

# 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细粒包体的 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据

刘 勇 肖庆辉<sup>1</sup> 耿树方<sup>1</sup> 王晓霞<sup>1</sup> 陈必河<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 湖南省地质调查研究院, 湖南 湘潭 411100)

**摘要:** 南岭骑田岭复式岩体仰天湖单元燕山期二长花岗岩中广泛分布有暗色闪长质微细粒包体, 这些包体主要呈被打散的片云状或次圆状, 大小不等, 颜色较寄主岩深, 粒度较细。本文在锆石内部结构的 CL 图像特征研究基础上, 用 LA-ICP-MS 和 MC-ICP-MS 测定了锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成, 探讨了寄主二长花岗岩、闪长质微细粒包体的锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成特征。获得寄主二长花岗岩、闪长质微细粒包体的结晶年龄为  $(166.0 \pm 2.0)$  Ma 和  $(169.8 \pm 4.1)$  Ma, 对应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-13.2 \sim -1.9$  与  $-8.3 \sim +6.7$ 。研究表明, 骑田岭复式岩体中的仰天湖岩体是以古老地壳物质熔融为主体的壳源岩浆与幔源岩浆高度混合的产物。

**关键词:** 暗色闪长质微细粒包体; 二长花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 岩浆混合; 南岭

**中图分类号:**      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)04-1081-11

湘南位于扬子陆块与华夏陆块之间的华南加里东造山带, 属于中国岩石圈构造单元中的东亚岩石圈构造域-华南岩石圈块体<sup>[1-2]</sup>, 在其形成演化过程中曾发生多期(如新元古代、古生代和中生代)构造岩浆活动。该区中生代花岗岩由多个大岩体群构成, 而且它们与燕山期大规模成矿密切相关, 尤其是以骑田岭为典型代表的花岗岩体群的中生代大规模成矿而备受地质学家的关注, 已开展较多的年代学、地球化学及其成因研究, 提出该花岗岩体是由岩浆混合作用所形成<sup>[3-11]</sup>。但是, 混合岩浆的起源、演化及源区的特征还不清楚, 岩浆混合的同位素证据亦不充分。由于岩浆高度混合后, 微量元素和 Sr, Nd 同位素较易达到平衡<sup>[12-14]</sup>, 致使岩石的 Sr, Nd 同位素等不同程度地均一化, 而难于保存不同熔体各自的原始特征。但是, 岩浆岩中的锆石由于其极强的稳定性不仅是同位素定年的理想对象, 其 Hf 同位素组

成较少受到后期地质事件的影响, 而高 Hf、低 Lu 含量使其能给出其形成时期 Hf 同位素的准确组成。因此, 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素的研究目前已成为探讨岩浆形成演化和源区示踪的有效手段<sup>[15-16]</sup>。

为此, 本文拟通过对骑田岭仰天湖岩体寄主花岗岩和暗色闪长质微细粒包体(以下简称闪长质包体)进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微区原位(in situ)Hf 同位素分析, 探讨该岩体的岩浆混合成因及岩浆演化过程。

## 1 岩体地质概况

骑田岭花岗岩体位于南岭中段, 属于南岭地区 3 条东西向构造岩浆带北带, 耒阳—临武南北向构造带东缘与茶陵—永兴北东拗陷带的复合部位, 岩体呈近等轴状展布, 出露面积约 520 km<sup>2</sup>。研究区内地层以石炭系—中三叠统浅海台地相碳酸盐岩为

收稿日期: 2010-05-13; 改回日期: 2010-08-09

地调项目: 中国地质构造区划与区域地质调查综合集成(1212010811033)和深部探测项目(Sinoprobe-03-01)资助。

作者简介: 刘勇, 女, 1982 年生, 博士生, 区域地质学专业; E-mail: liuyongfirst@163.com。

主,在一些断陷盆地中还可可见少量白垩系地层<sup>[17-18]</sup>。

岩体侵入的最新地层为三叠系大冶灰岩。区内断裂构造十分发育,以东北—北北东向为主(图1)。近年来的高精度 U—Pb 和 Ar—Ar 同位素测年资料显示,骑田岭花岗岩属于燕山早期<sup>[7-11,21]</sup>。

前人对该复式岩体期次的划分有多种观点,2002—2005 年湖南省地质调查院在地质调查工作中把骑田岭花岗岩岩体划分为 7 个单元:黄家湾单元、仰天湖单元、廖家洞单元、大山里单元、南溪单元、陈家单元和回头湾单元。笔者采集和研究的样品位于仰天湖单元(样品号:寄主花岗岩—HN016-1;闪长质包体:HN016-3)。该单元分布在岩基中部。采样点在永春东约 1 km 的公路边(图1)(与朱金初等<sup>[9]</sup>,李金东<sup>[22]</sup>等测试的样品应该是同一位置),岩性为中粒斑状角闪石黑云母二长花岗岩,发育暗色闪长质微细粒包体。岩石具似斑状结构,块状构造。斑晶有微纹长石、石英、斜长石,基质由微纹长石、斜长石、石英、角闪石、黑云母等组成。

仰天湖二长花岗岩中发育闪长质微细粒包体。这些闪长质包体有 2 种类型(图 2):一种呈浑圆状或次圆状形态,颜色偏暗,与寄主岩呈突变关系(图 2-a);另一种是被寄主岩石同化较强的闪长质包体,呈被打散的片云状,与花岗岩混溶,界线模糊不清,颜色较前一种闪长质包体偏浅(图 2-b);部分闪长质包体之中有岩枝状二长花岗岩穿插。这些闪长质包体大小一般在几厘米至几十厘米不等,最大的可达 1 m 以上。

该岩体另一突出特征是岩体发育钾长石斑晶,斑晶粒径多为 1~2 cm,个别为 2~3 cm,晶体形态以自形为主,部分略呈卵圆形。部分闪长质包体中还见到与寄主花岗岩相似的钾长石斑晶,常常熔蚀成浑圆状,个别闪长质包体边部发育的钾长石斑晶,横跨闪长质包体与寄主岩石的界线(图 2-c)。暗色闪长质微细粒包体主要由斜长石、钾长石、角闪石、黑云母等组成,偶尔出现具环斑结构的钾长石斑晶和石英晶体,它们或产于闪长质包体之中或切穿闪长

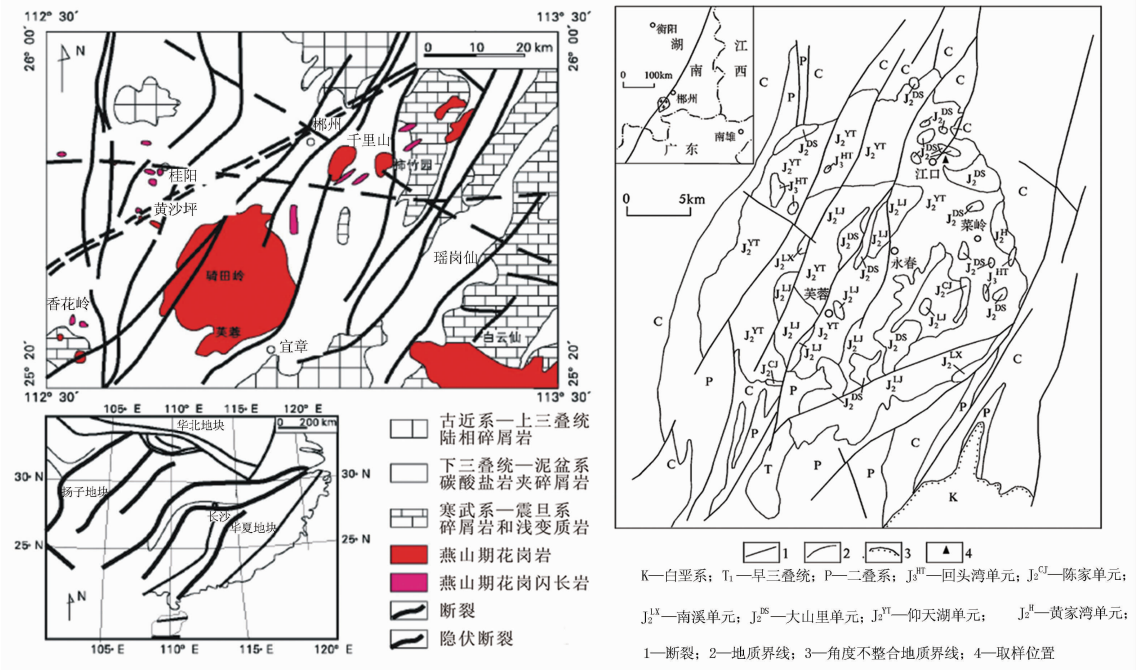


图 1 骑田岭岩体地质简图(据毕献武等 2008<sup>[9]</sup>及柏道远等 2005<sup>[20]</sup>改编)

Fig.1 Geological sketch map of Qitianling

①湖南省地质调查研究院.1:25 万郴州市幅(G49 C 003004)区域地质调查报告,2005.



图 2 仰天湖单元二长花岗岩中暗色闪长质微细粒包体的照片

A—呈浑圆状或次圆状的闪长质包体,与寄主岩石为突变关系;B—呈被打散的片云状的闪长质包体,与寄主岩石界线模糊不清;C—闪长质包体和寄主岩中均含有环斑结构的钾长石斑晶

Fig.2 Field photographs of Yangtianhu microgranular dioritic enclaves in adamellite

A—Rounded or subrounded dioritic enclaves, assuming abrupt contact with the host rock;B—Dioritic enclaves in the scattered flaky from, showing indistinct boundary with the host rock;C—Rapakivi phenocrysts in both dioritic enclaves and host rock

质包体和寄主二长花岗岩的接触带,表明为捕获寄主岩体中的钾长石和石英矿物,反映了二元岩浆混合成因特征。此外,寄主岩石和暗色闪长质微细粒包体中还存在多种岩浆混合的证据<sup>[3-11]</sup>。

## 2 样品及分析方法

用于定年的锆石样品采自骑田岭枫树下公路大转弯处仰天湖单元,寄主岩石的岩性为中粒斑状角闪石黑云母二长花岗岩(样品号:HN016-1),包体的岩性为暗色闪长质微细粒包体(样品号:HN016-3)。锆石分选在湖南省地质调查研究院的实验室完成。用常规方法将样品粉碎后,经淘选和电磁法初步分离并在双目镜下选出无色透明晶形完好、无明显裂痕少有包裹体的锆石,将选出的锆石粘贴于环氧树脂表面,并打磨至露出锆石表面,然后抛光待测。

阴极发光成像(CL)是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石定年分析所用的 ICP-MS 为 Agilent 公司生产的 Agilent7500a。锆石 U-Pb 定年及微量元素分析在同一个系统内同时完成,激光束斑直径为  $44\ \mu\text{m}$ 。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用美国国家标准研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM 610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一个点的跳峰方式,每完成 5 个点的测定,加测标样一次,观察仪器的状态以保证测试的精度。锆石年龄采用 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM 610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标。测试结果应用 GLITTER(ver 4.2 最新版,Mac-quaie University)软件计算得出,并按

照 Andersen<sup>[23]</sup>的方法对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver 3.0)<sup>[24]</sup>完成。大多数剥蚀点分析的相对标准偏差为 5%~15%。

锆石 Hf 同位素分析在同一实验室的 Nu Plasma HRMC-ICP-MS 与 GeoLas 2005 受激准分子 ArF 的 193 nm 激光剥蚀系统上进行。分析中使用的激光束斑直径为  $44\ \mu\text{m}$ ,激光频率为 10 Hz,脉冲能量为 80 mJ,剥蚀时间为 50 s,用锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作外标。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石的阴极发光图像(图 3)显示:寄主岩石及其闪长质包体中的锆石颗粒较大,多呈长柱状,大部分锆石颗粒以灰白色、淡棕色为主。大多数锆石晶形比较完整,裂纹不发育,呈现典型的岩浆成因震荡环带。部分锆石的中部具有不分带、浑圆状的核心。其中,寄主岩二长花岗岩中锆石自形程度较好,锆石形态为简单的四方柱或四方双锥,柱面和锥面平直且发育完善。闪长质包体中锆石的晶形较差,且成分环带不清晰,略具熔蚀现象,可能与岩浆混合作用有关。另外,寄主岩中个别锆石有残余继承锆石核颗粒的存在。

寄主岩石及其闪长质包体中的锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果见表 1。锆石的 Th 和 U 含量较高, Th/U 比值大于 0.01(0.14~0.83),显示典型岩浆成因锆石<sup>[25-27]</sup>的特点。

寄主岩 HN016-1 测定了 21 颗锆石,获得 31 个点的年龄数据(图 3)。其中有 24 个测点 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U





图3 寄主二长花岗岩及其闪长质包体中锆石的 CL 图像 C

Fig.3 Cathodoluminescence images of representative zircons from host rocks and dioritic enclaves in Yangtianhu

年龄集中分布于 156~175 Ma, 均落在谐和线上, 其加权平均年龄为  $(166.0 \pm 2.0) \text{Ma}$  ( $2\sigma, \text{MSWD} = 5.6, 95\% \text{conf.}$ ), 代表岩浆的结晶时间。该样品中点 9 为  $(1098 \pm 16) \text{Ma}$ , 点 10 为  $(1089 \pm 44) \text{Ma}$ , 该两粒锆石所选位置都是锆石的核心部位, 其锆石的外围有白色的反应边, 表明锆石的核部可能是新元古代结晶的老锆石, 可能系闪长质包体代表的深部基性岩浆上升过程捕获的新元古代早期陆壳物质源区残留锆石, 暗示源区有老基底的存在。点 8 的年龄为  $(185 \pm 2) \text{Ma}$ , 从透、反射光图像来看, 打点的位置边缘有个小黑点, 可能为包体, 因此, 这个点的年龄不准确。点 15 的年龄为  $(153 \pm 2) \text{Ma}$ , 点 19 的年龄为  $(179 \pm 2) \text{Ma}$ , 点 27 的年龄为  $(148 \pm 2) \text{Ma}$ , 点 32 的年龄为  $(152 \pm 2) \text{Ma}$ , 这几个点的 U、Th 含量相对较高, 锆石阴极发光图像相对偏黑。上述几个数据没有参与最终的加权平均年龄计算。

闪长质包体 HN016-3 共测试了 22 个点。点 12 为  $(191 \pm 5) \text{Ma}$ , 阴极发光图像显示该点锆石的外围有一层白色的反应边, 表明锆石可能受后期的岩浆热液作用, 这个年龄数据没有参与最终的加权平均年龄计算。其他 21 个点的年龄集中分布于 153~187 Ma, 均落在谐和线上,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $(169.8 \pm 4.1) \text{Ma}$  ( $2\sigma, \text{MSWD} = 4.7, 95\% \text{conf.}$ ), 代表岩浆结晶时间。

需要说明的是, 由于实验仪器精度的提高, 实验误差减小, 误差椭圆变小, 数据显得相对离散从而导致 MSWD 偏大, 但并不影响加权平均年龄。

### 3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

寄主二长花岗岩和暗色闪长质微细粒包体的锆

石 Hf 同位素分析结果见表 2。除极个别分析点外, 几乎所有分析点的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均低于 0.002, 表明绝大多数锆石形成后的放射性成因 Hf 积累十分有限, 因而测定的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值应能较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征。寄主二长花岗岩锆石的  $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值变化范围较大, 分别为 0.010561~0.071075 和 0.0004~0.002707。初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.281844~0.282617, 由对应测点年龄计算得到的 Hf 同位素初始比值 ( $\text{Hfi}$ ) 为 0.282456~0.283144, 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -13.2~-1.9 (图 5), 模式年龄为 895~1329 Ma (点 9, 点 10 的模式年龄分别为 1934 Ma 和 1894 Ma), 平均地壳模式年龄为 1332~2042 Ma (点 9, 点 10 的平均地壳模式年龄分别为 2481 Ma 和 2421 Ma) (表 2)。

闪长质微细粒包体锆石的  $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值变化范围也较大, 分别为 0.01069~0.082026 和 0.000410~0.002842 (表 2)。  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始值 ( $\text{Hfi}$ ) 为 0.283113~0.283140, 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -8.3~+6.7。模式年龄为 572~1155 Ma, 平均地壳模式年龄为 791~1746 Ma (表 2)。

## 4 讨论

骑田岭仰天湖单位中寄主二长花岗岩样品的锆石结晶年龄为  $(166.0 \pm 2.0) \text{Ma}$ , 这些年龄在误差范围内, 与前人采用不同方法得到的结果基本一致<sup>[10,11,20]</sup>, 应代表二长花岗岩岩体开始冷凝固晶的年龄。岩体中闪长质包体的年龄为  $(169.8 \pm 4.1) \text{Ma}$ 。这一年代学结果, 表明骑田岭花岗岩岩体主体与暗色微细粒包体的年代相差不大, 几乎是一致的。

表 1 仰天湖寄主二长花岗岩和暗色闪长质微细粒包体锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircons U-Th-Pb data for host rocks and dioritic enclaves from Yangtianhu, Qitianling

样品编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	误差 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	误差 1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	年龄/Ma	误差 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄/Ma	误差 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	年龄/Ma	误差 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Th/U		
HN016-1-01	0.04593	0.00223	0.15921	0.00764	0.02514	0.00038	0.00815	0.00024	73	150	7	160	2	164	5	494.23	23.96	3.17	3.45	122.48	255.52	0.48	
HN016-1-03	0.05055	0.00112	0.17878	0.00401	0.02565	0.00032	0.00824	0.00014	220	167	3	163	2	166	3	347.62	62.69	4.21	4.58	313.18	723.82	0.43	
HN016-1-04	0.05099	0.00141	0.18391	0.00508	0.02615	0.00034	0.00793	0.00016	240	171	4	166	2	160	3	360.22	29.1	2.02	2.16	147.57	325.26	0.45	
HN016-1-05	0.05403	0.00165	0.18355	0.00556	0.02464	0.00032	0.00809	0.00015	178	132	8	156	2	156	2	313.28	23.76	3.21	4.8	209.15	257	0.81	
HN016-1-06	0.05068	0.00121	0.18573	0.00447	0.02657	0.00033	0.00864	0.00016	226	173	4	169	2	174	3	314.26	46.06	3.45	3.83	209.7	474.23	0.44	
HN016-1-07	0.05463	0.00103	0.20088	0.00448	0.02666	0.00033	0.0089	0.00015	162	113	6	168	2	169	2	263.72	47.63	4.13	6.77	336.06	473.24	0.71	
HN016-1-08	0.05462	0.00129	0.22031	0.00522	0.02925	0.00037	0.01004	0.00018	160	99	8	185	2	185	2	292.71	60.76	5.25	6.27	264.15	546.36	0.48	
HN016-1-09	0.07612	0.00122	0.19118	0.03195	0.18283	0.00217	0.05193	0.00083	1098	16	1088	11	1082	12	1023	16	316.96	475.62	55.88	11.24	92.71	684.51	0.14
HN016-1-10	0.07636	0.00124	1.84745	0.03103	0.17544	0.00209	0.05481	0.00088	1089	44	1057	12	1041	11	1039	11	297.78	428.18	51.43	11.92	89.22	625.94	0.14
HN016-1-11	0.0502	0.00104	0.17672	0.00371	0.02547	0.00031	0.00829	0.00017	210	27	165	3	162	2	167	3	253.85	138.98	13.08	4.83	174.78	1201.73	0.15
HN016-1-12	0.05624	0.00108	0.20235	0.00395	0.02609	0.00032	0.00983	0.00017	189	76	166	4	165	2	164	2	257.54	162.82	16.75	11.46	368.64	1397.09	0.26
HN016-1-13	0.04984	0.00127	0.18568	0.00472	0.02701	0.00034	0.00843	0.00016	188	36	173	4	172	2	170	3	255.13	44.52	4.18	4.44	160.28	373.02	0.43
HN016-1-14	0.04824	0.00157	0.17802	0.00574	0.02676	0.00036	0.00847	0.00018	111	51	166	5	170	2	170	4	247.22	25.5	2.35	3.35	116.28	218.22	0.53
HN016-1-15	0.08161	0.00152	0.2825	0.00536	0.0251	0.00031	0.01443	0.00024	185	107	155	6	153	2	153	2	251.1	145.99	23.68	20.29	389.18	1264.08	0.31
HN016-1-16	0.04789	0.00129	0.18159	0.00489	0.0275	0.00035	0.00857	0.00017	94	40	169	4	175	2	172	3	267.34	45.07	4.83	5.75	154.95	343.59	0.45
HN016-1-17	0.05027	0.00125	0.18163	0.00453	0.0262	0.00033	0.00855	0.00017	207	35	169	4	167	2	172	3	246.32	60.74	7.07	7.65	195.55	470.56	0.42
HN016-1-18	0.06149	0.00189	0.21425	0.00651	0.02527	0.00034	0.0098	0.00022	159	119	158	7	158	2	158	2	197.31	53.8	13.77	14.71	156.34	371.66	0.42
HN016-1-19	0.05526	0.00124	0.21615	0.00489	0.02836	0.00035	0.01034	0.0002	159	86	177	6	179	2	179	2	246.81	93.48	12.87	10.67	203.48	650.06	0.31
HN016-1-20	0.05149	0.00169	0.18427	0.00598	0.02595	0.00035	0.00921	0.00021	263	50	172	5	165	2	185	4	201.55	25.35	3.39	4.04	81.78	189.71	0.43
HN016-1-21	0.04965	0.00205	0.18095	0.00737	0.02643	0.00039	0.00856	0.00024	179	67	169	6	168	2	172	5	170.58	24.2	6.1	6.89	72.14	160.65	0.45
HN016-1-22	0.05034	0.0013	0.19114	0.00494	0.02754	0.00035	0.00978	0.00021	211	37	178	4	175	2	197	4	157.54	57.32	10.74	10.54	126.14	362.8	0.35
HN016-1-23	0.05179	0.00174	0.18697	0.0062	0.02618	0.00036	0.00766	0.0002	276	51	174	5	167	2	154	4	151.4	46.55	9.89	9.37	119.54	305.14	0.39
HN016-1-24	0.04769	0.00121	0.17319	0.0044	0.02634	0.00034	0.0084	0.00018	84	36	162	4	168	2	169	4	209.57	74.04	15.18	15.53	182.3	474.91	0.38
HN016-1-25	0.05137	0.00194	0.17895	0.00665	0.02526	0.00036	0.00806	0.00018	257	59	167	6	161	2	162	4	181.51	29.36	8.04	15.63	158.24	189.97	0.83
HN016-1-26	0.05177	0.00149	0.18254	0.00522	0.02557	0.00034	0.00844	0.00019	174	101	163	6	162	2	162	2	221.03	58.29	20.63	19.84	138.91	356.96	0.39
HN016-1-27	0.04963	0.00156	0.15891	0.00494	0.02322	0.00031	0.00785	0.00022	178	48	150	4	148	2	158	4	206.28	53.06	19.61	23.17	147.13	326.83	0.45
HN016-1-28	0.05523	0.00149	0.20243	0.00542	0.02658	0.00035	0.00929	0.0002	167	105	168	7	168	2	168	2	229.65	63.69	29.97	31.59	157.81	368.41	0.43
HN016-1-29	0.05204	0.00149	0.18872	0.00535	0.0263	0.00035	0.00891	0.0002	287	41	176	5	167	2	179	4	231.07	55.33	29.23	30.54	132.39	320.76	0.41

(续表 1)

样品编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 $1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	误差 $1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	误差 $1\sigma$	年龄/Ma	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	误差 $1\sigma$	年龄/Ma	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	误差 $1\sigma$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{238}\text{Th}$	Th/U
HN016-1-31	0.04753	0.00116	0.17218	0.00419	0.02627	0.00034	0.00806	0.00017	76	34	161	4	167	2	162	3	535.01	342.8	297.3	315.99	861.03	1898.79	0.45			
HN016-1-32	0.05079	0.00118	0.16737	0.00389	0.0239	0.0003	0.00592	0.00013	231	31	157	3	152	2	119	3	280.41	728.03	1143.5	524.17	1726.27	4660.28	0.37			
HN016-1-01	0.05194	0.00354	0.20359	0.01277	0.0284	0.00075	0.00892	0.00021	283	157	188	11	181	5	180	4	12.31	17.62	1.733	2.789	71.6	233.63	0.3			
HN016-3-02	0.05312	0.00186	0.20856	0.00782	0.02846	0.00073	0.00899	0.00033	334	42	192	7	181	5	181	7	9.36	27.09	1.839	3.46	120.46	376.68	0.2			
HN016-3-03	0.04776	0.00172	0.15909	0.00609	0.02414	0.00062	0.00756	0.00027	87	46	150	5	154	4	152	5	8.64	61.01	3.76	10.55	430.91	993.55	43			
HN016-3-04	0.04988	0.00192	0.20206	0.00818	0.02937	0.00075	0.00924	0.00035	189	49	187	7	187	5	186	7	9.41	19.82	1.684	2.883	98.66	262.65	0.38			
HN016-3-05	0.04774	0.00164	0.16631	0.00611	0.02525	0.00064	0.00896	0.00032	86	43	156	5	161	4	180	6	7.6	49.5	3.06	7.16	248.81	772.01	0.32			
HN016-3-06	0.05189	0.00203	0.19742	0.00807	0.02758	0.0007	0.00877	0.00033	281	50	183	7	175	4	176	7	7.52	30.31	2.715	4.99	128.18	397.38	0.32			
HN016-3-07	0.05297	0.00204	0.20687	0.0083	0.02831	0.00072	0.00934	0.00035	328	48	191	7	180	5	188	7	5.97	15.92	1.073	1.466	47.84	223.75	0.21			
HN016-3-08	0.05212	0.00335	0.20163	0.01188	0.02806	0.00072	0.00881	0.0002	291	149	187	10	178	4	177	4	7.62	33.33	2.422	4.87	148.42	457.15	0.32			
HN016-3-09	0.04946	0.00192	0.18546	0.00748	0.02718	0.00069	0.00874	0.00033	170	49	173	6	173	6	176	7	6.42	25.84	1.647	3.31	111.31	364.92	0.31			
HN016-3-10	0.05261	0.00207	0.20068	0.00815	0.02765	0.0007	0.00888	0.00034	312	49	186	7	176	4	179	7	5.57	18.72	1.323	2	64.49	261.3	0.25			
HN016-3-12	0.05424	0.00269	0.22515	0.01118	0.0301	0.00078	0.00978	0.00042	381	66	206	9	191	5	197	8	5.46	17.51	1.499	2.489	67.61	224.58	0.3			
HN016-3-14	0.04788	0.00204	0.17827	0.00763	0.027	0.00068	0.0081	0.00032	93	55	167	7	172	4	163	6	4.42	20.1	1.247	2.424	83	280.05	0.3			
HN016-3-15	0.04812	0.00209	0.18576	0.0081	0.028	0.00071	0.0084	0.00034	105	57	173	7	178	4	169	7	5.08	20.69	1.301	2.477	83.4	282.86	0.29			
HN016-3-16	0.05355	0.00241	0.19695	0.00877	0.02667	0.00067	0.0084	0.00035	352	57	183	7	170	4	169	7	4.88	31.18	2.603	4.8	139.01	424.49	0.33			
HN016-3-19	0.05539	0.00262	0.20664	0.00958	0.02706	0.00069	0.0084	0.00036	428	59	191	8	172	4	169	7	4.71	15.22	1.084	1.621	50.98	204.93	0.25			
HN016-3-21	0.04948	0.00264	0.18055	0.00925	0.02647	0.00068	0.00777	0.00037	171	72	169	8	168	4	156	7	4.74	11.53	0.736	0.82	27.34	157.71	0.17			
HN016-3-23	0.0562	0.003	0.20761	0.01055	0.0268	0.00069	0.00811	0.00038	460	68	192	9	170	4	163	8	6.04	25.81	1.965	3.49	108.95	345.25	0.32			
HN016-3-24	0.05081	0.00288	0.17818	0.0096	0.02544	0.00066	0.0077	0.00038	232	77	166	8	162	4	155	8	4.7	11.39	0.728	0.793	26.57	160.75	0.17			
HN016-3-25	0.04919	0.00267	0.18211	0.00933	0.02686	0.00069	0.00797	0.00038	157	72	170	8	171	4	160	8	4.24	19.58	1.252	1.873	60.21	265.57	0.23			
HN016-3-27	0.06448	0.00362	0.23368	0.0122	0.0263	0.00068	0.01	0.00049	541	162	193	12	166	4	163	4	4.96	28.67	2.316	3.3	87.16	388.57	0.22			
HN016-3-28	0.04885	0.00301	0.16588	0.00956	0.02464	0.00065	0.00731	0.00037	141	84	156	8	157	4	147	7	9.49	20.67	6.61	7.16	43.85	207.29	0.21			
HN016-3-30	0.04887	0.00279	0.1622	0.00851	0.02408	0.00062	0.00744	0.00037	142	75	153	7	153	4	150	7	4.1	207.51	13.02	7.97	267.02	3054.8	0.09			

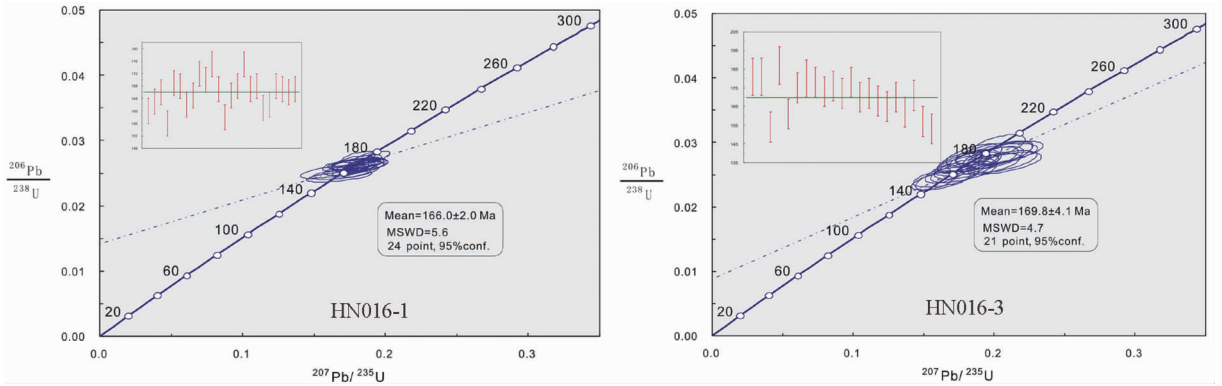


图 4 寄主二长花岗岩和暗色闪长质微细粒包体锆石 U-Pb 谐和图

Fig.4 Concordance diagrams for zircons from host rocks and dioritic enclaves in Yangtianhu pluton

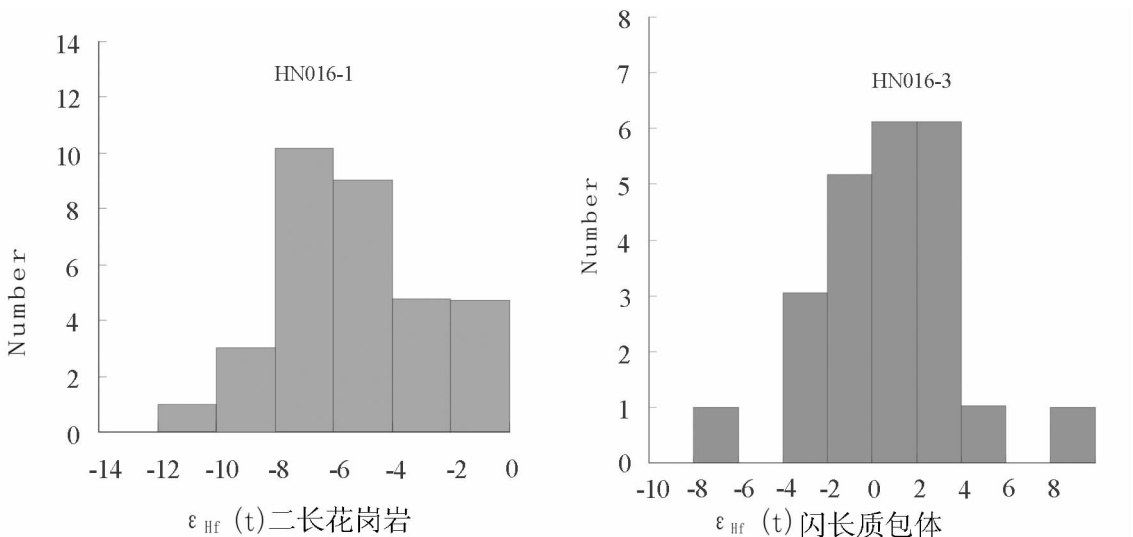


图 5 寄主二长花岗岩和暗色闪长质微细粒包体  $\epsilon_{Hf}(t)$  频率直方图

Fig.5 Histograms of  $\epsilon_{Hf}(t)$  values of zircons with different forming ages in host rocks and dioritic enclaves in Yangtianhu pluton

暗色包体是窥探壳幔相互作用的窗口,有助于了解寄主岩浆起源与成因演化等基础地质问题<sup>[28-31]</sup>。Hutton 早在 1795 年就注意到苏格兰花岗岩中的暗色包体(enclaves),而 Didier 和 Didier and Barbarin<sup>[28,32]</sup>的两部专著是关于花岗岩中包体研究最系统的文献,将花岗岩中的包体分成 3 种类型:捕掳体、残留体、镁铁质岩浆包体。当来自地幔的基性岩浆注入到已部分结晶的长英质岩浆时,如果长英质岩浆的粘度还比较小,两种共存岩浆的粘度差已相当大,彼此之间已到了不能发生完全的化学混合形成均一岩浆,只能发生机械混合的程度<sup>[33]</sup>,这时未完全均匀混

合的镁铁质基性岩浆就在长英质岩浆中淬冷、结晶形成囊状暗色包体,对流作用或其他驱动力使包体分散到整个寄主岩体中。由暗色包体的形态可知骑田岭花岗闪长岩中的暗色包体是幔源基性岩浆与壳源长英质岩浆机械混合的产物。年代学结果进一步表明骑田岭岩体是岩浆混合成因,因为基性、酸性岩浆发生混合作用才可能导致包体与岩浆同期生成<sup>[34-35]</sup>。

从岩石组成来看,暗色包体与寄主二长花岗岩截然不同,前者富有镁铁质矿物角闪石和黑云母,斜长石的长宽比值较大,而且相对遭受蚀变比较强烈,石英含量为 2%~4%,这与后者以长英质矿物为主的

表 2 仰天湖岩体寄主二长花岗岩及其暗色闪长质微细粒包体锆石 Lu-Hf 同位素数据  
Table 2 Hf isotopic data of zircons from host rocks and dioritic enclaves in Yangtianhu pluton

Sample No.	Age /Ma	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2s	ε <sub>Hf</sub> (0)	ε <sub>Hf</sub> (t)	T <sub>DM</sub>	T <sub>DM</sub> <sup>C</sup>	f <sub>Lu/Hf</sub>	2s	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf(DM)
HN016-1-01	160	0.010561	0.0004	0.282611	0.000042	-5.7	-2.2	895	1351	-0.99	1.5	0.282609	0.283135
HN016-1-03	163	0.027834	0.000991	0.28262	0.000031	-5.4	-1.9	895	1332	-0.97	1.1	0.282617	0.283133
HN016-1-04	166	0.016332	0.000603	0.282462	0.000028	-11	-7.4	1107	1682	-0.98	1	0.28246	0.283131
HN016-1-05	156	0.019285	0.000686	0.282384	0.000035	-13.7	-10.4	1217	1861	-0.98	1.2	0.282382	0.283138
HN016-1-06	169	0.016853	0.000631	0.282503	0.000028	-9.5	-5.9	1050	1588	-0.98	1	0.282501	0.283129
HN016-1-07	168	0.026116	0.000924	0.282423	0.000036	-12.3	-8.8	1170	1769	-0.97	1.3	0.28242	0.283129
HN016-1-08	185	0.016883	0.000623	0.282447	0.000033	-11.5	-7.5	1128	1705	-0.98	1.2	0.282444	0.283117
HN016-1-09	1098	0.008984	0.000273	0.28185	0.000023	-32.6	-8.5	1934	2481	-0.99	0.8	0.281844	0.282456
HN016-1-10	1089	0.008881	0.000272	0.281879	0.000024	-31.6	-7.7	1894	2421	-0.99	0.8	0.281874	0.282462
HN016-1-11	162	0.030475	0.001123	0.282426	0.000021	-12.2	-8.8	1173	1768	-0.97	0.8	0.282422	0.283134
HN016-1-12	165	0.02167	0.000804	0.282601	0.000026	-6	-2.5	918	1373	-0.98	0.9	0.282598	0.283132
HN016-1-13	172	0.015957	0.000587	0.282579	0.000027	-6.8	-3.1	943	1417	-0.98	1	0.282577	0.283127
HN016-1-14	170	0.022143	0.000824	0.282419	0.000032	-12.5	-8.9	1173	1777	-0.98	1.1	0.282416	0.283128
HN016-1-15	153	0.022554	0.000846	0.282391	0.000022	-13.5	-10.2	1213	1848	-0.97	0.8	0.282389	0.28314
HN016-1-16	175	0.01526	0.000561	0.282387	0.000022	-13.6	-9.8	1209	1842	-0.98	0.8	0.282386	0.283124
HN016-1-17	167	0.016401	0.000601	0.28249	0.000031	-10	-6.4	1067	1618	-0.98	1.1	0.282488	0.28313
HN016-1-18	158	0.014634	0.000542	0.28248	0.000032	-10.3	-6.9	1080	1646	-0.98	1.1	0.282478	0.283137
HN016-1-19	179	0.014824	0.000566	0.282484	0.000026	-10.2	-6.3	1075	1625	-0.98	0.9	0.282482	0.283122
HN016-1-20	165	0.014597	0.000528	0.282299	0.000026	-16.7	-13.2	1329	2042	-0.98	0.9	0.282298	0.283132
HN016-1-21	168	0.016564	0.000603	0.282449	0.000027	-11.4	-7.8	1125	1710	-0.98	1	0.282447	0.283129
HN016-1-22	175	0.018789	0.000658	0.28244	0.000023	-11.7	-8	1138	1725	-0.98	0.8	0.282438	0.283124
HN016-1-23	167	0.020916	0.000742	0.282491	0.000022	-9.9	-6.3	1070	1617	-0.98	0.8	0.282489	0.28313
HN016-1-24	168	0.015622	0.000579	0.282507	0.000024	-9.4	-5.8	1043	1580	-0.98	0.8	0.282505	0.283129
HN016-1-25	161	0.047311	0.001662	0.282542	0.000027	-8.1	-4.8	1023	1513	-0.95	1	0.282537	0.283135
HN016-1-26	162	0.014572	0.000542	0.282454	0.00002	-11.2	-7.8	1116	1701	-0.98	0.7	0.282452	0.283134
HN016-1-27	148	0.042435	0.001494	0.282483	0.000038	-10.2	-7.1	1103	1651	-0.95	1.3	0.282479	0.283144
HN016-1-28	168	0.016301	0.000598	0.282554	0.000024	-7.7	-4.1	978	1475	-0.98	0.8	0.282552	0.283129
HN016-1-29	167	0.014983	0.000553	0.282534	0.000026	-8.4	-4.8	1005	1519	-0.98	0.9	0.282533	0.28313
HN016-1-30	166	0.015933	0.000586	0.282494	0.000026	-9.8	-6.3	1062	1611	-0.98	0.9	0.282492	0.283131
HN016-1-31	167	0.038232	0.001374	0.282519	0.00002	-9	-5.4	1048	1559	-0.96	0.7	0.282515	0.28313
HN016-1-32	152	0.071075	0.002707	0.282425	0.000023	-12.3	-9.2	1226	1786	-0.92	0.8	0.282417	0.283141
HN016-1-32	152	0.056636	0.002093	0.282544	0.00002	-8.1	-4.9	1032	1516	-0.94	0.7	0.282538	0.283141
HN016-3-01	181	0.025123	0.000921	0.282631	0.000035	-5	-1.1	878	1297	-0.97	1.2	0.282628	0.28312
HN016-3-02	181	0.031868	0.001175	0.282724	0.000025	-1.7	2.1	753	1090	-0.96	0.9	0.28272	0.28312
HN016-3-03	154	0.01069	0.00041	0.282718	0.000048	-1.9	1.4	745	1113	-0.99	1.7	0.282717	0.28314
HN016-3-04	187	0.02737	0.001019	0.282643	0.000028	-4.6	-0.6	863	1267	-0.97	1	0.28264	0.283116
HN016-3-05	161	0.082026	0.002842	0.282695	0.00003	-2.7	0.5	831	1179	-0.91	1.1	0.282686	0.283135
HN016-3-06	175	0.061266	0.002122	0.282861	0.000027	3.1	6.7	572	791	-0.94	1	0.282854	0.283124
HN016-3-07	180	0.013878	0.000518	0.28262	0.00002	-5.4	-1.5	885	1320	-0.98	0.7	0.282618	0.283121
HN016-3-08	178	0.041521	0.001512	0.282671	0.000035	-3.6	0.2	835	1213	-0.95	1.3	0.282666	0.283122
HN016-3-09	173	0.021319	0.000809	0.282432	0.00003	-12	-8.3	1155	1746	-0.98	1	0.282429	0.283126
HN016-3-10	176	0.016856	0.000635	0.282637	0.000023	-4.8	-1	864	1285	-0.98	0.8	0.282635	0.283124
HN016-3-12	191	0.026279	0.000956	0.282558	0.000028	-7.6	-3.5	982	1456	-0.97	1	0.282554	0.283113
HN016-3-14	172	0.040003	0.001454	0.282771	0.00003	0	3.6	690	991	-0.96	1.1	0.282767	0.283127
HN016-3-15	178	0.03381	0.00124	0.282685	0.000028	-3.1	0.7	809	1180	-0.96	1	0.282681	0.283122
HN016-3-16	170	0.051643	0.001857	0.282737	0.000029	-1.2	2.3	748	1073	-0.94	1	0.282731	0.283128
HN016-3-19	172	0.013285	0.00051	0.282699	0.000024	-2.6	1.1	774	1146	-0.98	0.8	0.282698	0.283127
HN016-3-21	168	0.013746	0.000539	0.282568	0.000019	-7.2	-3.6	957	1443	-0.98	0.7	0.282566	0.283129
HN016-3-22	165	0.012016	0.00049	0.282537	0.000019	-8.3	-4.7	999	1513	-0.99	0.7	0.282536	0.283132
HN016-3-23	170	0.023007	0.000866	0.282581	0.000025	-6.7	-3.1	947	1414	-0.97	0.9	0.282579	0.283128
HN016-3-24	162	0.010775	0.000406	0.282607	0.000024	-5.8	-2.3	900	1358	-0.99	0.9	0.282606	0.283134
HN016-3-25	171	0.026239	0.000974	0.282607	0.000025	-5.8	-2.2	913	1356	-0.97	0.9	0.282604	0.283127
HN016-3-25	171	0.019271	0.000731	0.282737	0.000026	-1.2	2.4	725	1063	-0.98	0.9	0.282735	0.283127
HN016-3-28	157	0.01228	0.000468	0.282619	0.000025	-5.4	-2	885	1336	-0.99	0.9	0.282617	0.283137
HN016-3-30	153	0.040044	0.001651	0.282618	0.000018	-5.4	-2.2	914	1346	-0.95	0.6	0.282614	0.28314

注: ε<sub>Hf</sub>(0) = ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>s</sub> / (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>CHUR,0</sub> - 1) × 10000;

ε<sub>Hf</sub>(t) = ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>s</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>s</sub> × (e<sup>-t</sup> - 1)) / ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>CHUR,0</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>CHUR,0</sub> × (e<sup>-t</sup> - 1)) - 1) × 10000;

T<sub>DM1</sub> = 1 / (1 + ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>s</sub> - (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>DM</sub>) / ((<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>s</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>DM</sub>));

T<sub>DME</sub> = T<sub>DM1</sub> - (T<sub>DM1</sub> - t) × ((f<sub>cc</sub> - f) / (f<sub>cc</sub> - f<sub>DM</sub>)) × (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>DM</sub> = 0.28325; f<sub>cc</sub>, f<sub>s</sub>, f<sub>DM</sub> 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 f<sub>Lu/Hf</sub>; t 为样品形成时间 = 1.867 × 10<sup>-11</sup> year<sup>-1</sup>。



岩石, 构成了鲜明的对比。

在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-T$  图解中(图 6), 寄主二长花岗岩锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-13.2 \sim -1.9$ , 显示该岩石可能主要来源于地壳岩石的部分熔融, 而暗色包体的 Hf 同位素组成变化较大,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-8.3 \sim +6.7$ , 显示多来源的特征。其模式年龄也比寄主岩小, 说明锆石不是结晶于单一岩浆, 而是亏损地幔 ( $\varepsilon_{\text{Hf}} > 0$ ) 和地壳混合的产物。

事实上, 寄主二长花岗岩和闪长质包体年龄有着较好的时代对应关系, 这本身就表明基性岩浆演化过程至少出现过岩浆温度曾接近酸性锆石矿物的结晶温度。可能是基性岩浆熔融冷凝结晶过程的记录, 也可能是基性岩浆进入酸性岩浆房经热扰动二端元岩浆混合后岩浆冷凝事件的记录。

寄主二长花岗岩和闪长质包体的锆石 Hf 同位素有明显差异, 但其锆石 Hf 同位素组成有部分重叠, 似乎是锆石在岩浆混合(熔体中 Hf 同位素达到平衡)之后结晶所致, 闪长质包体中部分锆石呈现不同的 Hf 同位素组成则反映它们可能是从岩浆混合前的基性岩浆中结晶出来的, 从而保存了原始岩浆的部分特征。不同的 Hf 同位素组成表明该岩浆混合作用的两个端元具有完全不同的 Hf 同位素组成, 其中长英质端元锆石的 Hf 同位素可能反映为古老地壳源区, 而镁铁质端元可能来源于软流圈或者弱亏损的岩石圈地幔。这种同一岩体不同锆石出现  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  偏正或偏负的变化显然不是单一源区岩浆作用所能形成的, 至少存在两种具有明显不同  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的岩浆参与了该岩体的形成过程。闪长质包体中锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  有向正值演化的趋势, 表明幔源物质参与了成岩作用<sup>[36-37]</sup>。

研究区在中生代岩石圈发生了大规模的减薄或拆沉和壳-幔置换作用, 软流圈的上涌可引发地壳物质局部熔融形成长英质岩浆房, 当深部热的铁镁质岩浆注入已经侵位的长英质岩浆房后, 由于温度和粘度等的不同, 它们之间未达到热平衡状态, 只是在两者边界发生能量交换, 铁镁质岩浆边部冷凝, 长英质岩浆则被加热形成温度梯度, 从而促使岩浆房内的长英质岩浆发生对流, 铁镁质岩浆也发生伸展及对流搅动, 其内部基性组分发生分离结晶并形成闪长质包体, 边界处则受到长英质岩浆的混染。对流促进了这种物理和化学过程的重复循环, 经过演化的铁镁质岩浆与长英质岩浆的温度差别越来越小,

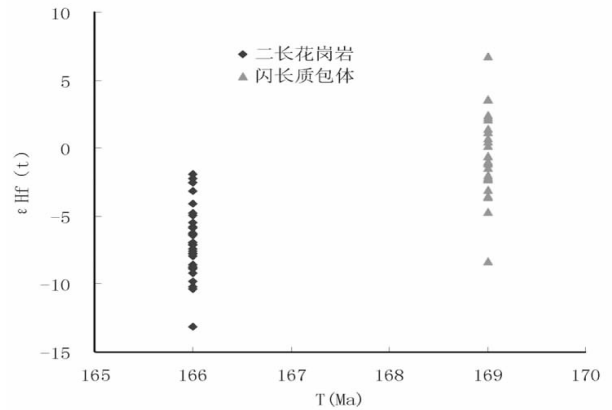


图 6 寄主花岗岩及其暗色包体的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-T(\text{Ma})$  图解  
Fig.6  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  versus  $T(\text{Ma})$  isotopic diagram of Qitianling host rocks and dioritic enclaves

最终形成含暗色闪长质微细粒包体的均一岩浆, 这种岩浆结晶后形成寄主二长花岗岩。

**致谢:** 野外工作期间, 得到湖南省地质调查研究院刘耀荣院长等的大力协助; 样品测试和数据处理过程中西北大学大陆动力学国家重点实验室袁洪林教授、戴梦宁老师、柳小明老师和相关工作人员给予了有益的指导和帮助, 在此深表感谢! 同时感谢匿名审稿人对论文提出的建设性修改意见。

谨以此文献给导师李廷栋院士 80 华诞, 衷心感谢先生长期一贯的指导和帮助!

#### 参考文献 (References):

- [1] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 2006, 33(4):700-710.  
Li Tingdong. Lithospheric units of China [J]. Geology in China, 2006, 33(4):700-710 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李廷栋. 中国岩石圈三维结构专项研究主要进展和成果 [J]. 中国地质, 2006, 33(4):689-699.  
Li Tingdong. Main advances and achievements in the special - subject study of the 3D lithospheric structure of China [J]. Geology in China, 2006, 33(4):689-699 (in Chinese with English abstract).
- [3] 肖庆辉, 王涛, 邓晋福, 等. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2009.  
Xiao Qinghui, Wang Tao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and Continent Growth of Key Orogenic in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [4] 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 等. 中国东部中生代软流圈上涌造山作用[J]. 中国地质, 2007, 34(4):730-749.  
Xiao Qinhui, Qiu Ruizhao, Wu Guangying, et al. Upwelling orogenesis of Mesozoic rheosphere [J]. Geology in China, 2007, 34(4):730-749(in Chinese with English abstract).
- [5] 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J].

- 地学前缘, 2003, 10(3):221-229.
- Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granites [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3):221-229(in Chinese with English abstract).
- [6] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. *中国地质*, 2005, 32(3):343-352
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth model in China [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3):343-352(in Chinese with English abstract).
- [7] 伍光英, 肖序常, 肖庆辉, 等. 湘南多金属矿集区燕山期成矿花岗岩的主元素地球化学特征和成因探讨[J]. *中国地质*, 2008, 35(2):217-231.
- Wu Guangying, Xiao Xuchang, Xiao Qinghui, et al. Geochemistry of major elements of the Yanshanian metallogenic granites in the polymetallic deposit enriched zones in Hunan Province, China; Implications for granite generation [J]. *Geology in China*, 2008, 35(2):217-231(in Chinese with English abstract).
- [8] 伍光英, 侯增谦, 肖庆辉, 等. 湘南多金属矿集区燕山期成矿花岗岩的稀土地球化学特征和成岩成矿作用探讨[J]. *中国地质*, 2008, 35(3):410-420.
- Wu Guangying, Hou Zengqian, Xiao Qinghui, et al. Geochemistry of the rare earth elements and metallization of the Yanshanian granites in the polymetallic deposit enriched zones in Hunan Province [J]. *Geology in China*, 2008, 35(3):410-420 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱金初, 王汝成, 张佩华, 等. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石 U-Pb 年代学格架[J]. *中国科学(D 辑)*, 2009, 39(8):1112-1127
- Zhu Jinchu, Wang Rucheng, Zhang Peihua, et al. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China [J]. *Science in China (Ser.D)*, 2009, 52, doi:10.1007/s11430-009-0154-4
- [10] 朱金初, 黄革非, 张佩华, 等. 湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩岩体侵位年龄和物质来源研究[J]. *地质论评*, 2003, 49(3):245-252.
- Zhu Jinchu, Huang Gefei, Zhang Peihua, et al. The emplacement age and material sources for the granites of Cailing super-unit, Qitianling Pluton, South Hunan Province [J]. *Geological Review*, 2003, 49(3):245-252(in Chinese with English abstract).
- [11] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *中国地质*, 2004, 31(1):91-100.
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. 2004. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South china an its significance [J]. *Geology in China*, 31 (1):96-100 (in Chinese with English abstract).
- [12] Holden P, Halliday A N, Stepshw E. Neodymium and strontium isotope content of micro-diorite enclaves points to mantle input to granitoid production [J]. *Nature*, 1987, 330:53-56.
- [13] Leshner C E. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing [J]. *Nature*, 1990, 344:235-237.
- [14] Allen C M. Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, southeast California: Mineral chemical and isotopic evidence [J]. *American Mineralogist*, 1991, 76:574-588.
- [15] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6):1217-1238.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussion on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6):1217-1238(in Chinese).
- [16] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):185-220(in Chinese).
- [17] 耿树方, 易龙荣, 范本贤, 等. 1:250 万亚洲中部及邻区能源矿产成矿规律图[M]. 北京:地质出版社, 2008.
- Geng Shufang, Yi Longrong, Fan Benxian, et al. *Metallogenic Regularity Map of Energy Resources in Central Asia and Neighboring Areas (1:2500000)*[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2008.
- [18] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1988.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan. *Regional Geology Hunan* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988 (in Chinese).
- [19] 毕献武, 李鸿莉, 双燕, 等. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征—对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4):539-548.
- Bi Xianwu, Li Hongli, Shuang Yan, et al. Geochemical characteristics of fluid inclusions from Qitianling A-type granite, Hunan Province, China—Tracing the source of ore-forming fluids of the Furong super-large tin deposit [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14 (4):539-548 (in Chinese with English abstract).
- [20] 柏道远, 刘耀荣, 王先辉, 等. 湖南骑田岭岩体北东部角闪石黑云母二长花岗岩的  $^{40}\text{Ar}$ — $^{39}\text{Ar}$  定年及其意义 [J]. *资源调查与环境*, 2005, 26(3):179-184.
- Bai Daoyuan, Liu Yaorong, Wang Xianhui, et al.  $^{40}\text{Ar}$ — $^{39}\text{Ar}$  dating of the biotite monzogranite in northeast Qitianling granite body and its geological significance [J]. *Resources Survey& Environment*, 2005,26(3):179-184(in Chinese with English abstract).
- [21] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2):45-56.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extensions from South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2):45-56 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李金冬, 柏道远, 伍光英, 等. 湘南郴州地区骑田岭花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(3):411-414.
- Li Jindong, Bo Daoyuan, Wu Guangying, et al. Zircon SHRIMP dating of the Qitianling granite, Chenzhou, southern Hunan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24 (3):411-414 (in Chinese with English abstract).
- [23] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chem. Geo.*, 2002, 192:59-79.
- [24] Ludwig K R. Isoplot. A geochronological toolkit for microsoft

- excel Berkeley Geochronology Center [J]. Special publication no, 2003, (4):1-4.
- [25] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps. Cathodoluminescence in Geoscience [M]. Heidelberg: Germany, Springer-Verlag, 2000:373-400.
- [26] Rubatto D, Williams I S. Imaging, trace element geochemistry and mineral inclusions: Linking U-Pb ages with metamorphic conditions [J]. EOS, 2000, 21:25.
- [27] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002, 184:123-138.
- [28] Didier J, Barbarin B. Enclaves and granite petrology [J]. Elsevier: Amsterdam, 1991, 1-625.
- [29] Castro A, Moreno\_Ventas I de la Rosa J D. H-type (hybrid) granitoids: A proposed revision of the granite type classification and nomenclature [J]. Earth Science Reviews, 1991, 31:237-253.
- [30] Wilcox R E. The idea of magma mixing: history of a struggle for acceptance [J]. Geology, 1999, 107:421-432.
- [31] Silva M M V G, Neiva A M R, Whitehouse M J. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal [J]. Lithos, 2000, 50:153-170.
- [32] Didier J. Granites and Their Enclaves [J]. Elsevier: Amsterdam, 1973, 393.
- [33] Fernandez A N Barbarin B. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: Nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves [C]//Didier J and Barbarin B (ed.). Enclaves and Granite Petrology. Elsevier: Amsterdam, 1991, 263-276.
- [34] Xu X, Dong C W, Li W X, et al. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbros-diorite-granite association [J]. Lithos, 1999, 46:299-315.
- [35] Neves S P, Vauchez A. Successive mixing and mingling magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil [J]. Lithos, 1995, 34:275-299.
- [36] 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示 [J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(7):949-971. Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, et al. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China [J]. Science in China (Series D), 2009, 39(7):949-971 (in Chinese).
- [37] 张成立, 王晓霞, 王涛等. 东秦岭沙河湾岩体成因—来自锆石 U-Pb 定年及其 Hf 同位素的证据 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 36(3):453-465. Zhang Chengli, Wang Xiaoxia, Wang Tao, et al. Origin of Shahewan granite intrusion in Eastern Qinling: evidences from zircon U-Pb dating and Hf isotopes [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 36(3):453-465 (in Chinese with English abstract).

## Magmatic mingling origin of adamellite: zircon U-Pb dating and Hf isotopes evidence of microgranular dioritic enclaves and host rocks from Yangtianhu adamellite of Qitianling, South China

LIU Yong, XIAO Qing-hui<sup>1</sup>, GENG Shu-fang<sup>1</sup>, WANG Xiao-xia<sup>1</sup>, CHEN Bi-he<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Hunan Institute of Geological Survey, Xiangtan 411100, Hunan, China)

**Abstract:** A large number of directional microgranular dioritic enclaves occur in Yangtianhu adamellite of Qitianling composite body. Microgranular dioritic enclaves, which commonly show cloudletted and sub-rounded shapes, display igneous textures and are from meter to centimeter in size. These enclaves are darker in color and finer in granularity than their hosting adamellite. Based on an analysis of the inner structural CL images of zircons, this paper discusses U-Pb ages and Hf isotopes of zircons from the host adamellite and mafic microgranular enclaves by using in situ zircon analysis of LA-ICP-MS and MC-ICP-MS. The ages of (157.2±3.7) Ma from host adamellite and (168.6±3.5) Ma from enclaves were obtained, respectively. The Yangtianhu adamellite intrusion was formed by the mingling between the partial melting products from the crustal materials and the magma derived from the mantle.

**Key words:** microgranular dioritic enclaves; adamellite; zircon U-Pb dating; Hf isotope; mingling between the crust- and mantle-derived magma; Qitianling

**About the first author:** LIU Yong, female, born in 1982, doctor candidate, engages in the study of structural geology; E-mail: liuyongfirst@163.com.