典型的俯冲消减带相关岩浆活动的特征。同时，Beroen 中酸性侵入体年龄从 35.77 到 15.70 Ma，附近 Chaucha 区域内的火山岩年龄从 34.67 到 7.1 Ma，侵入岩活动年龄从 20.3 到 9.8 Ma(见表 4)，这构成了渐新世到中新世火山弧活动的整个系列，属于厄瓜多尔南部西科迪勒拉渐新世−中新世火山活动爆发期的一部分。

厄瓜多尔西科迪勒拉的第三纪岩浆弧是 Farallon/Nazca 板块向南美板块俯冲活动的产物。其形成过程包括多个步骤，俯冲洋壳板片持续脱水作用形成流体，交代富集地幔楔部分熔融，地幔橄榄岩经历可能的均衡化，补充地幔楔软流圈减压熔融，地幔岩浆上升到中下层地壳热带，与深切岩石圈的深大断裂带耦合，最终形成上地壳火山弧活动[25, 27]。在简单二维模型中，到达地幔楔部分熔融区域，来源于板片脱水的流体总量以及可以提供挥发份地幔物质，也可能能够增加地幔楔温度的软流圈物质回流速率控制了地幔楔熔融物的形成。平坦化的俯冲洋壳板片及其更快的俯冲速率可以提供更多的脱水流体及对软流圈回流速度可能形成正反馈，因此，能够增加地幔楔部分熔融物质，促使形成大量的地表火山弧岩浆活动[27−29]。

在中始新世到早渐新世，南美海沟向西移动，Farallon 板块以南西−北东方向俯冲到南美大陆下部，其顶部形成 Macuchi 地体岛弧岩浆[30]。在 25 Ma 左右，Farallon-Pacific 扩张中心的 Farallon 板块开始分裂成 Nazca 和 Cocos 板块，Cocos-Nazca 海地扩张开始，使得 Nazca 板块以更加垂直海沟方向即东西方向俯冲到南美板块下，俯冲洋壳与水平面夹角变缓，俯冲板块倾斜度和俯冲角度的变化也伴随着俯冲速率的增大[14, 31−34]。这促使俯冲带下部的软流圈地幔熔融物质及地壳熔融物质的增加，这可能是中安第斯普遍的渐新世−中新世火山岩喷发及侵入体侵位形成的原因[35]。这也反映在 Beroen 内的火山岩和侵入体活动时间中。

对比中新世英云闪长岩和渐新世花岗闪长岩，在 Sr/Y-Y 图解中，新世英云闪长岩具有更加明显埃达克型岩浆的特征，Sr/Y 的比值高于 60，较低的 Y(≤9.83×10^{-6})和 Yb(≤1.95×10^{-6})元素含量，其 Eu 异常亏损较渐新世花岗闪长岩的程度小，重稀土元素与后者大体相同(见图 7 和 8)。英云闪长岩的埃达克型特征不太可能是由于俯冲板片熔融成分的参与导致的，其负 Nb 和弱 Zr 异常与幔源非埃达克型岩石具有相同的数量级，英云闪长岩与花岗闪长岩的微量和稀土元素相比，没有上升到量级的差距，Nb、Ta、Zr 等都在十倍差距之内。板片熔融参与形成的埃达克型岩浆一般非常富集 Nb 和 Zr(＞320×10^{-6})[36−37]。而且，Sr 含量大于下地壳平均值 348×10^{-6}。Y 强烈亏损，在判别埃达克型特征重要参数的 Sr/Y 值中起到决定作用。随着 SiO_2 含量的增高，Dy/Yb 有轻微降低趋势，Sm/Dy 轻微增高，这指示英云闪长岩体母源岩浆演化中发生以角闪石(±榍石)为主的分异作用[9, 12, 27, 38]，斜长石结晶分异极为有限。而花岗闪长岩体，根据其 Eu 弱异常分布，及与英云闪长岩大体相同的微量元素分布型式，推测花岗闪长岩演化的母源岩浆仍是以角闪石分异为主。但是其 Y 含量普遍较英云闪长岩中 Y 含量高，其含量小于 13×10^{-6}；而其中 Sr 含量比后者中的低，这说明花岗闪长岩体母源熔体更加趋向斜长石结晶分异作用，而角闪石分异强度相对减弱。斜长石在上部地壳层较为稳定，角闪石稳定区位于中下地壳层，0.4~0.8 GPa 压力下[25]。因此，英云闪长岩体的母源岩浆演化深度较花岗闪长岩更大，压力更高。

对于中新世英云闪长岩和渐新世花岗闪长岩的母源岩浆演化差异，可能是源于岩浆演化的构造动力背景变化造成的。自 25 Ma 时，Farallon 板块分裂形成的 Nazca 板块以更加垂直厄瓜多尔大陆边缘的角度向下俯冲，倾斜度、俯冲速率都发生了变化，应力环境相应有所改变，从渐新世岩浆形成的伸展为主变化到中新世以扭压和主压应力为主[5]。研究者们[10, 34]对厄瓜多尔南部盆地沉积物的变质过程进行统计分析，发现其记录了中新世 19 Ma 和 9~10 Ma 时期发生过扭压应力到主压应力的脉冲式应力活动。形成于软流圈地幔楔的渐新世母源岩浆熔体沿海沟断层、平行海沟的地体缝合带，连续被动侵位到中上地壳层，经历更多的斜长石的结晶分离。而中新世时期，西科迪勒拉地壳以挤压应力为主，平行海沟方向构造闭合，阻碍深成岩浆熔体的上侵，母源熔体在更低地壳层，更大的压力条件下形成岩浆房，发生角闪石(±榍石)，可能还有石榴石的结晶分离作用，出现了较为明显的埃达克型特征[8, 12]。

5.3　成岩与成矿关系

影响安第斯区域斑岩矿床及热液矿床的两个主要地球动力学因素是俯冲板片的变浅平坦化及海底高地的俯冲[8]。平坦俯冲时期的板片脱水可能引起上覆地壳的强烈水化作用，随后俯冲板片的再变陡及软流圈地幔向海沟方向的移动导致流变性变弱的地壳更易于变形和熔融，这对金属成矿作用是有利的[29, 39]。ROSENBAUM 等[40]的地球动力学重建也证实海底高地与南美板块的碰撞与中新世矿床存在明显的时空一致性。中段安第斯的中新世金属成矿带从秘鲁中部，向北经厄瓜多尔，延伸到哥伦比亚南部。主要矿床类型包括斑岩铜−钼−金，高硫型、中硫、低硫型热液金−银等矿床，如秘鲁超大型 Yanacocha 金矿、Beroen 铜矿，厄瓜多尔的 Junin 铜矿、Portovelo 金矿，哥伦比亚的 La Colosa 金矿等。成矿时间基本在中新世范围，围岩以贯穿整个第三纪的岩浆岩为主。成矿过程与第三纪火山弧围岩具有密切的时空关系。

在厄瓜多尔南部，中新世的矿化和蚀变发生在23.5~6.1 Ma 期间，这与 25 Ma 时期厄瓜多尔俯冲板片的变浅化和 8 Ma 以来 Carnegie 洋脊的俯冲在时间上相一致。围岩主要是长英质熔岩、凝灰岩及中酸性岩体，还包括角闪石、长石斑岩等次火山岩。除了 Quimsacocha 外，矿化在空间上主要赋存在渐新世火山岩或年代较大的岩基型岩体内，成矿时间常与矿区侵入岩系统中的较晚期侵入脉动活动相近。与 Beroen 相似，Tres Chorres、Portovelo 等热液矿床的直接赋矿围岩是渐新世火山岩，可能与火山岩地热系统发育及其异常高的氧逸度和挥发份有关。而矿区内的侵入岩系统由相差数百万年的不同时期形成的岩体组成。侵入体母源岩浆在地幔楔中形成，并且在下部地壳和上部地壳经历角闪石、斜长石分异，到浅部地壳时可能还会同化混染 Macuchi 大洋地体基底成分(未发表同位素数据结论)。对大面积存在的渐新世到早中新世发育的侵入岩倾向于在上部地壳演化，由于低压岩浆演化对能引起斑岩相关矿化的上升熔体的流体出溶动力和对压力变化敏感的 Cl 熔融−流体分配系数有不利影响，所以可能其对成矿有一定的负作用。而在侵入岩活动的后期，如 Beroen 矿区的英云闪长岩体，其岩浆在深部地壳结晶分异，岩浆熔体补给率下降，这可能代表形成斑岩矿床及热液矿化有利的挤压环境。

Beroen 矿床是低硫型(绢云母−冰长石)热液金银矿床。对矿体中的绢云母 Ar^{40}-Ar^{39} 法测年[11]，所得年龄为(18.91±0.49) Ma，指示成矿时绢云母蚀变发生的时间。围岩火山岩年龄在 33.45~34.67 Ma。与成矿年龄相近的闪长岩体年龄是 15.92 Ma。在 Beroen 矿床西南的 Gaby-Papa Grande 斑岩金矿有 19.9 Ma 和 20.3 Ma 的角闪斜长斑岩活动。Beroen 矿床成矿时间与脉动式应力环境变化的时间一致，早于英云闪长岩体的侵位，而稍晚于闪长岩的侵位，可能是同时期的角闪斜长斑岩期岩浆活动驱动成矿流体在地热系统发育的火山岩中成矿。

6 结论

1) Beroen 矿床英云闪长岩、花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别是(15.92±0.4) Ma，(34.73±0.7) Ma。英云闪长岩为中中新世，花岗闪长岩为渐新世时期形成。

2) Chaucha 区域大面积覆盖的岩浆岩形成时代从渐新世到中新世，形成在 Farallon 洋壳板块分裂成 Nazca 和 Cocos 板块引起俯冲到厄瓜多尔下的洋壳板片俯冲角度、速率等的改变的背景下，进而引起厄瓜多尔南部渐新世−中新世火山弧活动的大爆发。

3) Beroen 中新世英云闪长岩比渐新世花岗闪长岩更加亏损 Y 元素，富集 Sr 元素，这是由于花岗闪长岩形成在沿平行海沟和倾斜海沟方向发育的张性构造背景下，母源岩浆连续被动侵位到浅地壳，进行更多的斜长石分异结晶作用。而英云闪长岩在挤压应力背景下，平行海沟方向构造闭合，阻碍深成母源岩浆的上侵，在更低的地壳层，更大的压力条件下，母源熔体进行以角闪石(±榍石)为主的分异作用而演化形成。

4) Beroen 矿化形成在俯冲板片地球动力学变化引起伸展到扭压、挤压构造应力环境变化下，岩浆侵位驱动成矿流体在地热系统发育的火山岩中成矿。

致谢：

感谢在野外工作期间，中南大学彭恩生，庄胜黄金有限公司周运顺、付晓敏、任志坚、彭咏连，San Luis 公司 CALVOPIÑA Miguel、MORA Alonso 等同志的支持和协助！特别感谢编辑和审稿专家极细致的批阅，使本文更加完善！

REFERENCES

[1] SILLITOE R H. Epochs of intrusions-related copper mineralization in the Andes[J]. J South Am Earth Sci, 1988, 1(1): 89−108.

[2] PRODEMINCA. Evaluation of mining districts of Ecuador-Epithermal deposits in the Andes[M]. Quito, Ecuador: UCP Prodeminca Proyecto MEM BIRF 36-55 EC, 2000: 13−193.

[3] PRODEMINCA. Evaluation of mining districts of Ecuador-Porphyry and epi-mesothermal deposits with related intrusions in cordillera occidental and real[M]. Quito, Ecuador: UCP Prodeminca Proyecto MEM BIRF 36-55 EC, 2000: 1−291.

[4] SILLITOE R H, PERELLÓ J. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery[C]// JEFFREY W H, JOHN F H, RICHARD J G, JEREMY P R. Econ Geol 100th Anniversary Volume. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 845−890.

[5] NOBLE D C, MCKEE E H. The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru[M] Lima, Peru: Geological Society of Peru, 1997: 155−193.

[6] SPENCER R M, MONTENEGRO J L, GAIBOR A, PEREZ E P, MANTILLA G, VIERA F, SPENCER C E. The Portovelo-Zaruma mining camp, SW Ecuador: Porphyry and epithermal environments[J]. SEG Newsletter, 2002, 49: 8−14.

[7] FONTBOTÉ L, BENDEZUR. Cordilleran or Butte-type veins

and replacement bodies as a deposit class in porphyry systems[C]// WILLIAMS P J. Proceedings of the 10th Biannual Society of Geology Applied to Ore Deposits Meetings. Townsville, Australia: University of Geneva, 2009: 521−523.

[8] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BEATE B. Geodynamic controls on Tertiary arc magmatism in Ecuador: Constraints from U–Pb zircon geochronology of Oligocene–Miocene intrusions and regional age distribution trends[J]. Tectonophysics, 2010, 489: 159−176.

[9] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BEATE B. Petrogenetic evolution of arc magmatism associated with late Oligocene to late Miocene porphyry-related ore deposits in Ecuador[J]. Economic Geology, 2010, 105: 1243−1270.

[10] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BARRA F, VILLAGÓMEZ D, BEATE B. Metallogenic features of Miocene porphyry Cu and porphyry-related mineral deposits in Ecuador revealed by Re-Os, $^{40}Ar/^{39}Ar$ and U-Pb geochronology[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47: 383−410.

[11] BINELI B T. The low-sulfidation Au-Ag deposit of Rio Blanco(Beroen): Geology, mineralogy, geochronology (U-Pb and Ar-Ar) and isotope (S, Pb, Sr) geochenmistry[M]. Canton de Genève: M.Sc. thesis, University of Geneva, 2007: 6−86.

[12] CHIARADIA M, FONTBOTÉ L, BEATE B. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39: 204−222.

[13] LITHERLAND M, ASPDEN J A, JEMIELITA R A. The metamorphic belts of Ecuador[M]. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey, Overseas Memoir 11. BGS, 1994: 1−147.

[14] GUTSCHER M A, MALAVIEILLE J, LALLEMAND S, COLLOT J Y. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 168: 255−270.

[15] 田　健, 廖群安, 樊光明, 聂小妹, 王富明. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1471−1484.
TIAN Jian, LIAO Qun-an, FAN Guang-ming, NIE Xiao-mei, WANG Fu-ming. The discovery and tectonic implication of Earth Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junngar[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(5): 1471−1484.

[16] ANDERSEN T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1): 59−79.

[17] LUDWIG K. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003: 4−70.

[18] 李　斌, 赵葵东, 张　倩, 徐耀明, 朱志勇. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因[J]. 岩石学报, 2015, 31(3): 811−828.
LI Bin, ZHAO Kui-dong, ZHANG Qian, XU Yao-ming, ZHU Zhi-yong. Petrogenesis and geochemical characteristics of the Zijinshan granitic complex from Fujian Province, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(3): 811−828.

[19] LE BAS M J, LE MAITRE R W, STRECKEISEN A, ZANETTIN B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745−750.

[20] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247−263.

[21] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. SAUNDERS A D, NORRY M J. Magmatism in the Ocean Basins[M]. London: Geological Society, Special Publications, 1989, 42(1): 313−345.

[22] ASPDEN J A, HARRISON S H, RUNDLE C C. New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1992, 6: 77−96.

[23] PRATT W T, FIGUEROA J F, FLORES B G. Geological map of the Western Cordillera of Ecuador between 3°−4°, 1/200000[M]. Quito: CODIGEM-BGS, 1997: 1. (In Spanish)

[24] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662−665.

[25] SCHÜTTE P. Geochronology, geochemistry, and isotopic composition (Sr, Nd, Pb) of Tertiary porphyry systems in Ecuador[D]. Canton de Genève, Swiss: M.Sc. thesis, University of Geneva, 2009: 119−178.

[26] 曾仁宇, 赖健清, 毛先成, 艾启兴, 岳斌. 金川铜镍硫化物矿床两个主要矿体的目岩浆在岩浆演化过程中的关系[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 761−775.
ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng, AI Qi-xing, YUE Bin. Relationship between two kinds of parental magma of main orebodies during magma evolution in Jinchuan Cu-Ni(PGE) sulfide deposit, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 761−775.

[27] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 92−103.
ZHAO Zhen-hua. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 92−103.

[28] CAMPBELL I H, BALLARD J R, PALIN J M, ALLEN C, FAUNES A. U-Pb Zircon Geochronology of Granitic Rocks from the Chuquicamata-El Abra Porphyry Copper Belt of Northern Chile: Excimer Laser Ablation ICP-MS Analysis[J]. Economic Geology, 2006, 101: 1327−1344.

[29] 曹明坚, 秦克章, 李继亮. 平坦俯冲及其成矿效应的研究进展、实例分析与展望[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3727−3748.
CAO Ming-jian, QIN Ke-zhang, LI Ji-liang. Research progress on the flat subduction and its metallogenic effect, two cases analysis and some prospects[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3727−3748.

[30] van THOURNOUT F, HERTOGEN J, QUEVEDO L. Allochthonous terranes in northwestern Ecuador[J].

Tectonophysics, 1992, 205: 205−221.

[31] HEY R. Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center[J]. Bull Geol Soc America, 1977, 88: 1404−1420.

[32] DALY M C. Correlation between Nazca/Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador[J]. Tectonics, 1989, 8: 769−790.

[33] SPIKINGS R A, WINKLER W, SEWARD D, HANDLER R. Alongstrike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust[J]. Earth Planet Sci Lett, 2001, 186: 57−73.

[34] HUNGERBÜHLER D, STEINMANN M, WINKLER W, SEWARD D, EGÜEZ A, PETERSON D E, HGLG U, HAMMER C. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57: 75−124.

[35] MAMANI M, WORNER G, SEMPERE T. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): tracing crustal thickening and magma generation through time and space[J]. GSA Bulletin, 2010, 122: 162−182.

[36] SAMANIEGO P, MARTIN H, ROBIN C, MONZIER M. Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: insights into slab melts and mantle wedge interactions[J]. Geology, 2002, 30: 967−970.

[37] RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, APPLEGATE G S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chem Geol, 1999, 160: 335−356.

[38] CHIARADIA M, FONTBOTÉ L, PALADINES A. Metal sources in mineral deposits and crustal rocks of Ecuador (1°N−4°S): A lead isotope synthesis[J]. Economic Geology, 2004, 99: 1085−1106.

[39] JAMES D E, SACKS I S. Cenozoic formation of the central Andes: A geophysical perspective[C]// SKINNER B J. Geology and Ore Deposits of the Central Andes. Boulder: Society of Economic Geologists, Special Publication, 1999, 7: 1−25.

[40] ROSENBAUM G, GILES D, SAXON M, BETTS P G, WEINBERG R F, DUBOZ C. Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 239: 18−32.

Geochronology, geochemical characteristics of intrusions in Beroen of Ecuador and their geology implications

XI Zhen[1, 2], LI Bin[1, 2], GAO Guang-ming[1, 2], GUO Xiao-dong[3]

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
3. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Beroen gold deposit is part of central Andean miocene metallogenic belt. Zircon U-Pb dating of intrusions of Beroen: tonalite, granodiorite, indicates that tonalite has emplaced in middle Miocene, granodiorite had emplaced in early Oligocene, with weighted average age of (15.92±0.4) Ma and (34.73±0.7) Ma, respectively. Combined with their geochemical characteristics, both intrusions melt derived similarly from slab dehydration fluids fluxing mantle wedge partial melting, then experienced different evolution process. The Oligocene granodiorites were emplaced in a crustal domain extension and emplaced through trench-parallel and trench-normal faults and sutures, through a continuous passive ascent process, with undergoing more plagioclase differentiation. The Miocene tonalite emplaced under compressive stress background with trench parallel structures was sealed. The magmas were thus impeded to rise, ponded and undergone mainly amphibole differentiation at lower crust. The sericite in orebody formed prior to emplacement of tonalite. Maybe Beroen mineralization was resulted from the geodynamic transition of extension condition to compression condition induced by subduction zone's geodynamic changing.

Key words: Ecuador; Beroen deposit; zircon U-Pb; adakite; petrogenesis; metallogeny

Foundation item: Projects(41227803, 41204054) supported by National Natural Science Foundation of China; Project supported by Geological Survey Projects of Institute of Zhuangsheng Mining, Central South University, China

Received date: 2015-12-11; **Accepted date:** 2016-05-09

Corresponding author: LI Bin; Tel: +86-15802577906; E-mail: cutelb@126.com

(编辑　李艳红)