

湖南锡田岩体的岩浆混合成因:岩相学、 岩石地球化学和 U-Pb 年龄证据

陈 迪 陈焰明 马爱军 刘 伟 刘耀荣 倪艳军

(湖南省地质调查院,湖南长沙 410116)

摘要:南岭中段的锡田岩体燕山期岩石以斑状黑云母二长花岗岩为主,岩体中广泛发育暗色微粒包体。暗色微粒包体为岩浆结构,大多数具有塑性外形,发育淬冷边、反向脉,存在多种不平衡结构和矿物组合,如钾长石环斑、石英眼斑、针状磷灰石等,显示岩浆混合特征。岩石地球化学方面,暗色微粒包体具有比寄主岩贫硅、贫碱,富 K、Fe、Mg、Ca、Ti 特征;暗色微粒包体及寄主岩富集轻稀土元素(LREE/HREE=2.6~8.8),具有中-强的铕负异常($\delta\text{Eu}=0.09\sim 0.74$)以及具有相似的稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图;在主要氧化物含量 Harker 图解中投点多呈直线变异趋势,反映了两者具有密切的亲缘关系,利用共母和不共母图解进行判别,暗色微粒包体与寄主岩具岩浆混合特征,在 MgO-TFeO 判别图解中也指示包体为岩浆混合成因。上述岩相学和元素地球化学特征表明暗色微粒包体是基性岩浆侵入到酸性岩浆中淬冷形成的,指示锡田岩体存在两种岩浆的混合作用。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,得到寄主岩形成年龄(150.04 ± 0.52)Ma,暗色包体形成年龄(145.09 ± 0.63)Ma,二者年龄在测试误差范围内一致,显示岩浆混合作用发生的时间大致为晚侏罗世。

关键词:锡田岩体;黑云母二长花岗岩;暗色微粒包体;锆石 U-Pb;LA-ICP-MS;岩浆混合;南岭
中图分类号:P597;P588.12¹ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0061-18

湖南锡田岩体大地构造位置上位于南岭中段、扬子板块与华夏板块间的钦-杭结合带中部(图 1-a)^[1],茶陵—郴州深大断裂东侧,为多期(印支期,获得年龄数据(228.5 ± 2.5)Ma^[2]、(230.4 ± 2.3)Ma^[3];燕山期,获得年龄数据(155.5 ± 1.7)Ma^[2]、(151 ± 24)Ma^[4])侵入的复式花岗岩岩体。处于该带上的花岗岩体还有骑田岭、香花岭、瑶岗仙等,他们都与钨、锡、铅、锌成矿有关,如柿竹园、荷花坪、黄沙坪、大坳等大型的钨锡铅锌多金属矿床^[3]。在空间位置上,锡田岩体与万洋山岩体(高钾钙碱性 S 型花岗岩岩类^[5],锆石年龄 462 Ma)北东部分相距约 3 km、与邓阜仙岩体(S 型花岗岩岩类^[6],锆石 U-Pb 年龄 230 Ma^[7])南东部分相距约 8 km。国土资源大调查以

来,锡田岩体找矿成果突出,钨、锡资源量 32 万 t,潜在价值 300 亿元以上。因此,对锡田岩体岩石类型^[8,9]、岩体成岩年龄^[2,4]、成矿年龄^[1,4]、找矿潜力^[10-12]等方面的研究,一直吸引着广大地质勘探工作者和研究人员的密切关注。

该带花岗岩体中十分普遍地分布着暗色微粒包体^[14],如骑田岭岩体^[15]、姑婆山里松花岗岩体^[16]、雪花顶花岗岩体^[17]等。其中,锡田岩体也不例外,有关锡田岩体中发育岩石包体的报道已不少^[1,3-4,8,18-19],但是在以往的研究中,都未对锡田岩体中发育的暗色微粒包体展开深入的讨论,暗色微粒包体的岩石学、岩石地球化学、形成时代及成因方面的资料几乎没有,而暗色微粒包体涉及花岗岩成因、岩浆源

收稿日期:2013-05-02;改回日期:2013-11-05

基金项目:中国地质调查局区域地质调查项目(基[2011]02-14-04)资助。

作者简介:陈迪,男,1985年生,助理工程师,从事区域地质调查工作;E-mail:542309852@qq.com。

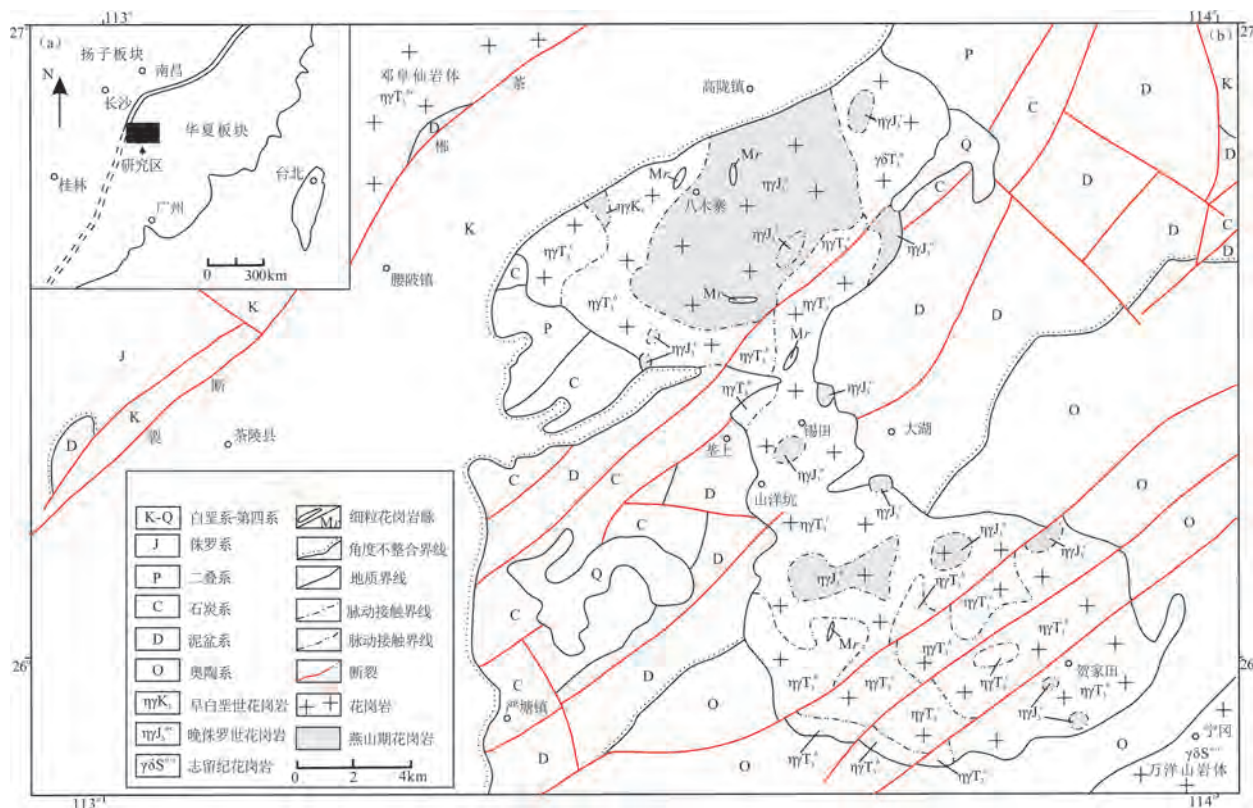


图1 湖南锡田地区地质简图(据文献[13]修改)

Fig.1 Geological sketch map of Xitian area, Hunan Province (modified after Reference [13])

区性质,岩浆演化过程、地球动力学环境、壳幔相互作用及与成矿关系等许多基本问题,对岩石包体的深入研究有着重要意义^[14,20-21]。

1 岩体地质及岩石学特征

锡田岩体燕山期岩石以中细粒斑状黑云母二长花岗岩为主体,呈岩基产出;以细粒斑状二云母二长花岗岩,细粒含斑黑云母花岗岩,细粒二云母二长花岗岩为次,呈岩株产出(图1-b)。中细粒斑状黑云母二长花岗岩为似斑状结构,基质呈中细粒花岗结构,块状构造。斑晶为钾长石、斜长石和部分石英,含量在10%~15%。基质由石英(30%~35%)、钾长石(30%~35%)、斜长石(25%~30%)、黑云母(5%~10%)及少量的锆石、磷灰石、磁铁矿等组成;斜长石(An₁₇₋₂₆)显示为富钠的特征。中细粒斑状黑云母二长花岗岩中广泛发育暗色微粒包体。这类包体有两个醒目的标志,一是粒状结构较寄主岩细,二是颜色较寄主岩深^[22]。在岩石露头上进行观察统计,包体大小不等,一般介于1 cm×2

cm~15 cm×18 cm,以8 cm×10 cm者居多(图2-a, 3-a, 4-a);包体形态多样,最常见的形态为椭球状、纺锤状(图2-a)、次圆状,少数为迷雾状(图2-b)、不规则状。

暗色微粒包体呈细粒结构,矿物的粒径在0.2~1 mm,由矿物斜长石(65%~70%)、黑云母(15%~25%)、石英(15%~20%)及少量的副矿物锆石、磷灰石等组成,为闪长质包体。包体中斜长石呈半自形板状,黑云母呈半自形片状,石英呈他粒状充填于斜长石、黑云母空隙间;磷灰石呈针状,长宽比在1:30左右。上述结构指示闪长质包体是岩浆成因的。

部分闪长质包体发育淬冷边(图3-a)和反向脉(图3-b)。淬冷边宽5~10 mm,颜色较包体深,呈微细粒结构。反向脉是指暗色细粒包体中,寄主花岗岩呈不规则脉状穿插其中^[22]。淬冷边和反向脉的发育,指示了岩浆突然冷凝形成淬冷边、淬冷边的收缩形成不规则裂隙,花岗岩质岩浆注入裂隙中,形成反向脉。在寄主花岗岩与暗色微粒包体均一化



图2 不同类型的暗色包体形态

a—椭球状、不规则状的暗色微粒包体及捕晶斜长石;b—暗色微粒包体与寄主岩呈弥散状接触

Fig.2 The shapes of different types of MMEs

a—Spherical and irregular enclaves; b—Plagioclase megacrysts hosted in enclaves, the line between enclave and monzonitic granite is blurred

程度较高的包体中(包体与寄主岩没有明显的界限,但包体岩性较寄主岩偏基性,暗色矿物较寄主岩多),可见到环斑钾长石(图3-c)和具有暗化镶边钾长石。环斑钾长石呈椭圆状,甚至圆状,边部生长着宽5~10 mm的斜长石环边;而暗化镶边钾长石斑晶边部出现微细粒黑云母、斜长石矿物集合体,在钾长石斑晶边部形成一条黑边。有的暗色微粒包体中还可可见石英斑晶被溶蚀成浑圆状,石英斑晶周围出现细粒的暗色矿物结合体,在包体中形成眼球状石英斑晶。

部分闪长质包体表现出塑性形变的特征,呈拉长状、椭圆状,在这类包体中可见长石斑晶定向排列(图4-a,4-b),显示了包体的流动特征。包体被

不同程度地拉长,但并没有固态变形,表明包体和寄主岩代表两种共存但成分截然不同的岩浆^[23]。长石斑晶有的位于包体与寄主岩石的边界上(长石部分挤入包体,部分留在寄主岩石中,图4-b),有的则完全被包体捕获,被溶蚀呈圆形球粒状留在包体之中(图4-c),这些特征表明代表暗色包体的基性岩浆与酸性岩浆是共存的。

2 样品的采集与测试分析

2.1 样品采集

为了系统研究锡田岩体中发育的暗色细粒闪长质包体,在进行大量的野外地质调查的基础上,选定了在不同地段出露较好、风化较弱的包体和寄

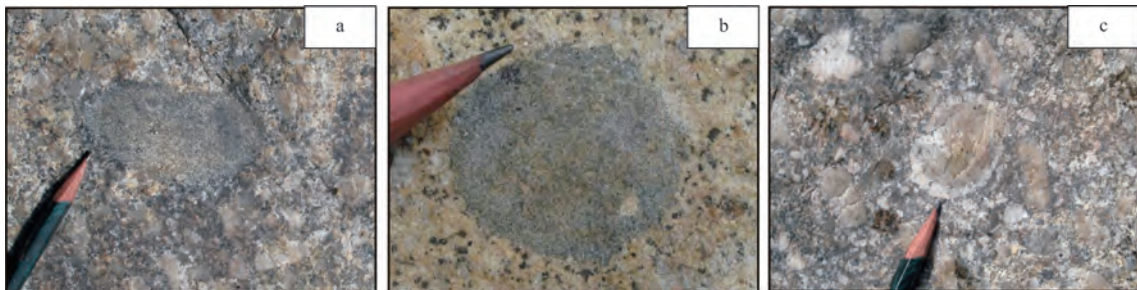


图3 暗色微粒包体的特征

a—发育淬冷边的暗色包体;b—发育反向脉的暗色包体(铅笔尖指示处);c—暗色包体中发育的钾长石环斑(铅笔尖指示处)

Fig. 3 Maps showing the characteristics of the dark microgranular enclaves

a—Enclaves with quench rim; b—Reverse veins of enclaves (indicated by the pencil point); c—Rounded K-feldspar's rapakivi texture in enclaves (indicated by the pencil point)



图4 暗色微粒包体的特征

a、b—斜长石斑晶横跨包体与寄主岩石界线及暗色包体、斑晶具有定向排列特征(线条指示方向为优选方位);
c—次圆状包体捕获的斜长石斑晶

Fig.4 Maps showing characteristics of the dark microgranular enclaves

a, b—Plagioclase megacrysts across the line between the enclave and its host rock, the enclaves and plagioclase megacrysts with directional structure (the line points to the preferred orientation); c—Rounded plagioclase megacrysts hosted in enclaves

主岩,采集了岩石薄片、地球化学样品及锆石U-Pb同位素测年样,图5-a、5-b分别为暗色微粒包体BT2-1、BT8露头情况。锆石U-Pb同位素测年样品两个,一个暗色微粒包体,一个为包体的寄主岩,露头均较好(图5-c、5-d),样品编号分别为BT6和H7,采样位置坐标为:113°48'32"E,26°47'18"N。

2.2 样品测试分析

岩石地球化学分析为将样品破碎至200目后挑选50g作为测试样,样品测试在国土资源部武汉矿产资源监督检查中心完成,其中主量元素采用四硼酸锂熔片-XRF分析法,在X荧光光谱仪上完成;微量元素采用四酸溶矿-ICP-MS分析法,在质谱仪Thermoelemental X7完成;稀土元素采用过氧化钠融熔-ICP-MS分析法,在Thermoelemental X7完成。

锆石U-Pb同位素定年在中国地质科学院矿产资源研究所Finnigan Neptune型多接收等离子质谱仪上进行,激光剥蚀系统为Newwave UP 123。测试采用静态信号采集模式Neptune MC-ICP-MS的虚拟放大器技术,分析器同时采集完一组数据后,软件自动依次更换其后的放大器电路,采集9组数据后,各放大器电路与原分析器恢复一致。运用该方法可有效地消除因各法拉第杯接收器的增益不同所造成的同位素比值误差,提高同位素比值测定的精度^[24]。

用来进行U-Pb同位素定年的锆石晶体粘贴在环氧树脂胶上,打磨光并抛光至颗粒内部暴露出来,然后镀上碳膜,在中国地质科学院矿产资源研究所扫描电镜室进行锆石的阴极发光观察和分析,通过阴极发光图像分析,确定锆石颗粒的内部



图5 部分暗色包体及寄主岩样品的露头特征

Fig.5 Photos showing the features of some outcrops of the dark microgranular enclaves and their host rocks

结构,选择吸收程度均匀的区域进行LA-ICP-MS测试。

U-Pb同位素分析中采用锆石标准91500作为外标进行同位素分馏校正,每分析5个样品点,分析2次91500。对于与分析时间有关的U-Th-Pb同位素比值飘移,利用91500的变化线性内插方式进行校正^[25],锆石标准91500的U-Th-Pb同位素比值推荐值据Wiedenbeck等^[26]。锆石U-Pb谐和图绘制和年龄加权平均值的计算均采用Isoplot/Ex_ver3 Ludwig^[27]完成。

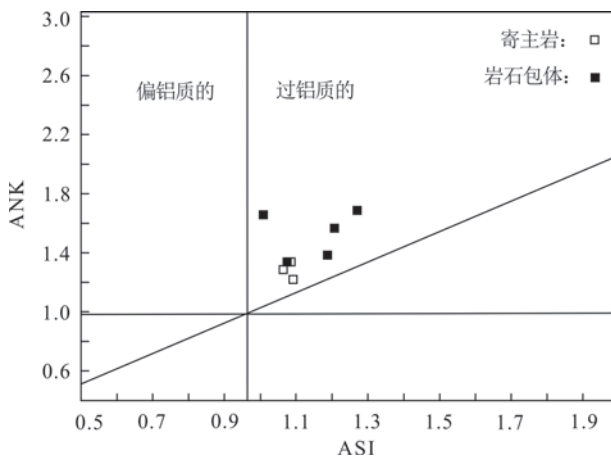


图6 花岗岩与包体ASI-ANK图解(图式据文献[28])
Fig.6 Discrimination diagrams of ASI-ANK for enclaves and their host rocks

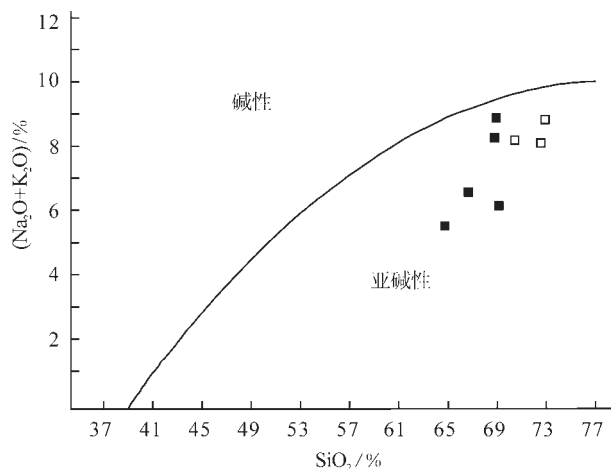


图7 花岗岩与包体SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解(图例同图6,图式据文献[29])
Fig.7 Discrimination diagrams of SiO₂-(Na₂O+K₂O) for enclaves and their host rocks (symbols as for Fig.6)

3 岩石地球化学特征

寄主花岗岩与暗色包体的主量元素分析(表1)表明:寄主花岗岩富硅,SiO₂的含量多在71%以上;富碱,K₂O+Na₂O值大于8%;富钾,K₂O>Na₂O,K₂O/Na₂O=1.6~1.9,而包体与寄主花岗岩相比相对贫硅,SiO₂的含量64%~69%;贫碱,K₂O+Na₂O值多小于6.4%,仅个别值达到8.9%及较富集K、Fe、Mg、Ca、Ti等。在主量元素ASI-ANK图解中(图6),包体及寄主花岗岩投点均在过铝质区域;在SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解中(图7),投点均落入亚碱性区域,指示包体及寄主花岗岩为过铝质、亚碱性系列岩石。

包体及寄主岩稀土元素分析结果(表1)表明,寄主花岗岩稀土含量较低($\sum REE=314 \times 10^{-6} \sim 439 \times 10^{-6}$,平均值为 364×10^{-6});包体稀土含量变化范围较大($\sum REE=296 \times 10^{-6} \sim 790 \times 10^{-6}$,平均值为 492×10^{-6});在稀土元素球粒陨石标准配分曲线图中,包体及其寄主岩均表现出轻稀土富集、重稀土亏损的右倾分布模式(图8),且(La/Yb)_N为8.4~29,表明无论是寄主花岗岩还是包体,都存在轻、重稀土的分异,而且分异程度还较大^[30]。由图8可见,Eu元素的分布模式呈“V”型,根据计算, δEu 值为0.09~0.74,包体及寄主岩均具有负铕异常,由于斜长石对Eu的分配系数远大于其他的REE,岩浆岩中Eu的负异常值与斜长石晶出有关,指示在岩浆源区或岩浆房内,岩浆的分离结晶过程中,有大量的斜长石晶出^[30],而包体

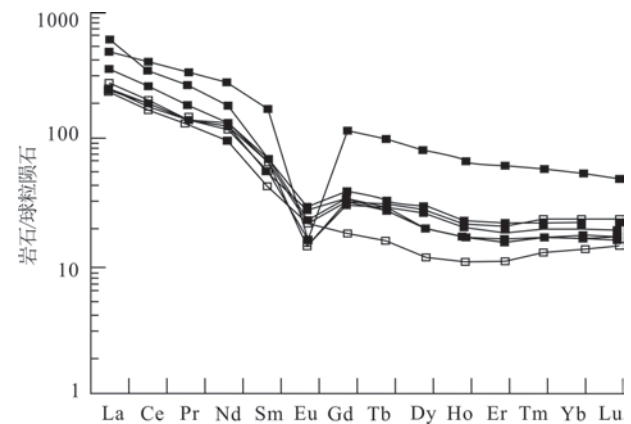


图8 锡田岩体及其包体稀土元素球粒陨石标准配分曲线(标准化数据引自文献[34],图例同图6)
Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of enclaves and their host granites in Xitian granites (symbols as for Fig.6)

表1 锡田岩体暗色微粒包体和寄主花岗岩样品主量元素、稀土元素和微量元素分析结果
 Table 1 Major elements, rare earth elements and trace elements content of the enclaves and their host granites in the Xitian granites

分析项目	寄主花岗岩			暗色微粒包体				
	H13	H4	H7	BT2-1	BT2-2	BT6	BT8	HYM12
主量元素/%								
Na ₂ O	2.87	3.02	3.08	2.77	2.94	3.38	3.55	2.01
MgO	0.16	0.61	0.40	1.03	0.74	0.97	0.47	1.99
Al ₂ O ₃	13.36	14.46	13.43	14.83	14.86	14.26	15.28	10.90
SiO ₂	73.58	70.67	72.67	67.05	69.05	69.06	68.94	64.17
P ₂ O ₅	0.05	0.15	0.15	0.42	0.15	0.24	0.23	0.68
K ₂ O	5.63	5.16	4.86	3.69	5.98	2.63	4.73	3.16
CaO	0.95	1.57	1.13	1.65	1.48	1.92	1.00	2.54
TiO ₂	0.20	0.34	0.32	0.87	0.49	0.70	0.38	1.72
MnO	0.04	0.09	0.06	0.11	0.13	0.10	0.08	0.21
Fe ₂ O ₃	0.78	1.13	0.84	1.93	1.31	1.35	1.59	3.03
FeO	1.75	1.43	2.12	3.62	1.92	3.83	2.23	8.05
H ₂ O ⁺	0.43	1.12	0.74	1.84	0.72	1.39	1.29	1.36
CO ₂	0.06	0.08	0.04	0.02	0.04	0.04	0.08	0.04
烧失量	0.32	1.41	0.55	1.49	0.59	1.09	1.18	0.67
TFeO	2.45	2.45	2.88	5.36	3.10	5.05	3.66	10.78
ASI值	1.06	1.08	1.08	1.28	1.06	1.20	1.19	0.96
ANK值	1.23	1.37	1.30	1.73	1.31	1.69	1.39	1.62
全碱	8.50	8.18	7.94	6.46	8.92	6.01	8.28	5.17
稀土元素/10 ⁻⁶								
La	89.2	69.5	62.5	65.0	147	86.89	57.3	123
Ce	172	132	123	118	242	168	108	250
Pr	19.5	14.7	14.1	16.4	27.2	19.4	13.1	34.2
Nd	67.6	50.0	50.7	64.2	89.8	69.8	48.3	138
Sm	12.3	7.5	10.4	12.8	12.4	12.2	9.7	29.2
Eu	1.06	1.55	1.17	1.82	1.97	1.19	1.14	0.84
Gd	9.20	4.70	8.13	9.92	8.99	9.13	7.23	26.4
Tb	1.50	0.73	1.42	1.62	1.20	1.48	1.17	4.23
Dy	8.69	3.88	8.39	8.95	6.12	8.03	6.31	23.9
Ho	1.57	0.78	1.59	1.65	1.17	1.47	1.17	4.43
Er	4.67	2.34	4.62	4.51	3.46	4.12	3.22	11.8
Tm	0.74	0.41	0.74	0.69	0.56	0.60	0.49	1.69
Yb	4.81	3.04	4.98	4.42	3.64	3.85	3.21	10.5
Lu	0.67	0.51	0.73	0.60	0.55	0.55	0.46	1.40
∑REE	439	314	340	361	580	432	296	790
[La/Yb] _N	13.3	16.4	9.00	10.5	29.1	16.2	12.8	8.42
δEu	0.29	0.74	0.38	0.48	0.55	0.33	0.40	0.09
微量元素/10 ⁻⁶								
Rb	444	656	400	411	300	455	588	596
Zr	173	226	160	218	276	221	199	883
Nb	15.5	18.8	24.6	23.7	20.8	23.2	25.4	47.2
Hf	5.77	7.55	5.35	5.83	7.02	5.84	6.50	29.43
Ta	2.02	2.64	4.82	2.65	2.76	2.74	3.14	3.26
Th	94.3	59.3	43.9	46.3	58.2	54.3	32.5	61.9
U	12.4	24.5	12.4	9.1	12.2	11.9	8.66	16.8
Ba	296	489	365	504	655	311	461	189
Y	44.7	22.4	47.4	50.1	33.5	45.5	35.3	130.9
Sr	48.6	175	71	115	193	82	61.2	53.9
Nb*值	0.14	0.19	0.27	0.31	0.14	0.30	0.30	0.47
Rb/Ba	1.50	1.34	1.10	0.82	0.46	1.46	1.28	3.15
Nb/Ta	7.66	7.12	5.10	8.92	7.53	8.46	8.08	14.48
Rb/Ti	0.37	0.32	0.21	0.08	0.10	0.11	0.26	0.06
La/Nb	5.75	3.70	2.54	2.75	7.11	3.75	2.26	2.60

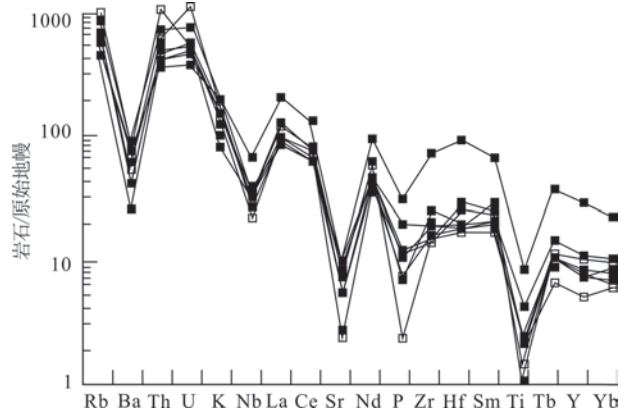


图9 锡田岩体及其包体微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化数据引自文献[34])图例同图6

Fig.9 Primitive-mantle normalized spidergrams of enclaves and their host granites in Xitian granites (symbols as for Fig. 6)

及寄主岩岩石矿物组成中含有斜长石即进一步证实了该点。

包体与寄主岩微量元素分析结果(表1)表明,包体及寄主岩富集Rb、Th、U、La及Nd,亏损Ba、Nb、Sr、P及Ti。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,包体与寄主岩分布曲线形态基本一致,出现Ba、Nb、Sr、P、Ti低槽(图9),指示包体与寄主岩具有成因联系^[20]。包体与寄主岩相比,相对富Sr、Ba、P及Ti;包体Rb/Sr为1.5~11.1,寄主花岗岩的Rb/Sr为3.8~9.2,均远高于原始地幔值0.025^[31];包体中La/Nb值为2.2~7.1, Ba/Nb值为4.0~31,也较之原始地幔、洋脊玄武岩、洋岛玄武岩的相应值偏高^[32],上述

微量元素特征表明其岩石包体可能为幔源基性岩浆经改造后的产物,极可能为基性岩浆经演化或与酸性岩浆混合产生的过渡岩浆结晶形成^[32]。寄主岩、岩石包体Nb*值($Nb^* = 2 \times Nb_N / (K_N + La_N)$)分别为0.14~0.27、0.14~0.47,显示Nb相对于K和La亏损,而Nb负异常值指示岩浆混染大陆壳和花岗质岩石的特征^[33],指示寄主花岗岩、岩石包体岩浆混染了大陆壳物质和花岗质岩石特征。

4 锆石U-Pb年龄特征

寄主花岗岩(样号:H7)和包体(样号:BT6)中锆石呈柱状晶形,粒径一般介于70~200 μm,长宽比在2:1~3:1,晶形比较完整,裂纹不发育,阴极发光图像显示这些锆石发育典型岩浆成因的震荡环带(图10);同位素分析结果(表2)显示,寄主花岗岩中锆石U含量为 $73 \times 10^{-6} \sim 1553 \times 10^{-6}$, Th含量为 $86 \times 10^{-6} \sim 354 \times 10^{-6}$, Th/U比值介于0.08~1.05,平均值为0.61;岩石包体中锆石U含量为 $69 \times 10^{-6} \sim 2239 \times 10^{-6}$, Th含量介于 $60 \times 10^{-6} \sim 859 \times 10^{-6}$, Th/U比值介于0.02~2.85,平均值为0.96;阴极发光图像及Th/U比值特征表明,样品H7和BT6的锆石为岩浆锆石;分析结果表明,锆石Th和U含量较高, Th/U比值均大于0.01,显示为典型岩浆锆石(岩浆锆石Th/U比值一般为0.5~1.5)^[15,35]。

寄主岩H7样品获得25个点的年龄数据,有14个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄集中分布于148~154 Ma(图11-a),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(150.04±0.52)

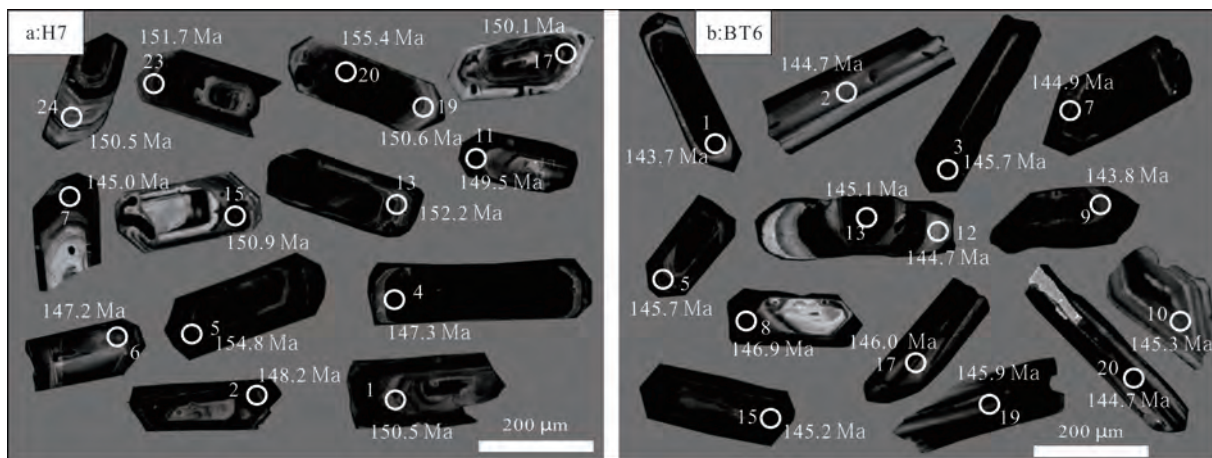


图10 样品H7(a)、BT6(b)的锆石阴极发光照片

Fig. 10 Cathodoluminescence images of zircons from Sample H7 (a) and BT6 (b)

表2 锡田岩体暗色微粒包体及寄主岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果
 Table 2 U-Pb isotope composition of zircons from the dark microgranular enclaves and their host rocks of Xitian pluton as measured by LA-ICP-MS

样品号	含量/ 10^{-6}			同位素比值				年龄/Ma							
	U	Th	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
H7 寄主岩															
H7-1	247	137	0.56	0.0515	0.0004	0.1678	0.0016	0.0236	0.0001	261.2	12.0	157.5	1.4	150.5	0.7
H7-2	232	263	1.13	0.0512	0.0005	0.1641	0.0015	0.0233	0.0001	255.6	52.8	154.3	1.3	148.2	0.6
H7-3	1553	130	0.08	0.0498	0.0001	0.1734	0.0009	0.0253	0.0001	183.4	7.4	162.4	0.8	160.8	0.7
H7-4	258	160	0.62	0.0499	0.0007	0.1524	0.0024	0.0222	0.0001	190.8	39.8	144.0	2.1	141.3	0.8
H7-5	541	165	0.30	0.0494	0.0003	0.1656	0.0011	0.0243	0.0001	168.6	17.6	155.6	1.0	154.8	0.6
H7-6	117	175	1.50	0.0488	0.0008	0.1554	0.0026	0.0231	0.0001	139.0	37.0	146.6	2.3	147.2	0.8
H7-7	105	86	0.82	0.0501	0.0014	0.1569	0.0039	0.0227	0.0002	211.2	32.4	148.0	3.4	145.0	1.0
H7-8	295	196	0.66	0.0537	0.0021	0.1738	0.0073	0.0234	0.0001	366.7	95.4	162.7	6.3	149.1	0.5
H7-9	115	89	0.77	0.0496	0.0007	0.1598	0.0024	0.0234	0.0001	176.0	35.2	150.5	2.1	149.0	0.8
H7-10	1134	361	0.32	0.0558	0.0044	0.1671	0.0017	0.0242	0.0002	442.6	175.9	156.9	1.5	153.9	1.4
H7-11	163	153	0.94	0.0492	0.0008	0.1591	0.0029	0.0235	0.0002	166.8	38.9	149.9	2.5	149.5	1.1
H7-12	73	50	0.68	0.0494	0.0014	0.1576	0.0044	0.0232	0.0003	164.9	66.7	148.6	3.9	147.9	2.0
H7-13	420	277	0.66	0.0488	0.0005	0.1608	0.0017	0.0239	0.0002	139.0	21.3	151.4	1.5	152.2	1.5
H7-14	90	51	0.56	0.0494	0.0006	0.1520	0.0021	0.0223	0.0001	164.9	-2.8	143.6	1.8	142.3	0.9
H7-15	549	354	0.64	0.0488	0.0002	0.1594	0.0010	0.0237	0.0001	139.0	11.1	150.2	0.9	150.9	0.7
H7-16	149	112	0.75	0.0492	0.0006	0.1602	0.0022	0.0237	0.0002	166.8	29.6	150.9	2.0	150.7	1.4
H7-17	187	142	0.76	0.0490	0.0004	0.1589	0.0019	0.0236	0.0002	146.4	20.4	149.8	1.7	150.1	1.4
H7-18	889	212	0.24	0.0491	0.0002	0.1631	0.0019	0.0241	0.0003	153.8	9.3	153.4	1.6	153.4	1.6
H7-19	65	43	0.66	0.0489	0.0019	0.1595	0.0065	0.0236	0.0003	142.7	88.0	150.2	5.7	150.6	1.9
H7-20	915	518	0.57	0.0502	0.0008	0.1684	0.0024	0.0244	0.0002	211.2	37.0	158.1	2.1	155.4	1.0
H7-21	1063	119	0.11	0.0494	0.0003	0.1596	0.0016	0.0234	0.0002	168.6	14.8	150.4	1.4	149.1	1.2
H7-22	570	240	0.42	0.0493	0.0003	0.1622	0.0013	0.0238	0.0001	164.9	11.1	152.6	1.1	151.8	0.9
H7-23	348	131	0.38	0.0484	0.0005	0.1589	0.0022	0.0238	0.0002	116.8	22.2	149.7	1.9	151.7	1.2
H7-24	245	129	0.53	0.0503	0.0004	0.1639	0.0019	0.0236	0.0002	209.3	20.4	154.2	1.7	150.5	1.3
H7-25	295	195	0.66	0.0505	0.0004	0.1644	0.0022	0.0236	0.0003	216.7	20.4	154.6	1.9	150.6	1.6
BT6 暗色微粒包体															
BT6-1	165	262	1.59	0.0492	0.0003	0.1529	0.0015	0.0225	0.0002	166.8	14.8	144.5	1.3	143.7	1.1
BT6-2	646	1193	1.85	0.0492	0.0002	0.1539	0.0013	0.0227	0.0002	166.8	7.4	145.4	1.2	144.7	1.1
BT6-3	69	60	0.87	0.0497	0.0005	0.1558	0.0020	0.0227	0.0002	189.0	19.4	147.0	1.8	144.9	1.1
BT6-5	514	853	1.66	0.0490	0.0002	0.1543	0.0014	0.0229	0.0002	146.4	-23.1	145.7	1.3	145.7	1.2
BT6-6	515	1467	2.85	0.0492	0.0002	0.1552	0.0014	0.0229	0.0002	166.8	9.3	146.5	1.2	145.9	1.2
BT6-7	299	250	0.84	0.0491	0.0002	0.1538	0.0011	0.0227	0.0001	153.8	11.1	145.3	1.0	144.9	0.9
BT6-8	1430	30	0.02	0.0491	0.0002	0.1560	0.0016	0.0230	0.0002	153.8	11.1	147.2	1.4	146.9	1.3
BT6-9	100	183	1.83	0.0505	0.0005	0.1572	0.0023	0.0226	0.0002	216.7	22.2	148.2	2.1	143.8	1.2
BT6-10	121	123	1.02	0.0504	0.0004	0.1582	0.0017	0.0228	0.0002	213.0	16.7	149.2	1.5	145.3	1.3
BT6-11	413	84	0.20	0.0505	0.0003	0.1787	0.0018	0.0257	0.0002	220.4	13.0	167.0	1.6	163.3	1.3
BT6-12	595	232	0.39	0.0492	0.0004	0.1538	0.0028	0.0227	0.0004	166.8	-12.0	145.3	2.5	144.7	2.5
BT6-13	69	50	0.72	0.0515	0.0008	0.1613	0.0025	0.0228	0.0002	264.9	33.3	151.9	2.2	145.1	1.2
BT6-14	310	155	0.50	0.0508	0.0002	0.1807	0.0014	0.0258	0.0002	231.6	11.1	168.6	1.2	164.3	1.1
BT6-15	326	148	0.45	0.0500	0.0005	0.1570	0.0028	0.0228	0.0003	194.5	22.2	148.0	2.4	145.2	2.2
BT6-16	302	120	0.40	0.0494	0.0005	0.1553	0.0030	0.0228	0.0004	168.6	24.1	146.5	2.6	145.3	2.4
BT6-17	114	113	0.99	0.0516	0.0017	0.1631	0.0058	0.0229	0.0003	333.4	75.9	153.4	5.1	146.0	2.0
BT6-18	137	134	0.98	0.0506	0.0006	0.1592	0.0024	0.0228	0.0002	233.4	29.6	150.0	2.1	145.3	1.1
BT6-19	220	168	0.76	0.0512	0.0005	0.1618	0.0023	0.0229	0.0003	253.8	24.1	152.3	2.0	145.9	1.6
BT6-20	2239	859	0.38	0.0526	0.0003	0.1647	0.0020	0.0227	0.0003	322.3	13.0	154.8	1.7	144.7	1.6

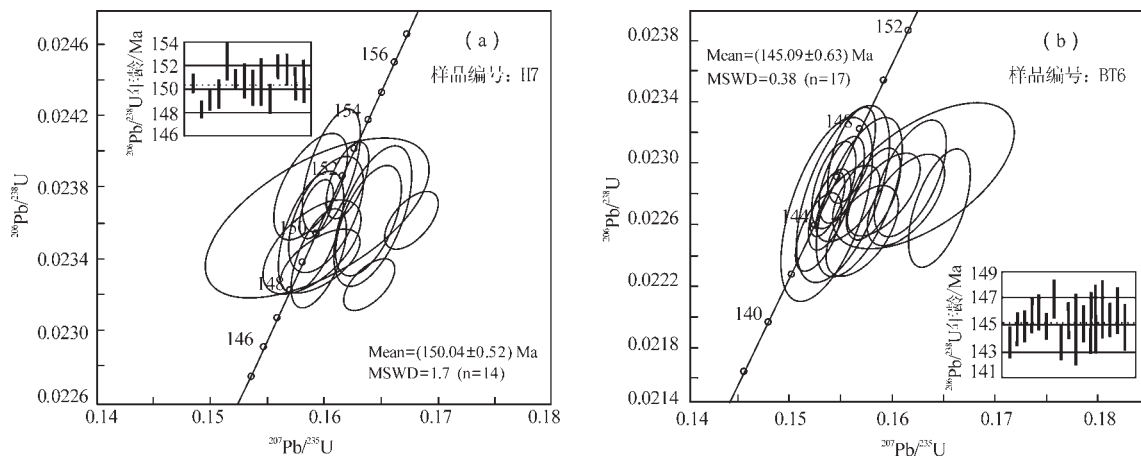


图11 锡田岩体暗色微粒包体及寄主岩中锆石U-Pb谐和图

Fig.11 U-Pb concordia diagram of zircons from dark microgranular enclaves and their host rocks of Xitian granites

Ma, (2σ , MSWD=1.7, 68% 置信度), 代表寄主花岗岩的结晶时间;暗色微粒包体BT6样品获得19个点的年龄数据,有17个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布于142~150 Ma(图11-b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(145.09 \pm 0.63)\text{Ma}$ (2σ , MSWD=0.38, 68% 置信度), 代表了暗色微粒包体结晶时间。锆石U-Pb年龄结果表明,暗色微粒包体与寄主岩的锆石U-Pb年龄在误差范围内基本一致。

5 讨论

5.1 岩浆混合作用的岩石学特征

对岩浆混合作用的研究,大部分都以暗色微粒包体为载体来进行讨论^[22,36-37],而暗色微粒包体的岩石学特征是大家所关注的,并且一致认为暗色微粒包体具有淬冷结构、反向脉、交代边、矿物镶边及发育针状磷灰石等不平衡矿物组合和结构的岩石学特征,是岩浆混合作用存在的直接证据^[22,38-43]。对锡田岩体中暗色微粒包体岩石学的研究表明,暗色微粒包体不含富铝特征的变质矿物,不发育变晶结构和片理构造等变质岩的组构特征,缺乏含水矿物的脱水残留相,指示包体不是基底变质岩的难容残留物,因此否定了锡田岩体中的暗色微粒包体是围岩捕虏体^[32]。包体具微细粒的岩浆结构(粒度上较寄主花岗岩小得多),且在包体边部经常发育暗色微细粒的淬冷边,有时在包体中还可以见到反向脉,这些结构表明,暗色微粒包体是在突然骤冷下结晶形成,与寄主花岗岩的中细粒结构所反映的缓慢结

晶(寄主岩中矿物的结晶时间较充裕)环境不同,因此表明锡田岩体中的暗色包体不是同源或同生包体^[44]。对包体矿物组合特征研究,见包体中发育针状磷灰石,其长宽比最高可达到1:30,而寄主岩中的磷灰石呈短柱状,显示出包体和寄主岩中磷灰石成因不同,针状磷灰石的发育,指示包体是岩浆混合成因的,这与刘国庆^[4]、吴自成等^[19]的研究认为锡田岩体中暗色包体是壳幔岩浆混合的产物一致。

在野外对包体进行观察,最为醒目的是包体中含有斜长石、钾长石巨斑晶,有的斜长石斑晶被溶蚀呈圆形球粒状(图4-c),有的斜长石斑晶横跨在寄主岩与包体的接触界线上(图4-a、4-b),偶尔还能见到发育眼球状石英斑晶,显然,暗色微粒包体中发育钾长石巨斑晶、眼球状石英及钾长石环斑(图3-c)不是正常岩浆结晶的产物,这些特征的形成最为可能的解释是在酸性岩浆结晶过程中又有基性岩浆的加入,使二者的物理化学条件发生了明显的改变而形成^[45]。再有,包体形态多呈椭圆状或透镜状,部分呈长条状,少数呈不规则状,显示了包体经历了塑性或半塑性的形变过程,而椭圆状包体及其中的钾长石斑晶的长轴方向所显示的定向构造,指示了包体的流动特征,这说明代表包体的偏基性岩浆向酸性岩浆中运移而发生了岩浆混合。在岩浆混合过程中,部分已晶出斜长石、钾长石斑晶和基性岩浆一起运移而混合在一起,最后有的定位于寄主岩与包体的接触界线上,有的留在包体之中,有的长石斑晶边部被溶蚀后再结晶形成钾长石

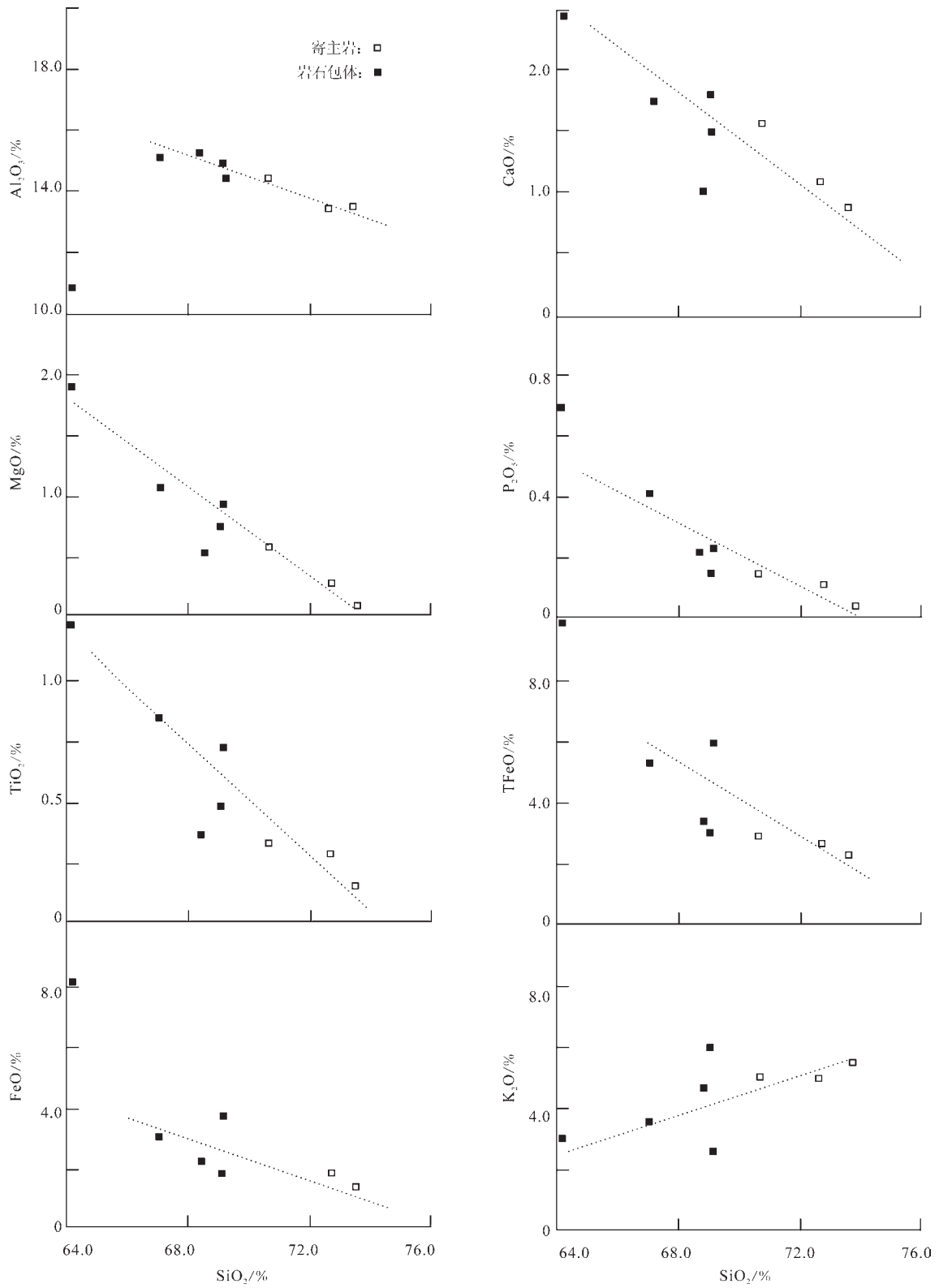


图 12 锡田岩体及包体主量元素哈克图解

Fig.12 Harker diagrams showing major elements for enclaves and their host granites

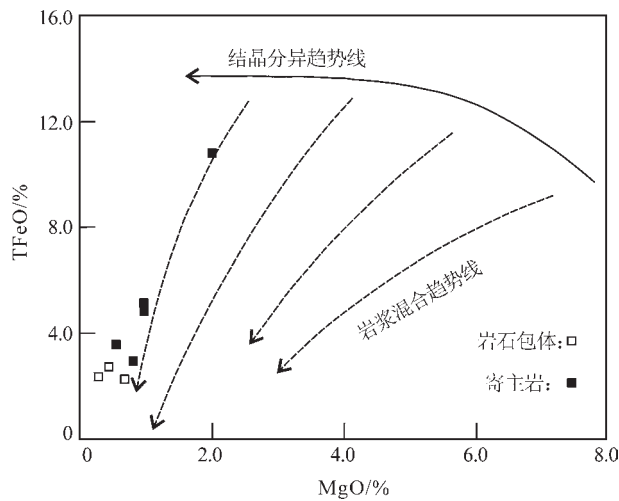


图 13 暗色微粒包体与寄主岩的MgO-TFeO图解
Fig.13 Diagram of MgO-TFeO for dark microgranular enclaves and their host rocks

环斑等。

5.2 岩浆混合作用的地球化学特征

在暗色微粒包体及其寄主岩的主量元素Harker图解中, SiO₂与Al₂O₃、CaO、MgO、P₂O₅、TiO₂、FeO、TFeO及K₂O投点呈良好的线性关系(图12), 在分离结晶作用中, 由于受固溶体矿物晶出的影响, 其演化线多为曲线, 而不是直线, 因此图解中直线分布特征反映它们是岩浆混合作用的产物^[46-48]。暗色微粒包体中MgO含量在0.5%~2.0%、TFeO含量在3.1%~10.8%, 而寄主花岗岩中MgO含量在0.2%~0.6%、TFeO含量在2.5%~2.9%, 暗色微粒包体较寄主花岗岩富Mg、Fe。在TFeO-MgO图解中, 投点沿岩浆混合趋势线分布、而远离结晶分异趋势线(图13), 显示了岩浆混合的趋势^[20]。暗色微粒包体和寄主岩的主要氧化物比值表现出良好的协变关系, 暗示它们在成因上可能存在密切的联系^[32], 它们在同

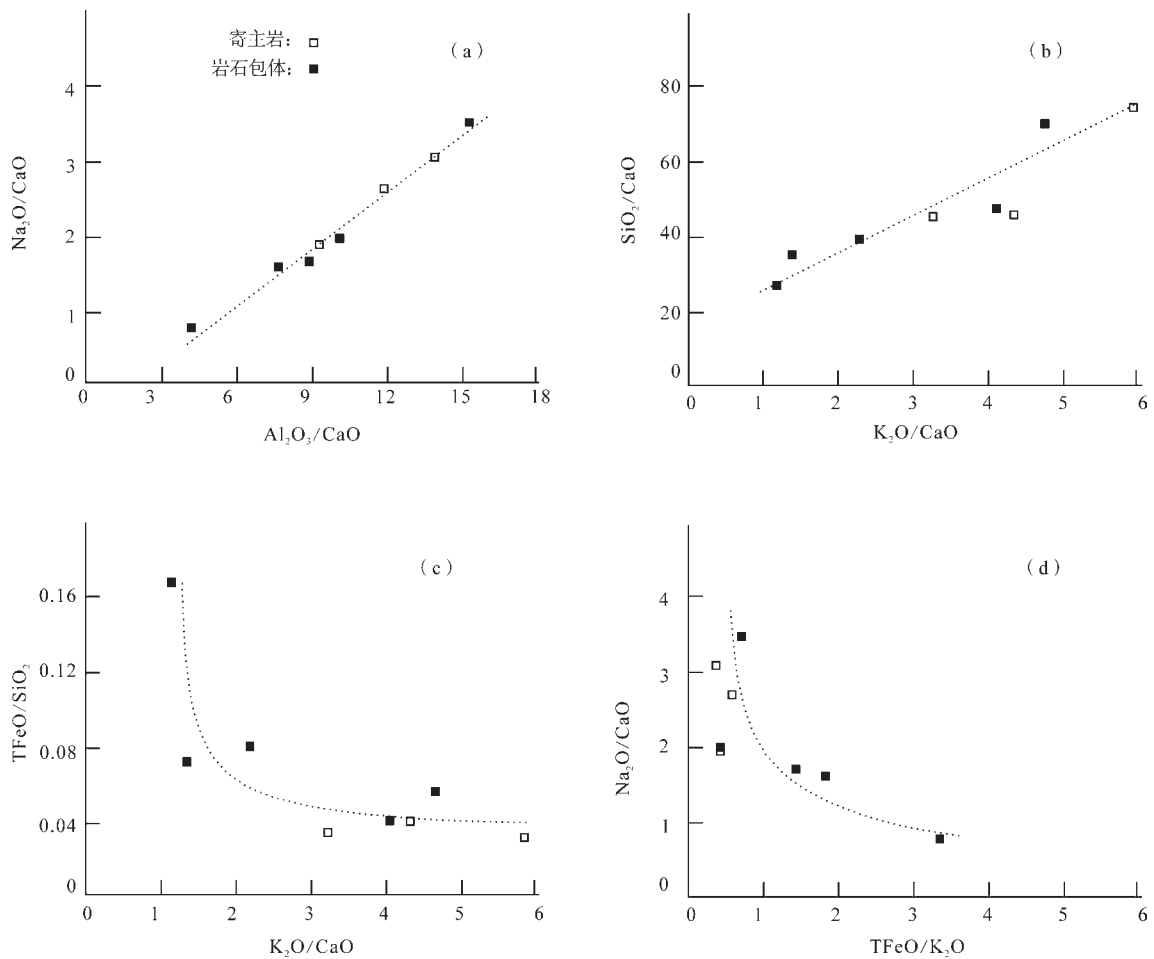


图 14 锡田岩体花岗岩与包体主量元素协变图解
Fig.14 Covariant diagram for major elements of enclaves and their host granites in Xitian granites

母氧化物比值协变图(图 14-a, 14-b)上表现为线性相关,在多元素不同分母比值图(图 14-c, 14-d)上表现为双曲线演化关系,上述特征也指示包体与寄主岩之间很可能发生过岩浆混合作用^[49]。近年来的熔融实验研究表明陆壳熔融通常是富钠的^[50-52],不能熔融形成具高钾钙碱性特征花岗质岩浆, Panino^[52]根据陆壳岩石熔融结构提出高钾钙碱性花岗岩通常是壳幔混合的结果。而锡田岩体中的暗色包体和寄主岩在 SiO₂-K₂O 图解中,投点基本上都在高钾钙碱性系列岩石区域,表明锡田岩体的成因与幔源岩浆活动有关。

根据 Watson 等^[53]提出的锆石饱和温度计计算公式: $(t_{Zr} (^{\circ}C)) = \{12900 / [\ln D_{Zr} (\text{锆石/熔体}) + 0.85M2.95]\} - 273$,对锡田岩体中发育的暗色包体和寄主岩进行结晶温度的计算(假设不做锆石矿物的 Zr、Hf 校正,纯锆石中含 Zr=497 657×10⁻⁶,用全岩 Zr 含量近似代表熔体 Zr 含量,计算得锆石饱和温度;计算方法参见杨策^[16]、付强^[54]),暗色微粒包体中锆石的结晶温度为 901~969℃,平均温度为 932℃;寄主岩中锆石结晶温度为 922~934℃,平均温度为 928℃,计算结果表明,锡田岩体中暗色包体与寄主岩中锆石饱和和结晶温度一致。

包体与寄主岩具有相似的稀土模式图和微量元素特征,且包体与寄主岩的稀土分布模式图具有明显的重叠区,这种相似的地球化学组成指示包体与寄主岩具有成因联系。在微量元素比值特征上,反映岩浆演化的 Rb/Ba、Nb/Ta 并不具有自包体到寄主岩逐渐增大的趋势,这说明了两者不是由同源岩浆分异演化形成的^[20]。来源于同一岩浆房的岩浆 Rb/Ti 比值相对固定,变化不大,而不同岩浆房的岩浆 Rb/Ti 比值相对变化较大^[55-56]。锡田岩体中暗色包体的 Rb/Ti 为 0.058~0.258,均值为 0.121;寄主花岗岩的 Rb/Ti 为 0.208~0.370,均值为 0.3,两者之间差别较大,指示暗色包体和寄主花岗岩具有不同性质的岩浆源区^[45]。一般认为, Nb 和 Ta 为高强场稳定元素,离子半径相近,地球化学性质相似,亲岩浆性的变化是同步的, Nb/Ta 比值在地幔部分熔融或岩浆分离结晶过程中通常是变化很小的,在没有外来物质加入前提下,岩浆演化的 Nb/Ta 比值可以保持一个稳定值^[45,57-59]。对锡田岩体中暗色微粒包体及其寄主岩 Nb/Ta 进行计算,寄

主花岗岩比值为 5.1~7.6,平均值为 6.6, Nb/Ta 比值低于地壳平均值 11~12^[60];暗色微粒包体的 Nb/Ta 比值为 7.5~14.5,平均值为 9.5,与下地壳的比值接近,下地壳的 Nb/Ta 比值为 8.3^[61]。Nb/Ta 比值表明,包体和寄主花岗岩的 Nb/Ta 比值不同,反映其岩浆不是同源的,而暗色微粒包体及其寄主岩的 Nb/Ta 均低于地壳的平均值,且暗色微粒包体比值与下地壳值接近,指示暗色包体来源于深部。另外,对包体中 Mg[#] 值进行计算 ($Mg^{\#} = xMg / [xMg + xFe^{2+}]$), Mg[#] 介于 27~75,显示出包体高镁、偏基性的特征^[20,62],指示包体其源区可能为深部地幔^[20],这与 Nb/Ta 比值指示包体来源于深部是一致的。

5.3 岩浆混合作用的锆石 U-Pb 年龄特征

对锡田岩体中发育的暗色包体及其寄主岩锆石 U-Pb 年龄研究表明,暗色微粒包体形成年龄 (145.09±0.63) Ma 与其寄主岩石的形成年龄 (150.04±0.52) Ma 在误差范围内一致,这进一步说明包体不是围岩捕虏体或残留体,而是岩浆混合成因的铁镁质包体,同时,暗色包体与寄主岩锆石 U-Pb 年龄的获得,为岩浆混合作用发生的时间提供了有力的锆石 U-Pb 年龄约束,时间大致为晚侏罗世。锡田岩体中发育的暗色包体为岩浆混合成因及其锆石 U-Pb 年龄的约束,这与区域上朱金初等^[44]报道的南岭姑婆山主体花岗岩形成年龄 (162±3) Ma,暗色微粒包体形成年龄 (162±2) Ma、刘勇等^[63]报道的铜山岭岩体主体花岗岩形成年龄 (161.8±1.4) Ma,暗色微粒包体形成年龄 (154.0±5.8) Ma 是一致的和可以对比的。另外,包体多呈椭圆状或透镜状的塑变形态特征(图 3-a, 3-b),显示二者同时或近时形成,其同位素年龄也证明了这一点。

南岭地区燕山期花岗岩浆活动非常广泛和强烈,在 165~144 Ma^[64]期间形成了大量的花岗岩,并且幔源岩浆参与花岗岩的形成^[64,69],花岗岩中发育的暗色包体为岩浆混合成因证实了幔源岩浆与花岗岩形成间成因上的联系。另外,刘勇^[63]对南岭宁远一道县及宜章—长城岭地区发育的玄武岩进行锆石 U-Pb 年龄研究,由 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 技术获得的 U-Pb 年龄为 136~157 Ma、孟立丰^[65]在华南中生代构造演化研究中,对盆地(如衡阳盆地、攸县盆地)中发育的玄武岩进行 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年,

获得部分玄武岩的年龄 160~110 Ma,这与南岭地区中一晚侏罗世花岗岩 180~151 Ma^[66]成岩年龄有一定的重叠,说明花岗岩的形成与基性岩浆侵入有一定的联系。而 Zhang et al.^[67-68]通过综合地球物理资料对华夏块体的地壳结构进行解译,发现华夏中地壳下部 20 km 左右存在一个厚约 5 km 的辉长岩-玄武岩层,表明华夏地块有可能存在时代较新的大规模基性岩浆的内侵。华仁民等^[69]的研究认为南岭地区在 170~150 Ma 时限间,岩石圈全面伸展-减薄,地幔上涌产生的玄武质岩浆底侵引发了大规模的地壳熔融,形成大量以黑云母二长花岗岩为主体的“改造型”或陆壳重熔型花岗岩类。因此认为,锡田岩体是在岩石圈全面伸展-减薄,地幔物质上涌诱发地壳物质部分熔融,形成岩浆混合成因的黑云母二长花岗岩及暗色微粒包体。

6 结论

(1)南岭中段锡田岩体中广泛发育暗色微粒包体,对暗色微粒包体的岩相学(包体形态、淬冷边、反向脉及定向构造)和包体中不平衡矿物组合(环斑钾长石、眼球状石英、针状磷灰石等)的研究表明暗色微粒包体是岩浆混合成因的。

(2)暗色微粒包体具有较寄主花岗岩贫硅、贫碱,富铁、镁特征;稀土配分模式图及微量元素蛛网图的相似性表明,暗色包体与其寄主花岗岩在成因上关联。利用主量元素 Harker 图解、协变图解、MgO-TFeO 图解对暗色微粒包体的成因探讨表明,暗色微粒包体是岩浆混合成因的。对微量元素 Rb/Ti 比值、Nb/Ta 的研究表明,暗色微粒包体与寄主花岗岩的比值差别较大,以及 Mg* 较高,指示暗色微粒包体可能来源于深部地幔。而 Nb* 值计算结果表明,Nb 相对于 K 和 La 亏损,指示暗色微粒包体及寄主花岗岩在成岩过程中混染了大陆壳物质或花岗岩石。

(3)锆石 U-Pb 定年结果表明:暗色微粒包体年龄(145.09±0.63) Ma 与寄主花岗岩的年龄(150.04±0.52) Ma 的基本一致,为岩浆混合作用的时间提供了有力的锆石 U-Pb 年龄约束,时限为晚侏罗世。这组年龄与南岭中段的姑婆山岩体、铜山岭岩体中暗色包体形成时间相差不大,与区域上的基性岩浆活动时限有一定的重叠,表明锡田岩体中暗色微粒

包体及其寄主花岗岩是在岩石圈伸展-减薄,地幔物质上涌诱发地壳物质部分熔融的环境下形成的。

致谢:感谢茶陵—宁冈项目队对本研究工作的大力支持;感谢湖南省地质调查院马铁球高级工程师、陈必河高级工程师在样品采集及样品测试中的帮助;感谢中国地质大学(武汉)马昌前教授、南京地质调查中心邢光福研究员在论文撰写过程中的帮助和指导;感谢中国地质大学(武汉)研究生周文达在资料收集中的帮助;感谢《中国地质》编辑部在论文修改过程中提供了部分有价值的参考文献。

参考文献(References):

- [1] 付建明,程顺波,卢友月,等.湖南锡田云英岩-石英脉型钨锡矿的形成时代及其赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J].地质与勘探,2012,48(2):313-320.
Fu Jianming, Cheng Shunbo, Lu Youyue, et al. Geochronology of the greisen-quartz-vein type tungsten-tin deposit and its host granite in Xitian, Hunan Province[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 313-320(in Chinese with English abstract).
- [2] 马铁球,柏道远,邝军,等.湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].地质通报,2005,24(5):415-419.
Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Kuang Jun, et al. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, south eastern Hunan, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(5): 415-419(in Chinese with English abstract).
- [3] 付建明,伍式崇,徐德明,等.湘东锡田钨锡多金属矿区成岩成矿时代的再厘定[J].华南地质与矿产,2009,(3):1-7.
Fu Jianming, Wu Shichong, Xu Deming, et al. Reconstrait from Zircon SHRIMP U-Pb dating on the age of magma intrusion and mineralization in Xitian tungsten-tin polymetallic orefield, eastern Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2009, 3: 1-7(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘国庆,伍式崇,杜安道,等.湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究[J].大地构造与成矿学,2008,32(1):63-71.
Liu Guoqing, Wu Shichong, Du Andao, et al. Metallogenic ages of the Xitian tungsten-tin deposit, eastern Hunan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(1): 63-71(in Chinese with English abstract).
- [5] 伍光英,马铁球,冯艳芳,等.南岭万洋山加里东期花岗岩地质地球化学特征及其成因[J].中国地质,2008,35(4):608-617.
Wu Guangying, Ma Tieqiu, Feng Yanfang, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Caledonian Wanyangshan granite in the Nanling Mountains, South China[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 608-617(in Chinese with English abstract).

- [6] 蔡杨, 马东升, 陆建军, 等. 湖南邓阜仙岩体和锡田岩体的地球化学及成矿差异性对比[J]. 矿物学报, 2011, (增刊): 4-6.
Cai Yang, Ma Dongsheng, Lu Jianjun, et al. Relationship of petro-geochemical characteristics and metallogenic capacity differences between Dengfuxian granite and Xitian granite in Hunan province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (Supp.): 4-6 (in Chinese).
- [7] 黄卉, 马东升, 陆建军, 等. 湖南邓阜仙复式花岗岩体的锆石-U-Pb年代学研究[J]. 矿物学报, 2011, 增刊: 590-591.
Huang Hui, Ma Dongsheng, Lu Jianjun, et al. Zircon U-Pb geochronology of the Dengfuxian composite pluton in Hunan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (Supp.): 590-591(in chinese).
- [8] 马铁球, 王先辉, 柏道远. 锡田含 W, Sn 花岗岩体的地球化学特征及其形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, 2004, (1): 11-16.
Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Bai Daoyuan. Geochemical characteristics and its tectonic setting of the Xitian tungsten-tin-bearing granite pluton[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004, 1: 11-16(in Chinese with English abstract).
- [9] 邓湘伟, 戴雪灵, 刘广东, 等. 钦-杭缝合带锡田合江口 SP 花岗岩地质地球化学特征及其对比研究[J]. 矿物岩石, 2012, 32(2): 45-55.
Deng Xiangwei, Dai Xueling, Liu Guangdong, et al. Geological and geochemical characteristics of SP granites in Hejiangkou deposit of Xitian ore field and their contraction with pluton of Qinhang suture zone[J]. Mineral Petrology., 2012, 32(2): 45-55(in Chinese with English abstract).
- [10] 伍式崇, 龙自强, 曾桂华, 等. 湖南锡田地区锡铅锌多金属矿勘查主要进展及找矿前景[J]. 华南地质与矿产, 2011, (2): 100-104.
Wu Shichong, Long Ziqiang, Zeng Guihua, et al. Prospecting progress and potential of Sn-Pb-Zn polymetallic deposits in Xitian area, Hunan province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2011, 2: 100-104(in Chinese with English abstract).
- [11] 蔡新华, 贾宝华. 湖南锡田锡矿的发现及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1100-1108.
Cai Xinhua, Jia Baohua. Discovery of the Xitian tin deposit, Hunan, and its ore potential[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1100-1108(in Chinese with English abstract).
- [12] 伍式崇, 龙自强, 徐辉煌, 等. 湖南锡田锡钨多金属矿床成矿构造特征及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(2): 217-226.
Wu Shichong, Long Ziqiang, Xu Huihuang, et al. Structural characteristics and prospecting significance of the Xitian tin-tungsten polymetallic deposit, Hunan Province, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(2): 217-226(in Chinese with English abstract).
- [13] 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(5): 415-419.
Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Kuang Jun, et al. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, south-eastern Hunan, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(5): 415-419(in Chinese with English abstract).
- [14] 马铁球, 伍光英, 贾宝华, 等. 南岭中段郴州一带中晚侏罗世花岗岩浆的混合作用——来自镁铁质微粒包体的证据[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 506-512.
Ma Tieqiu, Wu Guangying, Jia Baohua, et al. Middle-Late jurassic granite magma-mixing in the middle segment of the Nanling Mountains, South China: Evidence from mafic microgranular enclaves[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(6): 506-512(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘勇, 肖庆辉, 耿树方, 等. 骑田岭花岗岩体的岩浆混合成因: 寄主岩及其暗色闪长质微粒包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1081-1091.
Liu Yong, Xiao Qinghui, Geng Shufang, et al. Magmatic mingling origin of adamellite: Zircon U-Pb dating and Hf isotopes evidence of microgranular dioritic enclaves and host rocks from Yangtianu adamellite of Qitianling, South China[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 1081-1091(in Chinese with English abstract).
- [16] 杨策, 朱金初, 张佩华, 等. 广西姑婆山里松花岗岩中闪长质包体的地球化学特征及其成因探讨[J]. 高校地质学报, 2006, 12(3): 310-318.
Yang Ce, Zhu Jinchu, Zhang Peihua, et al. Geochemical characteristics and genesis of dioritic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(3): 310-318(in Chinese with English abstract).
- [17] 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 湖南雪花顶花岗岩及其包体的地质地球化学特征和成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 588-597.
Cheng Shunbo, Fu Jianming, Xu Deming, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Xuehuading granitic batholith and its enclaves, South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(4): 588-597(in Chinese with English abstract).
- [18] 马丽艳, 付建明, 伍式崇, 等. 湘东锡田堇上锡多金属矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年研究[J]. 中国地质, 2008, 35(4): 706-713.
Ma Liyan, Fu Jianming, Wu Shichong, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of the Longshang tin-polymetallic deposit, Xitian orefield, eastern Hunan[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 706-713(in Chinese with English abstract).
- [19] 吴自成, 刘继顺, 舒国文, 等. 南岭燕山期构造-岩浆热事件与锡

- 田锡钨成矿[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(3): 201-205.
- Wu Zicheng, Liu Jishun, Shu Guowen, et al. The relationship between Yanshanian tectonic-magmatic thermal event and tungsten mineralization at Xitian, Nanling area[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 2010, 25(3): 201-205(in Chinese with English abstract).
- [20] 熊富浩, 马昌前, 陈玲, 等. 大别造山带白鸭山A型花岗岩中铁镁质微粒包体的成因及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 31-40.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Chen Ling, et al. Petrogenesis of mafic microgranular enclaves from baiyashan A-type granites in Dabie orogenic belt and its geological implications[J]. Mineral Petrology, 2010, 30(1): 31-40(in Chinese with English abstract).
- [21] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-294.
- Xiao Qinghui, Deng jinfu, Ma daquan, et al. Academic Research Thinking and Method of Granites[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-294(in Chinese).
- [22] 王德滋, 谢磊. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. 高校地质学报, 2008, 14(1): 16-21.
- Wang Dezi, Xie Lei. Magma mingling: Evidence from enclaves[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 16-21(in Chinese with English abstract).
- [23] 陈斌, 贺敬博, 马星华. 北太行山燕山期中酸性岩体中暗色包体的成因: 岩石学, 地球化学和锆石 Hf-O 同位素证据[J]. 中国科学(D辑), 2009, 39(7): 922-934.
- Chen Bin, He Jingbo, Ma Xinghua. Petrogenesis of mafic enclaves from the north Taihang Yanshanian intermediate to felsic plutons: Evidence from petrological, geochemical and zircon Hf-O isotopic data[J]. Science in China(Series D), 2009, 39(7): 922-934(in Chinese).
- [24] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604(in Chinese with English abstract).
- [25] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [26] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 1995, 19: 1-23.
- [27] Ludwig K R, Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-70.
- [28] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033-2048.
- [29] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 5(8): 523-548.
- [30] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版, 2003: 1-370.
- Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, et al. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-370(in Chinese with English abstract).
- [31] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth; the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust isotope geochemistry; the Crafoord symposium[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 11(90): 297-317.
- [32] 张晓琳, 邱检生, 王德滋, 等. 浙江普陀山黑云母花岗岩及其岩石包体的地球化学与岩浆混合作用[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(2): 81-92.
- Zhang Xiaolin, Qiu Jiansheng, Wang Dezi, et al. Geochemistry and magmatic mixing of the putuoshan biotite moyites and their enclaves, Zhejiang Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(2): 81-92(in Chinese with English abstract).
- [33] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-195.
- Li Changnian. Trace Element Petrology of Igneous[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1-195(in Chinese).
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, Magmatism in the Ocean Basins[M]. London: Geological Society Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [35] 李基宏, 杨崇辉, 杜利林. 河北平山深熔伟晶岩锆石成因及 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 自然科学进展, 2004, 14(7): 774-781.
- Li Jihong, Yang Chonghui, Du Lilin. Genesis of anatectic pegmatite zircon and SHRIMP U-Pb dating in Pingshan Hebei Province[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(7): 774-781(in Chinese).
- [36] 刘志鹏, 李建威. 西秦岭金厂石英闪长岩的岩浆混合成因: 岩相学和锆石 U-Pb 年代学证据及其构造意义[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1077-1090.
- Liu Zhipeng, Li Jianwei. Magma mixing genesis of the Jinchang quartz diorite in West Qinling Orogen, Western China: Petrographical and geochronological constraints and their tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1077-1090

- (in Chinese with English abstract).
- [37] 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 岩浆混合作用的类型、标志、机制、模式及其与成矿的关系——以新疆北部为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2317–2330.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Long Lingli, et al. Type, indicator, mechanism, model and relationship with mineralization of magma mixing: A case study in North Xinjing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2317–2330(in Chinese with English abstract).
- [38] Didier J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1991: 431–444.
- [39] 董申保. 近代花岗岩研究的回顾[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 1–12.
Dong Shengbao. A general review on the recent studies of granite[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1995, 1(2): 1–12(in Chinese with English abstract).
- [40] 王德滋, 周金城. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 235–241.
Wang Dezi, Zhou Jincheng. Look back and look forward to granite research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 235–241 (in Chinese with English abstract).
- [41] 齐有强, 胡瑞忠, 刘燊, 等. 岩浆混合作用研究综述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(4): 409–416.
Qi Youqiang, Hu Ruizhong, Liu Shen, et al. Review on magma mixing and mingling[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(4): 409–416(in Chinese with English abstract).
- [42] 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 等. 北秦岭老君山、秦岭梁斑结构花岗岩岩浆混合的岩相学证据及其意义[J]. 地质通报, 2002, 21(8–9): 523–529.
Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang, et al. Petrographic evidence of hybridization of magmas of the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granites in the north Qinling and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(8–9): 523–529(in Chinese with English abstract).
- [43] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1141–1152.
Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: Some crucial questions on granite study(1)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1141–1152(in Chinese with English abstract).
- [44] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. 地球化学, 2006, 35(5): 506–516.
Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, et al. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi, Western Nanling Mountains[J]. *Geochimica*, 2006, 35(5): 506–516(in Chinese with English abstract).
- [45] 张建军, 王涛, 张招崇, 等. 华北地块北缘西段巴音诺尔公-狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 53–66.
Zhang Jianjun, Wang Tao, Zhang Zhaochong, et al. Magma mixing origin of Yamatu granite in Nuorgong-Langshan area, western part of the northern margin of North China Craton: Petrological and geochemical evidences[J]. *Geological Review*, 2012, 58(1): 53–66(in Chinese with English abstract).
- [46] 周珣若. 花岗岩混合作用[J]. 地质学报, 1994, 1(1–2): 87–97.
Zhou Xunruo. Hybridization in the genesis of granitoids[J]. *Earth Science Frontiers*. 1994, 1(1–2): 87–97(in Chinese with English abstract).
- [47] Kwon S T, Tilton G R, Coleman R G, et al. Isotopic studies bearing on the tectonic of the west Junggar region, Xinjiang, China[J]. *Tectonics*, 1989, (8): 719–927.
- [48] 王玉往, 王京彬, 王书来, 等. 新疆富蕴希力库都克地区岩浆混合作用及其成矿意义[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 221–223.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Shulai, et al. Magma mixing in the Xilikuduke area, Fuyun County, Xinjiang and its mineralization significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 221–223(in Chinese with English abstract).
- [49] Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N, et al. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 1(37):380–392.
- [50] Rutter M J, Wyllie P J. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust[J]. *Nature*, 1988, 331: 159–160.
- [51] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891–931.
- [52] Panino D A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas[C]// Catro A, Fernandez C, Vigneresse J L (eds.). *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. London: Geological Society Special Publications, 1999, 168: 55–75.
- [53] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revised: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- [54] 付强, 葛文胜, 温长顺. 广西米场花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学特征和成因分析[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 293–303.
Fu Qiang, Ge Wensheng, Wen Changshun, et al. Geochemistry and genesis of Michang granites and their dark microgranular enclaves in Guangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(3):

- 293-303(in Chinese with English abstract).
- [55] 李永军, 赵仁夫, 李注苍, 等. 岩浆混合花岗岩微量元素成因图解尝试[J]. 长安大学学报, 2003, 25(3): 7-12.
Li Yongjun, Zhao Renfu, Li Zhucang, et al. Origin discrimination of granitoids formed by mingled magma: Using a trace element diagram and exemplified by Wenquan granites, Western Qinling[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 2003, 25(3): 7-12(in Chinese with English abstract).
- [56] 温志亮. 西秦岭教场坝岩体岩浆混合成因新认识[J]. 矿物岩石, 2008, 28(3): 29-36.
Wen Zhiliang. A new recognition of magma mixing process about Jiaochangba rock body, western Qinling[J]. Mineral Petrology, 2008, 28(3): 29-36(in Chinese with English abstract).
- [57] Barth M G, McDonough W F, Rndnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in continental crust[J]. Chemical Geology, 2000, 165: 197-213.
- [58] Foley S F. Liquid immiscibility and melt segregation in alkaline lamprophyres from labrador[J]. Lithos. 1984, 17:127-137.
- [59] 王晓霞, 王涛, Ilmari Happala, 等. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义——元素和Nd-Sr同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 935-946.
Wang Xiaoxia, Wang Tao, Hmari Happala, et al. Genesis of mafic enclaves from rapakivi-textures granites in the Qinling and its petrological significance: Evidence of elements and Nd, Sr isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 935- 946(in Chinese with English abstract).
- [60] Taylor S R, McClelland S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985, 1-312.
- [61] 王超, 刘良, 张安达, 等. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2809-2819.
Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, et al. Geochemisthy and petrography of earth Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12): 2809-2819(in Chinese with English abstract).
- [62] 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等. 华北克拉通东部中生代高Mg闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 120-129.
Xu Wenliang, Yang Chenghai, Yang Debin, et al. Mesozoic high-Mg diorites in eastern north China craton: Constraints on the mechanism of lithospheric thinning[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 120-129(in Chinese with English abstract).
- [63] 刘勇. 湘南骑田岭-道县地区燕山期花岗质岩浆的壳幔相互作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011: 1-286.
Liu Yong. Crust- mantle Interaction of Yanshanian Granitic Magma in Qitianling and Daoxian Area, Southern Hunan[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011: 1-286 (in Chinese with English abstract).
- [64] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 573-593.
Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 706-713(in Chinese with English abstract).
- [65] 孟立丰. 华南中生代构造演化特征——来自沉积盆地的研究证据[D]. 浙江: 浙江大学, 2012: 1-145.
Meng Lifeng. Mesozoic Techonic Evolution of the Southeast China Block—A Study from the Mesozoic Basins[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 1- 145(in Chinese with English abstract).
- [66] 洪大卫, 王涛, 童英. 中国花岗岩概述[J]. 地质论评, 2007, 53(增刊): 9-16.
Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying. An outline about granitoids in China[J]. Geological Review, 2007, 53(Supp.): 9- 16(in Chinese with English abstract).
- [67] Zhang Z J, Badal J, Li Y K, et al. Crust-upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China[J]. Tectonophysics, 2005, 395: 137-157.
- [68] Zhang Z J, Zhang X, Badal J. Composition of the crust beneath southeastern China derived from an integrated geophysical data set[J]. J. Geophys. Res., 2008, 113: B04417.
- [69] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291-304.
Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling Range[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 291-304(in Chinese with English abstract).

Magma mixing in the Xitian pluton of Hunan Province: Evidence from petrography, geochemistry and zircon U–Pb age

CHEN Di, CHEN Yan–ming, MA Ai–jun, LIU Wei, LIU Yao–rong, NI Yan–jun

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China)

Abstract: The Xitian pluton area is located in the middle segment of the Nanling Mountains, and the Yanshanian granites mainly consist of porphyritic biotite monzogranites with many dark microgranular enclaves. These dark microgranular enclaves have plastic shape and magmatic structure, quench boundary, reverse veins and unbalanced textures, such as acicular apatite, quartz ocellar texture and K–feldspar zoning. These characteristics indicate magma mixing. Geochemically, these enclaves are poor in SiO₂ and ALK, and the values of K, Fe, Mg, Ca and Ti in the enclave samples are higher than those in their host granites. The enclaves and their host rocks are rich in LREE, with LREE/HREE ratios ranging from 2.6 to 8.8, and display moderate to strong negative europium anomalies ($\delta\text{Eu}=0.09\text{--}0.74$). The selected major oxides of enclaves and porphyritic biotite granite show a linear correlation in Harker diagrams. The enclaves and their host rocks display obvious features of magma mixing in the Covariant diagrams. The TFeO–MgO discrimination diagrams also suggest the magma mixing origin of the enclaves. The petrography and geochemistry also indicate magma mixing. The enclaves from the Xitian pluton were probably derived from quenching of mafic magma during its intrusion into felsic magma. The LA–ICP–MS single–zircon U–Pb dating demonstrate that the magmatic age is (150.04 ± 0.52) Ma for the biotite monzogranites and (145.09 ± 0.63) Ma for the enclave. The two ages are basically the same, suggesting that the mixing event took place during the period of Late Jurassic.

Key words: Xitian pluton; biotite monzogranites; dark microgranular enclaves; zircon U–Pb age; LA–ICP–MS; magma mixing; Nanling Mountains

About the first author: CHEN Di, male, born in 1985, assistant engineer, engages in regional geological survey; E–mail: 542309852@qq.com.