

doi: 10.12029/gc20190617

王对兴,管琪,高万里,李春麟,张聚全,赵凯华. 2019. 浙东天台地区早白垩世花岗岩及暗色包体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因[J]. 中国地质, 46(6): 1512-1529.

Wang Duixing, Guan Qi, Gao Wanli, Li Chunlin, Zhang Juquan, Zhao Kaihua. 2019. Zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of the Early Cretaceous mafic enclaves and granites in Tiantai area, eastern Zhejiang Province[J]. Geology in China, 46(6): 1512-1529(in Chinese with English abstract).

浙东天台地区早白垩世花岗岩及暗色包体锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因

王对兴¹, 管琪¹, 高万里², 李春麟², 张聚全¹, 赵凯华³

(1. 河北地质大学资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 河北省地矿局第九地质大队, 河北 邢台 054000)

摘要: 在华南东部浙闽沿海一带普遍发育有大量晚中生代花岗质岩体及其中的暗色包体, 这些岩体被认为是大规模壳幔相互作用和岩浆混合作用的产物。本文对浙东天台地区白鹤岩体中的寄主花岗岩及其中发育的暗色包体分别进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和详细的岩石地球化学研究, 其锆石 U-Pb 年龄分别为 (120.4 ± 1.2) Ma 和 (120.6 ± 1.1) Ma, 属浙东燕山期侵入活动集中的早白垩世中晚期产物。岩石地球化学特征显示, 寄主花岗岩为高硅、富碱、弱过铝质的高钾钙碱性花岗岩, 具有较强的 Eu 负异常, 富集 Rb、Th、U、K, 并有 Sr、Ba、P、Ti、Nb、Ta 等元素的亏损, 岩石成因为高分异 I 型花岗岩; 暗色包体多为低硅、富钠、偏铝质低钾拉斑玄武系列岩石, 轻稀土富集、重稀土亏损, 并具有弱的 Eu 正异常。锆石 Hf 同位素组成表现出不同物质来源(壳幔混源)花岗岩类岩石的特点。综合年代学及岩石地球化学特征, 认为浙东地区早白垩世 I 型花岗岩及其暗色包体是在燕山期弧后碰撞伸展引张的构造背景下, 由底侵的幔源岩浆与其诱发熔融的深部壳源岩浆经混合后, 经过一定程度的分异演化, 最后定位于浅成环境的产物。

关键词: 早白垩世; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; 岩石地球化学; 地质调查工程; 天台地区; 浙东

中图分类号: P581; P595

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2019)06-1512-18

Zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of the Early Cretaceous mafic enclaves and granites in Tiantai area, eastern Zhejiang Province

WANG Duixing¹, GUAN Qi¹, GAO Wanli², LI Chunlin², ZHANG Juquan¹, ZHAO Kaihua³

(1. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. No. 9 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development of Hebei Province, Xingtai 054000, Hebei, China)

Abstract: A large number of Late Mesozoic granitic plutons with dark enclaves are widespread in the coastal area of Zhejiang and Fujian Province. They are considered to be the product of large-scale crust mantle interaction and magma mixing. In this paper, the

收稿日期: 2018-04-19; 改回日期: 2019-09-06

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011121068)、国家自然科学基金项目(41602028, 41602040)和河北地质大学博士科研启动基金项目(BQ201517)联合资助。

作者简介: 王对兴, 男, 1979年生, 博士, 副教授, 从事火成岩、岩石地球化学研究工作; E-mail: wangdx0319@163.com。

authors conducted the LA-ICP-MS U-Pb dating and obtained whole-rock geochemical data of the host granites and dark enclaves of Baihe intrusion in Tiantai area, eastern Zhejiang Province, with the purpose of exploring the geochronology, petrogenesis and tectonic implications. The results obtained show that the U-Pb zircon ages of the host granite and dark enclaves are (120.4±1.2)Ma and (120.6±1.1)Ma, respectively. They are products of the Early Cretaceous Yanshanian intrusive activities in eastern Zhejiang in a syncollisional-postcollisional environment. Geochemical analyses show that the host rocks are high-potassium calc-alkaline I-type granite, with enriched SiO₂, total alkalis, and weakly-peraluminous nature; they are enriched in Rb, Th, U and K, and depleted in Sr, Ba, P, Ti, Nb and Ta, with strong negative Eu anomaly. The dark enclaves belong chemically to partial alumina low-potassium tholeiite series, with lower SiO₂, enriched sodium, enriched LREE, relatively depleted HREE, and weak positive Eu anomaly. The Hf isotope composition of zircons from host granite and dark enclaves are all indicative of mixing of crustal and mantle materials. Based on the geochronological and geochemical data, the authors hold that the Early Cretaceous I-type granites and their dark enclaves in eastern Zhejiang were generated by mixing of mantle-derived basic magma and its induced crustal felsic magma in an extension environment which followed the Yanshanian arc-back collision.

Key words: Early Cretaceous; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; geological survey engineering; Tiantai area; eastern Zhejiang Province

About the first author: WANG Duixing, male, born in 1979, doctor and associate professor, engages in the study of igneous rocks and geochemistry; E-mail: wangdx0319@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011121068), National Natural Science Foundation of China (No. 41602028, 41602040), Doctoral Scientific Research Foundation of Hebei GEO University (No. BQ201517).

1 引言

在中国东南沿海一带,特别是浙闽地区,晚中生代花岗岩-火山岩广泛出露,其产出模式呈多期次幕式,具有错综复杂的成因类型和形成过程,且与W-Sn-Cu-U等多金属成矿及其构造动力学背景有着重要的联系(徐夕生,2008),一直以来都是国内外地质学家研究的热点。同时,在这些花岗质侵入体中发育有大量的暗色微粒包体,这些暗色包体中蕴含着丰富的壳幔作用和岩浆混合作用信息,一直被用来揭示花岗质岩浆的起源、演化及成因机制等深部信息(Blake et al.,2000; Kumar et al.,2006; 王德滋等,2008; Kaygusuz et al.,2009; Liao et al.,2010; Esna-Ashari et al.,2011; Zhao et al.,2012; 祝新友等,2016)。因此,越来越多的前辈学者开始重视对其进行地壳深部过程的示踪作用研究(Browne et al.,2006; Ferla et al.,2006; 董传万等,2008,2009; 刘亮等,2011; 王对兴等,2013; 薛玉山等,2014; 陈希节等,2016; 崔加伟等,2016),但对其中暗色微粒包体的成因机理,及其与寄主花岗岩之间的成因联系等方面的研究还存在着较大的争议(刘亮等,2012)。

笔者在浙东天台县地区进行野外考察时,在县城以北白鹤镇附近的花岗岩中发现有大量的大小不等、形状各异的暗色微粒包体存在,野外观察其

具有较明显的岩浆混合特征。为了深入了解暗色包体在探测岩石圈深部的“探针”和“窗口”作用,本文以该地区花岗质岩体中的暗色包体及其寄主岩石为研究对象,通过对寄主岩石及其暗色包体的岩石学、地球化学特征的研究,并结合LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及Hf同位素特征,来揭示寄主花岗岩及暗色包体的形成时代、岩石成因及其形成的构造背景,为探讨整个华南东北缘浙闽沿海一带晚中生代早白垩世时期强烈的壳幔作用及岩浆混合作用提供新的证据。

2 地质背景

浙东地区位于华南大陆的东北缘,地处亚洲东部陆缘南段。晚中生代,由于西太平洋板块向东亚板块强烈的俯冲作用引发了燕山期广泛而强烈的构造-岩浆活动,形成了一条颇具特色的沿NNE向展布的I-A型复合花岗岩带(邱检生等,1999)。位于江山-绍兴深大断裂带以东的浙闽沿海地区,早白垩世花岗质岩体的分布具有自NW向SE方向逐渐变新的趋势(孙涛,2006)(图1a)。在这些广泛分布的花岗质岩体中普遍发育有各种暗色微粒包体(少数呈脉体状),有时甚至呈包体群出现,如发现于浙江境内的青田花岗岩体(董传万和彭亚鸣,1994)、大衢山花岗岩体(周新民等,1992)、舟山普陀

山黑云母钾长花岗岩体(张晓琳等,2005)、北漳和梁弄花岗岩体(陈荣等,2005)、新昌儒岙花岗质复合岩体(董传万等,2007,2008,2009)、龙游沐尘石英二长岩体(刘亮等,2011,2012)、新昌小将花岗岩体(王对兴等,2013)及雁荡山火山-侵入杂岩体(颜丽丽等,2015)等,以及福建境内的漳州角美花岗岩体(杨金豹等,2013)等。前人研究认为,这些岩体中的暗色包体是在伸展引张的构造背景下,由壳幔作用或上涌的亏损地幔组分与其诱发的地壳物质部分熔融所形成的长英质岩浆经混合作用的产物(张晓琳等,2005)。

3 岩体地质与岩石学特征

本文所研究的白鹤岩体位于浙江省东北部天台县城西北约25 km的白鹤镇附近,西邻政和一大浦断裂带(图1a),东北部紧邻小将岩体,西北方向

则为新昌儒岙复合岩体,主要由早白垩世钾长花岗岩构成较大岩基,出露面积约100 km²,平面上大致呈“V”字型北北东向展布。该岩体除西南侧与白垩纪地层呈断层接触外,其余大部分均与上侏罗统地层呈侵入接触关系(图1b)。

白鹤岩体主要由寄主花岗岩及其中大量分布的暗色包体组成。在露头上,包体多呈灰色-暗灰色,个体大小悬殊,直径一般几厘米至几十厘米不等,形态各异,多呈浑圆状、透镜状及撕裂状等不规则形态。暗色包体与寄主岩之间的界线较清晰,多呈突变关系,局部可见包体与寄主岩体之间呈过渡的“冷凝边”特征。个别地方见包体与寄主岩之间呈弥散状接触,甚至出现寄主岩被暗色包体包裹的现象。上述特征均显示暗色包体与寄主花岗岩之间可能曾经以塑性状态共存。

本文对白鹤岩体由西北至东南依次采样(图

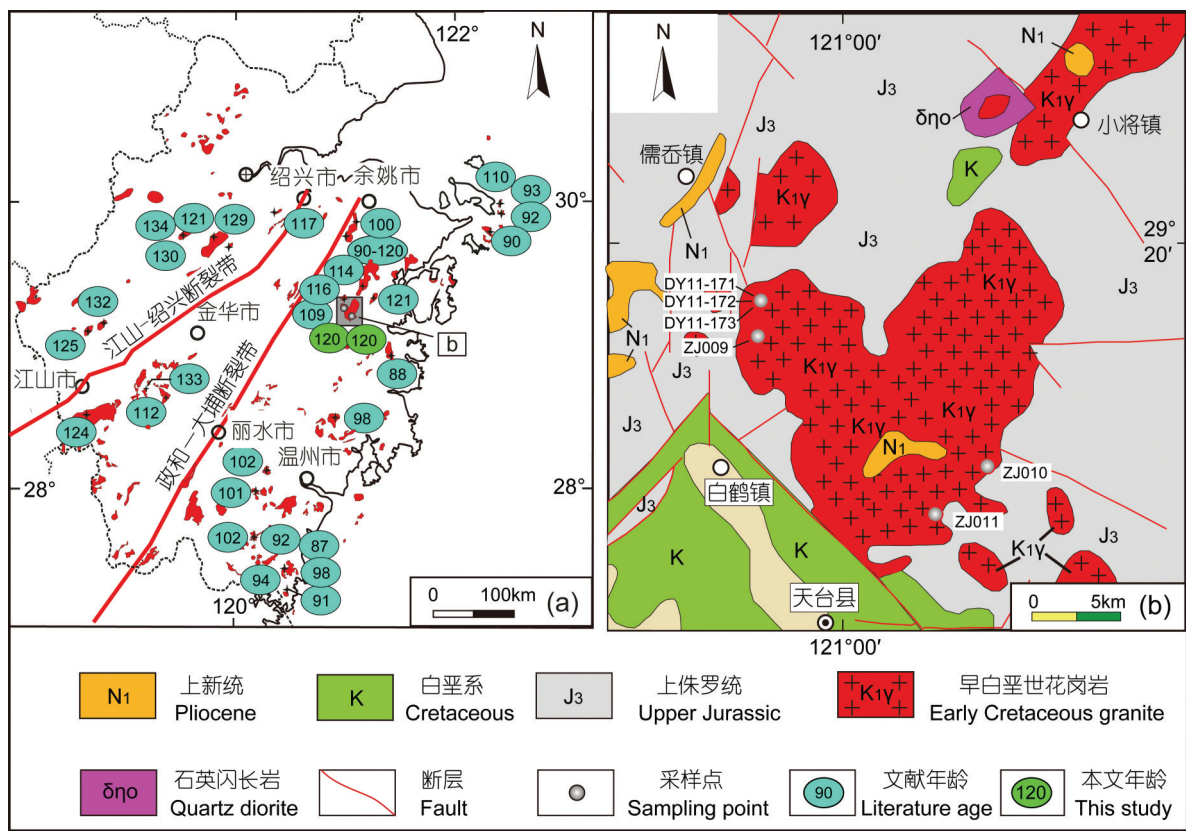


图1 浙江天台白鹤岩体地质简图

a—浙江省早白垩世岩体分布图;b—白鹤岩体地质简图(据浙江省区域地质大队,1973^①修改)

图中DY11-171,172,173和ZJ009,010,011为6个样品采样位置

Fig. 1 Simplified geological map of the Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

a—Distribution of Early Cretaceous plutons in Zhejiang Province.; b—Simplified geological map of the Baihe pluton (after Regional Geological Team of Zhejiang Province, 1973^①). DY11-171, 172, 173 and ZJ009, 010, 011 refer to the 6 samples and locations

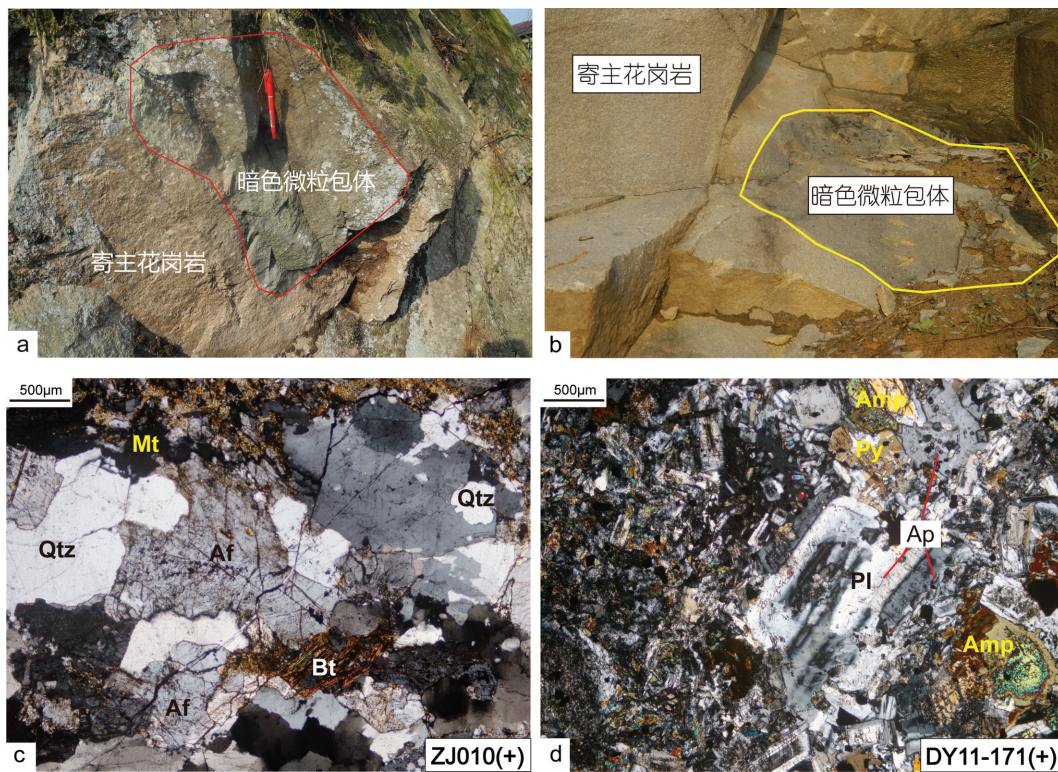


图2 白鹤岩体中暗色微粒包体野外照片(a,b)及寄主岩与包体典型岩相学显微照片(c,d)
 Q—石英; Af—碱性长石; Pl—斜长石; Amp—角闪石; Py—辉石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Mt—磁铁矿
 Fig. 2 Field photos of dark microgranular enclaves in Baihe pluton (a, b) and microphotographs of
 K-feldspar granite (host rocks) and enclaves (c, d)

Q—Quartz; Af—Alkali-feldspar; Pl—Plagioclase; Amp—Amphibole; Py—Pyroxene; Ap—Apatite; Bt—Biotite; Mt—Magnetite

1b)。选择其中6件岩石样品进行测试分析,主要识别出两类岩石类型,分别是钾长花岗岩(ZJ010, ZJ011)和(辉长)闪长岩(ZJ009, DY11-171, DY11-172, DY11-173)(图2)。钾长花岗岩呈浅灰色—浅肉红色,细粒花岗结构,局部可见似斑状结构,主要由石英(含量约25%)、碱性长石(55%)、斜长石(15%)及少量黑云母(5%)组成,副矿物为磁铁矿和锆石等(<1%)。(辉长)闪长质包体呈细粒-微粒结构,主要矿物组成为中基性斜长石(平均An=55%~60%, 45%)、碱性长石(15%)、角闪石(20%)和辉石(10%)、少量石英(5%)及微量针状磷灰石、钛铁氧化物等副矿物(<5%),镜下鉴定为辉长闪长岩。

4 测试方法

全岩地球化学分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析测试中心完成。本文选取具有代表性的新鲜岩石样品进行分析。主量

元素采用熔片法X-射线荧光光谱(XRF)完成测定,分析仪器为XRF-1500型X射线荧光光谱仪,分析精度优于5%,其中FeO采用容量法分析。微量元素(包括稀土元素)采用等离子体质谱(ICP-MS)、等离子体光学发射光谱(ICP-OES)或压片法X-射线荧光光谱(XRF)等完成。分析结果见表1。

锆石用实验室常规方法分选得到,锆石靶的制备与SHRIMP定年的锆石样品制备方法基本相同(宋彪等,2002),锆石阴极发光在中国地质科学院地质研究所离子探针室采用日立HITACHIS3000-N型扫描电子显微镜完成。锆石U-Pb测年在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,分析仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的New Wave UP213激光剥蚀系统。LA-MC-ICPMS激光采样采用单点剥蚀的方式,测定前用锆石GJ-1调试仪器,使其达到最优状态,锆石U-Pb测年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆

表 1 浙江天台白鹤岩体主量(%)及微量(10^{-6})元素分析结果Table 1 Abundances of major (%) and trace (10^{-6}) elements in Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

| 样品号 | ZJ010 | ZJ011 | ZJ009 | DY11-171 | DY11-172 | DY11-173 |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 岩性 | 钾长花岗岩 | 钾长花岗岩 | 暗色包体 | 暗色包体 | 暗色包体 | 暗色包体 |
| 位置 | 29°11'18"N | 29°13'48"N | 29°18'13"N | 29°18'42"N | 29°18'43"N | 29°18'45"N |
| | 121°02'45"E | 121°02'38"E | 121°56'05"E | 121°56'23"E | 121°56'25"E | 121°56'24"E |
| SiO ₂ | 74.31 | 78.26 | 48.14 | 53.37 | 53.37 | 53.24 |
| TiO ₂ | 0.29 | 0.12 | 2.45 | 1.37 | 1.38 | 1.37 |
| Al ₂ O ₃ | 13.12 | 11.64 | 12.89 | 17.45 | 17.43 | 17.40 |
| TFe ₂ O ₃ | 1.72 | 0.91 | 12.69 | 8.88 | 8.89 | 8.88 |
| FeO | 0.61 | 0.07 | 7.12 | 3.93 | 3.79 | 3.60 |
| MnO | 0.05 | 0.05 | 0.15 | 0.69 | 0.69 | 0.68 |
| MgO | 0.38 | 0.11 | 8.83 | 3.23 | 3.23 | 3.19 |
| CaO | 1.10 | 0.50 | 9.12 | 7.09 | 7.08 | 7.10 |
| Na ₂ O | 2.99 | 3.55 | 2.53 | 5.24 | 5.12 | 5.23 |
| K ₂ O | 4.80 | 4.30 | 1.80 | 0.15 | 0.16 | 0.16 |
| P ₂ O ₅ | 0.07 | 0.02 | 0.62 | 0.53 | 0.53 | 0.53 |
| 烧失量 | 1.01 | 0.33 | 1.37 | 2.31 | 2.48 | 2.48 |
| 总量 | 99.77 | 99.78 | 99.79 | 99.87 | 99.94 | 99.85 |
| σ | 1.93 | 1.75 | 3.65 | 2.80 | 2.69 | 2.83 |
| AKI | 0.77 | 0.90 | 0.47 | 0.50 | 0.49 | 0.50 |
| ASI | 1.08 | 1.02 | 0.57 | 0.80 | 0.81 | 0.80 |
| Q | 36.00 | 40.03 | 0.00 | 2.66 | 3.21 | 2.65 |
| An | 5.09 | 2.37 | 18.81 | 24.29 | 24.75 | 24.23 |
| Ab | 25.58 | 30.18 | 21.76 | 45.53 | 44.57 | 45.5 |
| Or | 28.72 | 25.58 | 10.83 | 0.91 | 0.96 | 0.96 |
| C | 1.19 | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Di | 0.00 | 0.00 | 18.55 | 6.83 | 6.43 | 6.97 |
| Hy | 1.63 | 0.71 | 10.11 | 11.56 | 11.82 | 11.43 |
| Ap | 0.16 | 0.05 | 1.46 | 1.25 | 1.26 | 1.26 |
| DI | 90.30 | 95.79 | 32.59 | 49.10 | 48.74 | 49.11 |
| La | 48.50 | 29.20 | 33.40 | 28.60 | 27.90 | 27.20 |
| Ce | 97.90 | 55.30 | 68.10 | 56.60 | 54.50 | 54.10 |
| Pr | 10.00 | 5.94 | 8.36 | 7.98 | 7.74 | 7.54 |
| Nd | 33.40 | 20.10 | 35.90 | 34.70 | 33.70 | 33.30 |
| Sm | 5.51 | 3.98 | 8.24 | 6.83 | 6.72 | 6.57 |
| Eu | 0.96 | 0.45 | 2.91 | 2.26 | 2.23 | 2.17 |
| Gd | 4.66 | 3.59 | 8.36 | 6.26 | 5.92 | 5.93 |
| Tb | 0.70 | 0.62 | 1.15 | 0.97 | 0.92 | 0.91 |
| Dy | 4.13 | 3.86 | 6.15 | 5.42 | 5.28 | 5.23 |
| Ho | 0.79 | 0.78 | 1.02 | 1.07 | 1.00 | 1.03 |
| Er | 2.41 | 2.44 | 2.49 | 2.86 | 2.73 | 2.76 |
| Tm | 0.39 | 0.41 | 0.31 | 0.43 | 0.41 | 0.40 |
| Yb | 2.61 | 2.91 | 1.80 | 2.59 | 2.39 | 2.53 |
| Lu | 0.40 | 0.46 | 0.25 | 0.36 | 0.33 | 0.34 |
| Σ REE | 212.38 | 129.99 | 178.52 | 156.96 | 151.78 | 149.92 |
| δ Eu | 0.56 | 0.35 | 1.06 | 1.04 | 1.06 | 1.04 |
| LREE/HREE | 12.20 | 7.62 | 7.29 | 6.86 | 7.00 | 6.84 |
| (La/Yb) _N | 12.53 | 6.74 | 12.53 | 7.45 | 7.86 | 7.25 |

续表1

| 样品号 | ZJ010 | ZJ011 | ZJ009 | DY11-171 | DY11-172 | DY11-173 |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 岩性 | 钾长花岗岩 | 钾长花岗岩 | 暗色包体 | 暗色包体 | 暗色包体 | 暗色包体 |
| 位置 | 29°11'18"N | 29°13'48"N | 29°18'13"N | 29°18'42"N | 29°18'43"N | 29°18'45"N |
| | 121°02'45"E | 121°02'38"E | 121°56'05"E | 121°56'23"E | 121°56'25"E | 121°56'24"E |
| Sc | 3.90 | 2.00 | 18.20 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| V | 13.20 | 7.30 | 148.70 | 164.00 | 160.00 | 161.00 |
| Cr | 8.90 | 3.00 | 150.40 | 6.80 | 7.30 | 9.40 |
| Ni | 3.10 | 1.40 | 215.40 | 3.55 | 3.65 | 3.66 |
| Cu | 3.90 | 1.80 | 86.00 | 7.80 | 7.70 | 10.60 |
| Zn | 53.00 | 33.00 | 143.00 | 546.00 | 538.00 | 549.00 |
| Ga | 15.00 | 15.00 | 20.00 | 25.00 | 24.00 | 24.00 |
| Rb | 173.00 | 152.00 | 50.00 | 5.00 | 6.00 | 6.00 |
| Sr | 169.00 | 44.00 | 757.00 | 566.00 | 565.00 | 571.00 |
| Zr | 153.00 | 78.00 | 221.00 | 165.00 | 165.00 | 168.00 |
| Y | 22.50 | 22.80 | 24.60 | 27.80 | 26.70 | 26.10 |
| Nb | 15.50 | 16.70 | 54.80 | 9.70 | 9.60 | 10.00 |
| Cs | 2.60 | 1.20 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| Ba | 898.00 | 175.00 | 509.00 | 66.00 | 54.00 | 39.00 |
| Hf | 5.67 | 3.30 | 4.65 | 5.18 | 4.97 | 5.02 |
| Ta | 1.27 | 1.33 | 3.34 | 1.16 | 0.60 | 0.67 |
| Pb | 37.00 | 22.00 | 3.00 | 35.20 | 34.60 | 35.20 |
| Th | 20.20 | 16.30 | 5.70 | 2.10 | 2.10 | 1.90 |
| U | 3.24 | 2.98 | 1.04 | 0.80 | 0.83 | 0.80 |
| Rb/Sr | 3.43 | 0.07 | 1.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| La/Nb | 3.25 | 1.82 | 0.63 | 3.06 | 3.02 | 2.81 |
| Ba/Nb | 5.91 | 1.07 | 0.95 | 0.69 | 0.57 | 0.40 |
| 10 ⁴ ×Ga/Al | 2.18 | 2.38 | 2.98 | 2.66 | 2.59 | 2.64 |

注: $\sigma = (K_2O + Na_2O) / (SiO_2 - 43)$; $ASI = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ (分子数比); 标准矿物 Q=石英; An=钙长石; Ab=钠长石; Or=正长石; C=刚玉; Di=透辉石; Hy=紫苏辉石; Ap=磷灰石; Di=分异指数; $\delta Eu = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$ 。

石 M127(U: 923 $\mu\text{g/g}$; Th: 439 $\mu\text{g/g}$; Th/U: 0.475) 为外标进行校正。每测定 5~7 个样品, 前后重复测定 2 个锆石标准 GJ1 对样品进行校正, 并测量 1 个 Plešovice 锆石标准, 以保证样品测试的精确度。详细的仪器参数、数据软件处理、校正等见相关文献 (Liu et al., 2007; 侯可军等, 2009), 有关加权平均计算和 U-Pb 谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 版 (Ludwig, 2003) 完成。锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果见表 2。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行的, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 剥蚀直径采用 55 μm 或 40 μm , 未知样品

测定时交替测定锆石标样 GJ1 和 Plešovice, 分析点位置尽可能接近 U-Pb 定年分析点位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见相关文献 (侯可军等, 2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 0.282007 ± 0.000007 (2σ , $n=36$), 与文献报道值 (侯可军等, 2007; Morel et al., 2008) 在误差范围内完全一致。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对岩体中寄主花岗岩 (ZJ010) 和暗色闪长质包体 (DY11-171) 中的锆石进行了阴极发光 (CL) 图像拍摄 (图 3) 及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 (表 2), 并利用 Isoplot 3.0 绘制了锆石 U-Pb 谐和图 (图 4)。锆石 CL 图像显示, 寄主花岗岩的锆石多呈等

表2 浙江天台白鹤岩体钾长花岗岩寄主岩及暗色闪长质包体的锆石U-Th-Pb同位素测定结果

Table 2 Zircon U-Th-Pb dating results for the host granite and diorite enclaves of Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

| 点号 | Pb /10 ⁻⁶ | Th /10 ⁻⁶ | U /10 ⁻⁶ | Th/U | 同位素比值 | | | | | | 表面年龄/Ma | | | | | |
|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|----|-------------------------------------|----|
| | | | | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁸ Pb/ ²³² Th | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ |
| ZJ010-1 | 67 | 169 | 169 | 1.00 | 0.0483 | 0.0005 | 0.1201 | 0.0020 | 0.0181 | 0.0003 | 0.0032 | 0.0002 | 115 | 2 | 115 | 2 |
| ZJ010-2 | 126 | 362 | 314 | 1.15 | 0.0502 | 0.0003 | 0.1299 | 0.0016 | 0.0188 | 0.0002 | 0.0030 | 0.0002 | 124 | 1 | 120 | 1 |
| ZJ010-3 | 75 | 207 | 145 | 1.43 | 0.0489 | 0.0006 | 0.1214 | 0.0020 | 0.0181 | 0.0003 | 0.0029 | 0.0002 | 116 | 2 | 115 | 2 |
| ZJ010-4 | 101 | 316 | 241 | 1.31 | 0.0614 | 0.0008 | 0.1579 | 0.0024 | 0.0188 | 0.0002 | 0.0028 | 0.0001 | 149 | 2 | 120 | 1 |
| ZJ010-5 | 97 | 280 | 421 | 0.67 | 0.0489 | 0.0003 | 0.1239 | 0.0015 | 0.0184 | 0.0002 | 0.0029 | 0.0002 | 119 | 1 | 118 | 1 |
| ZJ010-6 | 193 | 562 | 413 | 1.36 | 0.0567 | 0.0013 | 0.1496 | 0.0093 | 0.0191 | 0.0010 | 0.0030 | 0.0002 | 142 | 8 | 122 | 4 |
| ZJ010-7 | 88 | 265 | 607 | 0.44 | 0.0513 | 0.0003 | 0.1341 | 0.0021 | 0.0190 | 0.0003 | 0.0030 | 0.0002 | 128 | 2 | 121 | 2 |
| ZJ010-8 | 303 | 760 | 716 | 1.06 | 0.0506 | 0.0003 | 0.1383 | 0.0016 | 0.0198 | 0.0002 | 0.0032 | 0.0002 | 132 | 1 | 127 | 1 |
| ZJ010-9 | 124 | 244 | 1039 | 0.23 | 0.0538 | 0.0003 | 0.1408 | 0.0018 | 0.0190 | 0.0002 | 0.0035 | 0.0002 | 134 | 2 | 121 | 1 |
| ZJ010-10 | 45 | 133 | 123 | 1.09 | 0.0501 | 0.0008 | 0.1246 | 0.0028 | 0.0181 | 0.0003 | 0.0030 | 0.0003 | 119 | 3 | 115 | 2 |
| ZJ010-11 | 50 | 103 | 74 | 1.39 | 0.0526 | 0.0011 | 0.1374 | 0.0038 | 0.0190 | 0.0004 | 0.0039 | 0.0004 | 131 | 3 | 121 | 3 |
| ZJ010-12 | 98 | 220 | 166 | 1.33 | 0.0501 | 0.0005 | 0.1336 | 0.0020 | 0.0194 | 0.0003 | 0.0029 | 0.0002 | 127 | 2 | 124 | 2 |
| ZJ010-13 | 154 | 325 | 1914 | 0.17 | 0.0495 | 0.0003 | 0.1211 | 0.0031 | 0.0177 | 0.0005 | 0.0025 | 0.0003 | 116 | 3 | 113 | 3 |
| DY11-171-1 | 34 | 65 | 39 | 1.67 | 0.0580 | 0.0029 | 0.1520 | 0.0056 | 0.0192 | 0.0005 | 0.0038 | 0.0007 | 144 | 5 | 122 | 3 |
| DY11-171-2 | 5 | 26 | 19 | 1.37 | 0.0488 | 0.0054 | 0.1260 | 0.0128 | 0.0190 | 0.0004 | 0.0097 | 0.0019 | 121 | 12 | 121 | 3 |
| DY11-171-3 | 108 | 115 | 70 | 1.64 | 0.0500 | 0.0022 | 0.1332 | 0.0058 | 0.0194 | 0.0002 | 0.0036 | 0.0007 | 127 | 5 | 124 | 1 |
| DY11-171-4 | 32 | 40 | 23 | 1.74 | 0.0483 | 0.0025 | 0.1299 | 0.0070 | 0.0194 | 0.0003 | 0.0051 | 0.0008 | 124 | 6 | 124 | 2 |
| DY11-171-5 | 44 | 108 | 45 | 2.40 | 0.0533 | 0.0076 | 0.1406 | 0.0225 | 0.0190 | 0.0004 | 0.0022 | 0.0006 | 134 | 20 | 121 | 2 |
| DY11-171-6 | 64 | 81 | 47 | 1.72 | 0.0579 | 0.0028 | 0.1501 | 0.0075 | 0.0188 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0005 | 142 | 7 | 120 | 1 |
| DY11-171-7 | 71 | 129 | 73 | 1.77 | 0.0493 | 0.0022 | 0.1332 | 0.0121 | 0.0190 | 0.0004 | 0.0022 | 0.0003 | 127 | 11 | 121 | 3 |
| DY11-171-8 | 9 | 57 | 38 | 1.50 | 0.0472 | 0.0027 | 0.1230 | 0.0095 | 0.0189 | 0.0007 | 0.0023 | 0.0004 | 118 | 9 | 120 | 5 |
| DY11-171-9 | 18 | 54 | 30 | 1.80 | 0.0540 | 0.0072 | 0.1475 | 0.0286 | 0.0183 | 0.0004 | 0.0020 | 0.0004 | 140 | 25 | 117 | 3 |
| DY11-171-10 | 31 | 125 | 60 | 2.08 | 0.0499 | 0.0010 | 0.1287 | 0.0028 | 0.0187 | 0.0002 | 0.0014 | 0.0003 | 123 | 3 | 119 | 1 |
| DY11-171-11 | 13 | 50 | 32 | 1.56 | 0.0534 | 0.0024 | 0.1334 | 0.0060 | 0.0183 | 0.0003 | 0.0026 | 0.0006 | 127 | 5 | 117 | 2 |

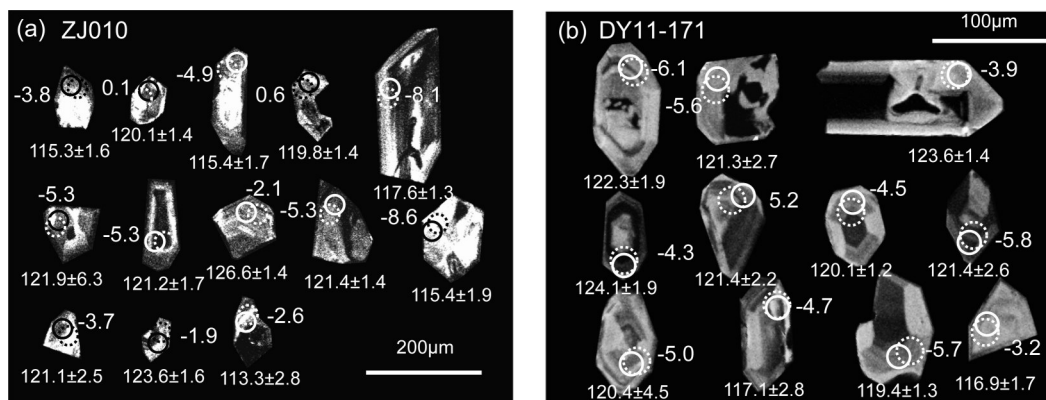


图3 浙江天台白鹤岩体中寄主花岗岩(a)和暗色包体(b)的锆石CL图像、U-Pb年龄(Ma)及Hf同位素值
Fig. 3 CL images, U-Pb dating and Hf isotopic data of zircons of the host granite (a) and dark enclaves (b) from Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

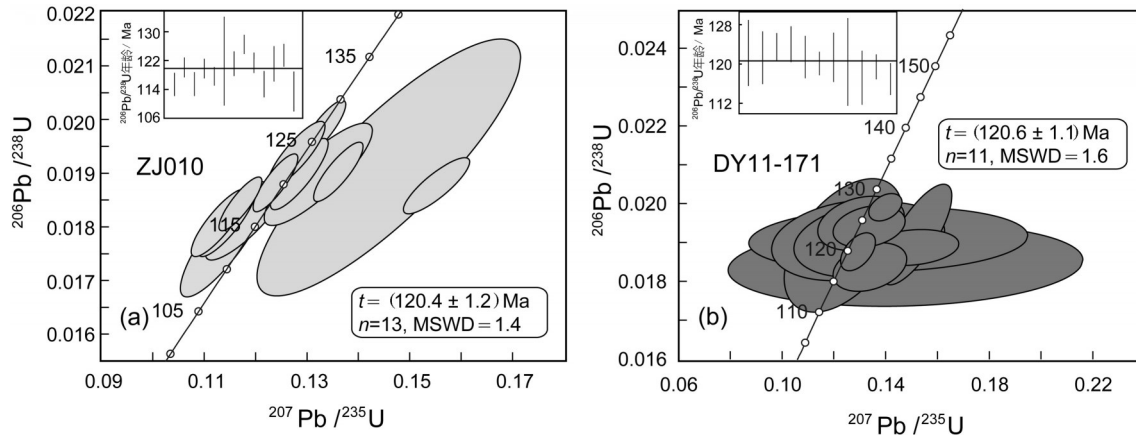


图4 浙江天台白鹤岩体寄主花岗岩(a)和暗色包体(b)的锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the host granite (a) and dark enclaves (b) of Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

轴粒状,少数呈长柱状;暗色包体的锆石长宽比值较大,多呈长柱状。全部锆石多发育条带状清晰的生长韵律(振荡环带),为岩浆锆石所具有的特征(Hoskin et al.,2003)(图3a、b)。寄主花岗岩(ZJ010)的13颗锆石的Th/U比值为0.17~1.43,全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (120.4 ± 1.2) Ma (MSWD = 1.4)(图4a);暗色微粒包体(DY11-171)的11颗锆石的Th/U比值为1.37~2.40,全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (120.6 ± 1.1) Ma (MSWD = 1.6)(图4b)。锆石U-Pb年龄显示,寄主花岗岩与暗色包体在误差范围内是一致的,均属于浙东燕山期侵入活动集中的早白垩世中晚期产物。

5.2 岩石地球化学特征

寄主花岗岩以高硅($\text{SiO}_2 = 74.31\% \sim 78.26\%$)、富碱($\text{Alk} = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}, 7.78\% \sim 7.85\%$)且相对富钾($\text{K}_2\text{O} = 4.30\% \sim 4.80\%$)、低 P_2O_5 ($0.02\% \sim 0.07\%$)、低 TiO_2 ($0.12\% \sim 0.29\%$)为特征,里特曼指数(σ)为1.75~1.93,碱铝指数较低($\text{AKI} = 0.77 \sim 0.90, < 0.90$), Al_2O_3 含量变化于11.64%~13.12%,铝饱和指数(ASI)变化于1.02~1.08,属准铝质-弱过铝质高钾钙碱性岩系,分异指数(DI)介于90.3~95.79,反映寄主花岗岩分异演化程度较高。上述特征与产于由挤压向拉张转变过程中形成的富钾钙碱性花岗岩(KGG)特征较相似(Barbarin et al.,1999)。暗色包体的 SiO_2 含量介于48.14%~53.37%,钠含量偏高($\text{K}_2\text{O} = 0.15\% \sim 1.80\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 2.53\% \sim 5.24\%$),里特曼指数(σ)为2.69~3.65,富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.89\% \sim$

17.45%),钙含量较高($\text{CaO} = 7.08\% \sim 9.12\%$)特征显示包体中斜长石的牌号较高(平均 $\text{An} = 55 \sim 60$),铝饱和指数($\text{ASI} = 0.57 \sim 0.81$)和碱铝指数($\text{AKI} = 0.047 \sim 0.50, < 0.90$)均较低,包体岩石中除样品ZJ009接近于钾玄岩系列外,其他样品均为典型的钙碱性偏铝质低钾拉斑玄武系列岩石(表1、图5)。

对比白鹤岩体与附近的儒岙、小将及普陀山等岩体的主量元素特征显示,其寄主花岗岩具有相同岩石地球化学的特征,都为高硅、高钾的偏铝质-弱过铝质钙碱性系列岩石;而暗色包体则有较大的差异,白鹤岩体中的暗色包体具有更低的硅和钾及A/CNK值,多为偏铝质低钾拉斑玄武系列,结合其富钠的特征,表明白鹤岩体在成岩过程中,来自于地幔的基性岩浆与壳源的长英质岩浆混合程度较之邻近地区要低得多,形成的暗色包体更偏基性,成分上要更接近于幔源组分。

稀土元素特征显示,白鹤岩体中寄主岩石及暗色包体稀土总量较高且变化范围较大($\text{SREE} = 129.99 \times 10^{-6} \sim 212.38 \times 10^{-6}$)(表1,图6a),轻重稀土分馏明显($\text{LREE}/\text{HREE} = 6.84 \sim 12.2$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.74 \sim 12.53$)。稀土元素球粒陨石配分曲线显示,寄主花岗岩与暗色包体之间具有一定的差异,其中寄主花岗岩显示了轻稀土富集,重稀土亏损的右倾型,且具有较强的Eu负异常($\delta\text{Eu} = 0.35 \sim 0.56$),表明寄主花岗岩在成岩过程中经过较为强烈的分异演化作用,并暗示在岩浆部分熔融的过程中可能存在着与角闪石的相平衡;而暗色包体明显具重稀土亏损的特

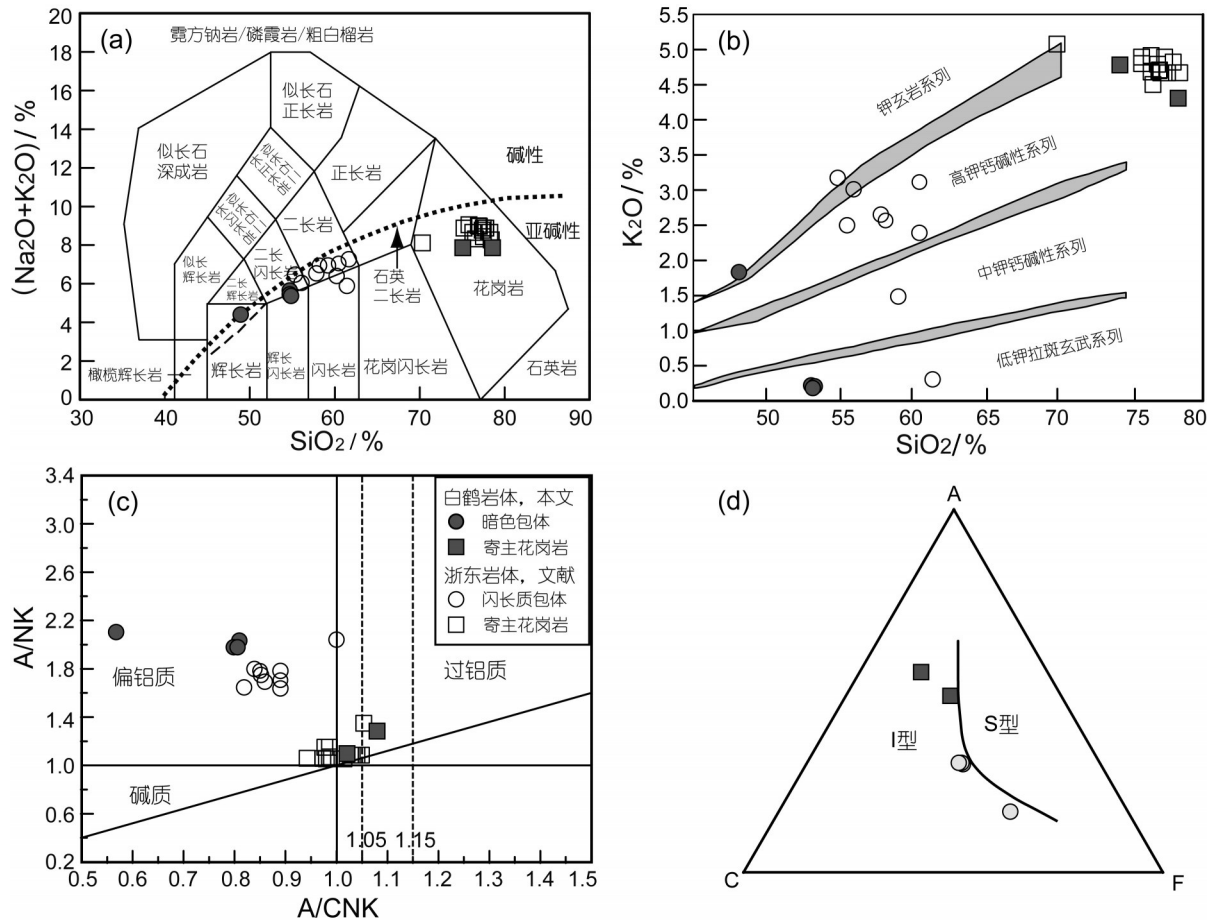


图5 浙东花岗质岩体主量元素成分图

a—硅—碱图(底图据 Middlemost, 1994); b—钾—碱图(底图据 Rickwood, 1989); c—A/CNK—A/NK 图(底图据 Maniar et al., 1989); d—花岗岩 ACF 图解

(文献数据引自谢磊等, 2004; 张晓琳等, 2005; 董传万等, 2008; 王对兴等, 2013)

Fig.5 Plots of major element compositions of granitic rocks from eastern Zhejiang Province

a—Diagram of total alkali versus silica (after Middlemost, 1994); b— Diagram of potassium versus silica (after Rickwood, 1989);

c—Diagram of A/NK versus A/CNK (after Maniar et al., 1989); d—ACF diagram of granites

(Referential data after Xie Lei et al., 2004; Zhang Xiaolin et al., 2005; Dong Chuanwan et al., 2008; Wang Duixing et al., 2013)

征(部分重稀土的标准化数值甚至略低于10), 具有弱的 Eu 正异常 ($\delta Eu=1.04\sim 1.06$), 这意味着可能在源岩发生部分熔融的过程中存在与石榴石等亲重稀土的矿物发生过矿物—熔体的平衡作用。

在微量元素方面, 寄主花岗岩富 Rb、Th、U、K、Pb, 贫 Sr、Ba、P 和 Ti, 部分高场强元素(如 Nb、Ta、Zr 等)也有不同程度的亏损(图 6b), 岩石的 $10^4 \times Ga/Al$ 值(2.18~2.38)均低于 A 型花岗岩的下限值(2.6) (Whalen et al., 1987), 没有显示出典型 A 型花岗岩富 Ga 和高场强元素的地球化学特征; 而暗色包体普遍具有 Rb、Ba、Th、K 的亏损及明显富 Pb 的微量元素特征, 高场强元素(如 Nb、Ta、Zr 等)不显示明显的

亏损特征(图 6b), 这与寄主花岗岩有较大的差异。

5.3 锆石 Hf 同位素

由于锆石化学性质非常稳定, 抗风化能力较强, Lu/Hf 比值低 ($^{176}Lu/^{177}Hf < 0.0005$) (Kinny et al., 2003), 不容易受到源岩部分熔融作用的影响, 其 Hf 同位素组成基本上可以代表岩浆结晶时的初始 Hf 同位素组成 (Griffin et al., 2004; Hawkesworth et al., 2006)。因此, 锆石 Hf 同位素组成已成为近年来岩石成因研究的重要示踪剂, 被认为是探讨岩浆起源与演化, 以及揭示壳幔相互作用过程的最有力工具之一 (Griffin et al., 2002; 吴福元等, 2007)。另外, 与全岩 Nd 同位素相比, 锆石 Hf 同位素的另一个明显

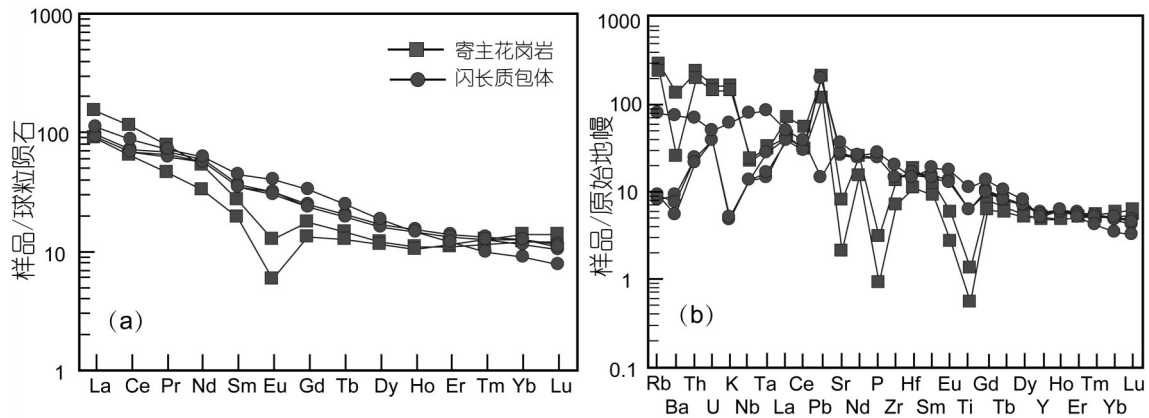


图6 浙江天台白鹤岩体稀土元素球粒陨石配分型式及微量元素原始地幔标准化蛛网图
(a,球粒陨石标准化值据 Boynton,1984;b,原始地幔标准化值据 Sun et al.,1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

(a, chondrite normalized values after Boynton, 1984; b, primitive mantle normalized values after Sun et al.,1989)

优势是人们可以同时获得同一个岩石样品中不同来源及不同结晶阶段的 Hf 同位素组成,这对识别一个岩石是否具有多组分参与成岩过程是十分有效的,因而被广泛应用于花岗岩的成因研究中来 (Griffin et al.,2002; Xie et al.,2011)。

本次工作对寄主花岗岩 (ZJ010) 及暗色包体 (DY11-171) 2 个样品进行锆石 Hf 同位素测试,共获得了 27 颗锆石的 Hf 同位素分析结果 (表 3)。剔除 2 个 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值较高的点 ($^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.410186, 0.412755), 剩余 25 颗锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.044266~0.232402, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.001046~0.004539。寄主花岗岩 (ZJ010) 的 11 颗锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -8.1~-1.9 (图 7a), 对应的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄 T_{DM} 为 881~1109 Ma。暗色包体 14 颗锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.1~-1.4 (图 7b), 对应的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄 T_{DM} 为 876~1021 Ma。

6 讨论

6.1 侵位时代

对于浙东天台地区白鹤岩体 (前人称为龙黄堂岩体) 的侵位时代一直没有给予准确的厘定。前人根据黑云母 Ar-Ar 及锆石 U-Pb 定年等测试方法对该岩体进行过定年,结果显示其分别为 110 Ma (陈江峰等, 1991) 和 114.6 Ma (Wong et al.,2011), 归为早白垩世晚期。本次工作对该岩体中所采寄主花岗岩及暗色包体样品完成 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,结果显

示其形成年龄分别为 $(120.4 \pm 1.2)\text{Ma}$ 和 $(120.6 \pm 1.1)\text{Ma}$, 在误差范围内完全一致,代表了白鹤岩体 (龙黄堂岩体) 的侵位年龄,这一年龄较前人所测年龄稍早,属于晚中生代早白垩世中期侵入岩体。

6.2 岩石的成因类型与物质来源

花岗岩成因类型的判定是花岗岩研究中的一个重要的基础问题。现阶段,大家最熟悉也比较推崇的 ISMA 花岗岩分类法中,根据不同的源岩 (物质来源) 将花岗岩划分为 I 型、S 型 (Chappell and White,1974) 和 M 型 (Pitcher,1983), 以及产于非造山环境相对不含水的碱性花岗岩,即 A 型花岗岩 (Collins et al.,1982)。值得注意的是,产于蛇绿岩套中的所谓大洋斜长花岗岩 (M 型花岗岩) 在自然界中可能分布极少,绝大多数花岗岩都为 I-S-A 型,其中尤其是以 I-S 型为主 (邱检生等,2008)。因此,对这三种类型花岗岩的判定就成为岩石学家们较为关注的焦点,不同学者先后从不同角度提出过多种判别标准 (Whalen et al.,1987; Chappell,1999; Frost et al.,2011), 如从矿物组成上,角闪石、堇青石和碱性暗色矿物的出现分别被认为是判定 I 型、S 型和 A 型花岗岩最有效的矿物学标志 (吴福元等,2007)。另外,一系列典型的地球化学图解也被广泛应用于花岗岩成因类型的判别中来 (Whalen et al.,1987)。但值得注意的是,对于一些经历过高度分异演化的花岗岩,由于其矿物组成和化学成分上都趋近于低共结的特征,使得利用现有的一些判别

表3 浙江天台白鹤岩体的锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Hf isotopic data of zircons from the granitoid samples of Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

| 点号 | 年龄/Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | T_{DM}/Ma | $T_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$ | f_{LuHf} |
|-------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|
| ZJ010-1 | 115 | 0.115712 | 0.002097 | 0.282578 | 0.000023 | 0.282573 | -6.9 | -4.9 | 984 | 1462 | -0.94 |
| ZJ010-2 | 120 | 0.095101 | 0.001918 | 0.282488 | 0.000020 | 0.282483 | -10.1 | -8.1 | 1109 | 1661 | -0.94 |
| ZJ010-3 | 115 | 0.223027 | 0.004068 | 0.282568 | 0.000024 | 0.282559 | -7.2 | -5.3 | 1055 | 1490 | -0.88 |
| ZJ010-4 | 119 | 0.190557 | 0.003715 | 0.282568 | 0.000023 | 0.282560 | -7.2 | -5.3 | 1044 | 1488 | -0.89 |
| ZJ010-5 | 117 | 0.196804 | 0.003844 | 0.282655 | 0.000021 | 0.282646 | -4.1 | -2.1 | 915 | 1292 | -0.88 |
| ZJ010-6 | 121 | 0.128146 | 0.002509 | 0.282565 | 0.000027 | 0.282560 | -7.3 | -5.3 | 1013 | 1489 | -0.92 |
| ZJ010-7 | 121 | 0.112725 | 0.002225 | 0.282608 | 0.000027 | 0.282603 | -5.8 | -3.7 | 943 | 1391 | -0.93 |
| ZJ010-8 | 126 | 0.209653 | 0.003970 | 0.282664 | 0.000027 | 0.282655 | -3.8 | -1.9 | 905 | 1274 | -0.88 |
| ZJ010-9 | 121 | 0.094915 | 0.001848 | 0.282644 | 0.000023 | 0.282640 | -4.5 | -2.6 | 881 | 1313 | -0.94 |
| ZJ010-10 | 115 | 0.232402 | 0.004539 | 0.282662 | 0.000022 | 0.282652 | -3.9 | -2.2 | 923 | 1286 | -0.86 |
| ZJ010-11 | 121 | 0.107216 | 0.002065 | 0.282599 | 0.000023 | 0.282594 | -6.1 | -4.0 | 953 | 1409 | -0.94 |
| DY11-171-1 | 122 | 0.044266 | 0.001066 | 0.282540 | 0.000020 | 0.282537 | -8.2 | -6.1 | 1011 | 1538 | -0.97 |
| DY11-171-2 | 121 | 0.105573 | 0.002359 | 0.282557 | 0.000021 | 0.282552 | -7.6 | -5.6 | 1021 | 1507 | -0.93 |
| DY11-171-3 | 123 | 0.099323 | 0.002204 | 0.282603 | 0.000022 | 0.282598 | -6.0 | -3.9 | 950 | 1402 | -0.93 |
| DY11-171-4 | 124 | 0.072494 | 0.001549 | 0.282590 | 0.000020 | 0.282587 | -6.4 | -4.3 | 951 | 1426 | -0.95 |
| DY11-171-5 | 121 | 0.065169 | 0.001461 | 0.282586 | 0.000022 | 0.282583 | -6.6 | -4.5 | 955 | 1438 | -0.96 |
| DY11-171-6 | 120 | 0.056301 | 0.001230 | 0.282548 | 0.000022 | 0.282545 | -7.9 | -5.8 | 1003 | 1521 | -0.96 |
| DY11-171-7 | 121 | 0.074695 | 0.001560 | 0.282571 | 0.000023 | 0.282567 | -7.1 | -5.0 | 980 | 1472 | -0.95 |
| DY11-171-8 | 120 | 0.052168 | 0.001151 | 0.282581 | 0.000021 | 0.282578 | -6.8 | -4.7 | 955 | 1450 | -0.97 |
| DY11-171-9 | 117 | 0.061729 | 0.001322 | 0.282553 | 0.000022 | 0.282550 | -7.7 | -5.7 | 999 | 1511 | -0.96 |
| DY11-171-10 | 119 | 0.201684 | 0.004082 | 0.282630 | 0.000025 | 0.282621 | -5.0 | -3.2 | 960 | 1354 | -0.88 |
| DY11-171-11 | 116 | 0.066468 | 0.001400 | 0.282544 | 0.000022 | 0.282541 | -8.1 | -6.0 | 1013 | 1531 | -0.96 |
| DY11-171-12 | 122 | 0.180102 | 0.003690 | 0.282679 | 0.000023 | 0.282670 | -3.3 | -1.4 | 876 | 1242 | -0.89 |
| DY11-171-13 | 121 | 0.052857 | 0.001113 | 0.282558 | 0.000020 | 0.282555 | -7.6 | -5.2 | 987 | 1494 | -0.97 |
| DY11-171-14 | 123 | 0.053758 | 0.001123 | 0.282613 | 0.000020 | 0.282611 | -5.6 | -3.3 | 908 | 1369 | -0.97 |

标准已经很难对其进行准确有效的判定。因此,对这类花岗岩往往需要结合岩石学、矿物学和地球化学等多种证据进行综合的判别(Chappell,1999;吴福元等,2007)。

本文所研究的白鹤岩体,从矿物学及主微量元素等方面来分析,其具有同熔型或I型花岗岩的特征。如从矿物学组成上来看,样品中没有堇青石及白云母等过铝质矿物的出现,而在暗色包体中可见有少量角闪石矿物。主量元素分析也显示,所有样品的A/CNK值均小于1.1,属于偏铝质-弱过铝质花岗岩,不符合A/CNK大于1.1的S型花岗岩判别标志(Chappell,1999)。标准矿物计算结果(表1)也显示,除A/CNK值较接近于1.1(为1.08)的样品含有质量分数稍大于1%(为1.19%)的刚玉分子以外,其余所有样品均不含或含质量分数远小于1%(为0.29%)的刚玉分子。在花岗岩ACF图解中(图5d),

全部样品均投在I型花岗岩区域。微量元素上,2件寄主花岗岩样品的Rb/Sr值介于1.02~3.43,平均为2.23,Rb/Nd值介于5.18~7.52,平均6.35,都明显高于或接近中国东部的Rb/Sr和Rb/Nd值(分别为0.31和6.8)(高山等,1999)和全球上地壳的平均值(分别为0.32和4.5)(Taylor et al.,1985),表明寄主花岗岩源自成熟度较高的地壳物质,而暗色包体的上述值(分别为0.01~0.07,0.15~1.38)均远小于中国东部及全球上地壳的平均值,暗示其物质来源可能来自于亏损地幔。

锆石Hf同位素组成显示,寄主花岗岩及暗色包体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,并且变化范围较大(跨度可达6个 ε 单位)(图7),反映其源区物质的不均一性,相对应的Hf同位素亏损地幔模式年龄也均较老(分别为881~1109 Ma,876~1021 Ma),可推断岩浆来源于中—新元古代的基底地壳物质的重熔。

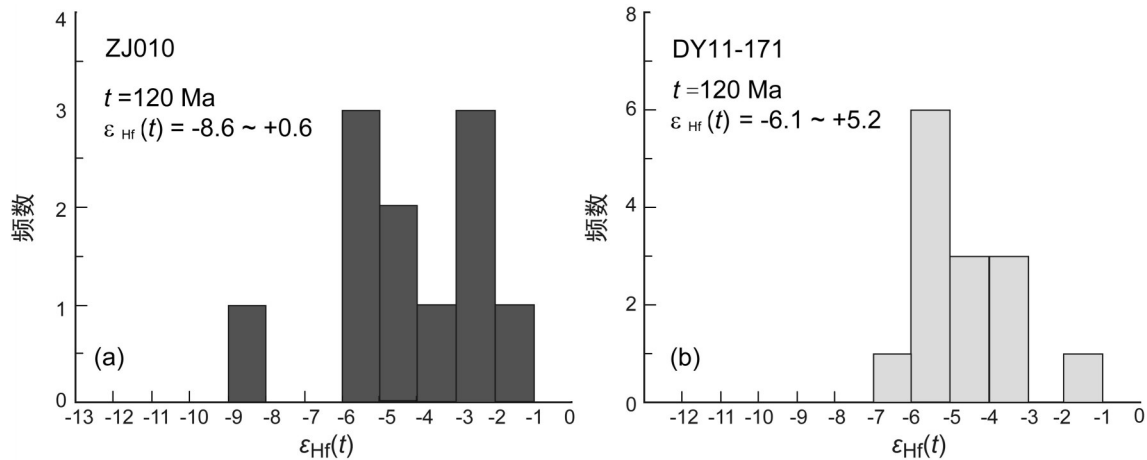


图7 浙江天台白鹤岩体的锆石 Hf 同位素直方图

Fig. 7 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ histogram of the host-granite and dark enclave samples from Baihe pluton in Tiantai, Zhejiang Province

前人研究认为,在花岗岩成岩过程中,幔源组分参与的重要性和普遍性已日益为地质学家们所重视,因为其不仅可以为地壳物质的重熔形成花岗岩浆提供热源,同时还可以作为物质组分直接参与到花岗岩的形成中。有学者研究认为,I型花岗岩普遍被认为是壳幔混源的产物,而部分S型花岗岩的成岩过程中也可能与幔源组分的参与有关(Clemens,2003)。幔源组分参与花岗岩形成的观点已毋庸置疑,但对其以何种具体的演化方式参与花岗岩成岩过程则存在着不同的认识。一种观点认为,幔源组分首先通过底侵或内侵作用诱发地壳物质发生重熔形成长英质岩浆,进而与其发生混合,形成花岗岩;而另一种观点则认为,幔源岩浆先是通过底侵或内侵作用形成初生地壳,进而在后期热事件的影响下,由初生地壳物质发生局部重熔形成花岗岩。由于花岗岩主要是由地壳物质发生部分熔融而形成的产物,因此,对于壳幔混源的I型花岗岩,多数学者主张第二种观点(Pitcher et al.,1985; Wu et al.,2003)。众多研究也显示,锆石U-Pb年龄较均一,而其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围大的特点指示寄主岩的形成应经历了来自不同源区的岩浆混合过程,如澳大利亚的Lachlan和New England褶皱带中已确定的I型、S型花岗岩(Belousova et al.,2006; Kemp et al.,2007)、挪威南部的Telemark花岗岩(Andersen et al.,2007)以及中国辽东的古道岭花岗岩(Yang et al.,2007)等。对于中国东南沿海浙闽一带晚中生代岩浆作用过程中的壳幔作用以及岩浆混合现象已

有大量的文献表述,也获得了丰富的研究成果(周新民等,1992;陈荣等,2005;张晓琳等,2005;董传万等,2007;刘亮等,2011,2012;王对兴等,2013;杨金豹等,2013;颜丽丽等,2015)。

本文研究的白鹤岩体中寄主岩及暗色包体的年龄分别为120.4 Ma和120.6 Ma,表明它们近于同时侵位,从而从结晶时间上排除了暗色包体来源于深部固体岩石发生熔融时的残留体或浅部围岩捕虏体的可能性,从年代学上证明了岩体的形成可能存在着岩浆混合作用(莫宣学等,2007),MgO-TFeO图解(图8a)也反映了岩浆混合的特征。另外,寄主花岗岩(样品ZJ010)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围较大,为-8.6~+0.6(图7),也反映出其岩浆来源的不均一性。综合以上特征,笔者认为,在晚中生代早白垩世中晚期,浙江东部地区可能发生了大范围的成熟地壳的强烈再造和深熔作用,华夏古老地壳的熔融产物和幔源组分在浅地层发生岩浆混合作用,形成于约120 Ma的白鹤岩体及其附近的儒岙(董传万等,2007,2008,2009)岩体、小将岩体(王对兴等,2013)等都可能是由这种壳幔作用及岩浆混合作用再经过岩浆分离结晶作用而成。

6.3 成岩构造背景

在经典微量元素(Y+Nb)-Rb构造环境判别图解中,白鹤岩体中的寄主花岗岩样品均落入后碰撞花岗岩区域(图8b)。在 SiO_2 - K_2O 图解中,岩石也均属于高钾钙碱性系列。前人研究认为,高钾钙碱性系列岩浆岩是后碰撞岩浆活动的重要特征之一(Liégeois et

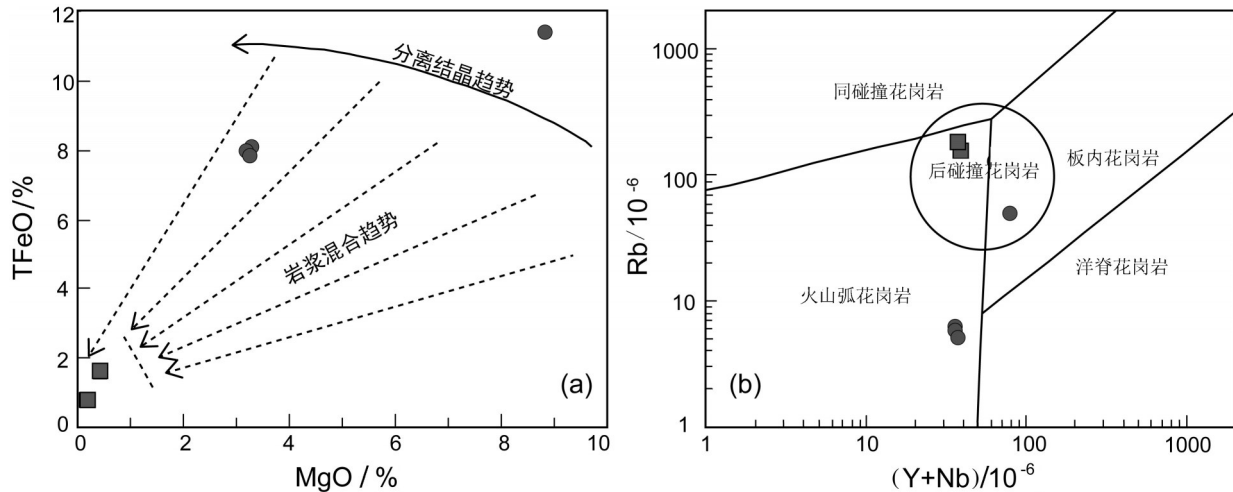


图8 浙江天台白鹤岩体MgO-TFeO图解(a底图据Zorpi et al.,1991)和(Y+Nb)-Rb图解(b底图据Pearce et al.,1984)(图例同前)
Fig.8 The diagrams of MgO versus TFeO (a after Zorpi et al., 1991) and w(Y+Nb) versus w(Rb) (b after Pearce et al., 1984) from Baihe pluto in Tiantai, Zhejiang Province

al.,1998)。因此,从地球化学特征上来看,白鹤岩体中寄主花岗岩应具有后碰撞花岗岩的特征。

研究认为,在浙东地区出现的一系列含有暗色包体(或脉体)的花岗质岩体中,寄主花岗岩及其中发育的暗色闪长质包体不是由简单的基底地壳物质发生部分熔融而成,而是岩浆混合作用的产物。对中国东南部构造演化的研究结果也表明,在中生代晚期,特别是早白垩世,是亚洲东部大陆开始裂解的重要时期。在这一时期,中国东南沿海区域构造应力场由燕山早期的挤压体制转变为引张体制(任纪舜,1990;宋传忠等,2019),进而发生了一系列伸展-减薄构造活动,这期活动不但在该区域形成了一系列NE-NNE向展布的断陷盆地群(舒良树等,2002),同时也造就了以中酸性岩浆岩为主的“大火成岩省”的出现(王德滋等,2005)。

从产出的地质背景来看,本文所研究的白鹤岩体位于浙闽沿海构造-岩浆活动带上。尽管前人对中国东南部中生代岩浆作用的构造动力地质背景存在着诸多争论,如包括太平洋板块俯冲、洋壳消减、交代的地幔楔脱水熔融、玄武质岩浆底侵中、下地壳导致深部地壳部分熔融、进而导致两种以上岩浆混合作用等岩浆作用过程或成因模式,或是上述多种作用过程的叠加(Albarède,1998;Zhou et al., 2006)。但就浙闽沿海地区晚中生代岩浆岩而言,目前公认的是它们应形成于因古太平洋板块俯冲而诱发的弧后伸展引张环境,而地壳的伸展拉张有

利于幔源基性玄武质岩浆发生底侵作用,在这种底侵基性岩浆带来的热的作用下,促使壳源物质发生部分熔融形成酸性花岗质岩浆(Zhou et al.,2006),进而与之发生岩浆混合作用。因此,造成了中国东南部浙闽沿海一带分布有大量的钙碱性花岗质岩体及复合火成岩这一事实,其成因过程可能存在壳幔相互作用及岩浆混合作用(陈荣等,1999;董传万等,2007,2008,2009)。但值得探讨的是,由于这两种岩浆之间存在较大的密度差、温度差和黏度差,使得彼此在地壳深部不能充分混合形成均一的派生岩浆,其主要表现可能为简单的机械混合(Fernandez et al.,1991)。这种情况下,没有发生完全混合的基性岩浆经过一定的酸性成分的加入或进一步演化就表现出闪长质的特征,并在长英质岩浆中发生淬冷结晶,形成暗色闪长质包体。需要说明的是,白鹤岩体中寄主花岗岩 Sr、P、Ti 等元素的显著亏损,及发育较强的钨负异常,这些特征暗示其初始岩浆在上升侵位过程中存在一定程度的分异演化作用。

综合以上特征,笔者认为浙东地区广泛发育的花岗质岩体中存在的大量暗色闪长质包体是在大的伸展引张构造背景下,由底侵的幔源岩浆与其诱发熔融的深部壳源岩浆经壳幔相互作用及岩浆混合作用后,经过一定程度的分异演化,最后在地壳浅部定位的产物,这种构造成因上的特征与浙江望海岗岩体及福建漳浦复式岩体极为相似(邱检生

等, 2011, 2012)。

7 结 论

通过对浙东天台地区白鹤岩体中寄主花岗岩及其暗色包体进行岩石学、元素地球化学、锆石 U-Pb 年龄及锆石 Hf 同位素的研究, 初步得出以下几点认识:

(1) 白鹤岩体分为寄主花岗岩及暗色包体, 其中寄主花岗岩主要岩性为钾长花岗岩, 粒度从细粒到粗粒不等; 而暗色包体主要岩性为(辉长)闪长岩。

(2) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 寄主花岗岩形成年龄为(120.4±1.2)Ma, 暗色包体形成年龄为(120.6±1.1)Ma, 在误差范围内表现为同时期形成, 表明白鹤岩体的侵入年龄约为 120 Ma, 为晚中生代早白垩世中期岩浆活动的产物。寄主花岗岩及暗色包体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 变化范围较大(分别为 -8.1~-1.9, -6.1~-1.4), 都具有较老的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄(分别为 881~1109 Ma, 876~1021 Ma), 指示岩体的形成可能存在不同来源物质(壳幔混源)的贡献, 且有古老地壳成分的参与成岩。

(3) 寄主岩石为高钾钙碱性花岗岩系列, 富硅、弱过铝质、具较强的 Eu 负异常, 富集 Rb、Th、U、K、Pb 等大离子元素, 相对亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P、Ti 等元素; 而暗色包体多为低钾拉斑玄武系列, 极个别呈现出弱钾玄质特征, 贫硅、富钠、偏铝质, 具弱的 Eu 正异常, 在微量元素上与寄主花岗岩有较大的差别。其地球化学特征均显示白鹤岩体岩石为同熔型或 I 型花岗岩, 寄主岩来自于中—新元古代成熟地壳重熔, 而暗色包体则可能来源于亏损地幔组分, 发生较低程度的岩浆混合作用。

(4) 白鹤岩体为后碰撞拉张构造背景下的岩浆产物, 是在中国东南沿海地区燕山晚期总体伸展的构造背景下, 由来自地幔楔的基性玄武质岩浆经演化, 并与由其诱发形成的壳源长英质岩浆发生壳幔作用及岩浆混合作用所形成, 并在成岩过程中发生不同程度的分异演化作用。

致谢: 两位审稿专家为论文的完善提出的宝贵意见和建议; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析得到了中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室侯可军和郭春丽两位

博士的大力支持, 在此一并表示感谢。

注释

①浙江省区域地质大队. 1973. 1:50 万浙江省地质图。

References

- Albarède F. 1998. The growth of continental crust[J]. *Tectonophysics*, 296(1): 1-14.
- Andersen T, Griffin W L, Sylvester A G. 2007. Sveconorwegian crustal underplating in southwestern Fennoscandia: LA-ICP-MS U-Pb and Lu-Hf isotope evidence from granites and gneisses in Telemark, southern Norway[J]. *Lithos*, 93(3): 273-287.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605-626.
- Belousova E A, Griffin W L, O'reilly S Y. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from Eastern Australian granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 47(2): 329-353.
- Blake S, Fink J H. 2000. On the deformation and freezing of enclaves during magma mixing[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95: 1-8.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Henderson P, Rare Earth Elements Geochemistry[J]. Amsterdam: Elsevier: 63-144.
- Browne B L, Eichelberger J C and Patino L C. 2006. Generation of porphyritic and equigranular mafic enclaves during magma recharge events at Unzen volcano, Japan[J]. *Journal of Petrology*, 47(2): 301-328.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8(2): 173-174.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 272: 1-26.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.
- Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Yin Chunsheng, Foland K A. 1991. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age of some Mesozoic intrusive rocks in the southeast of Zhejiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7(3): 37-44 (in Chinese with English abstract).
- Chen Rong, Zhou Jincheng. 1999. Information of crust-mantle interaction implied in Early Cretaceous composite lavas and dikes from eastern Zhejiang[J]. *Geological Review*, 45(supp.): 784-795 (in Chinese with English abstract).
- Chen Rong, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Shen Jialin, Zhou Yuzhang. 2005. Study on Beizhang and Lianglong granites and their dark enclaves[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11

- (2): 264–275(in Chinese with English abstract).
- Chen Xijie, Zhang Kuihua, Zhou Jian. 2016. Geochronology and geochemistry characteristics of the Early Permian monzogranite and dioritic enclaves of East Tianshan and their tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2334–2354(in Chinese with English abstract).
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth Science Review*, 61:1–18.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200.
- Cui Jiawei, Zheng Youye, Sun Xiang, Wu Shun, Gao Shunbao, Tian Liming, Sun Junyi, Yangchao. 2016. Origin of granodiorite and mafic microgranular enclave in Saizhisi, Qinghai Province: Zircon U–Pb geochronological, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints[J]. *Earth Science*, (7): 1156–1170(in Chinese with English abstract).
- Dong Chuanwan, Peng Yaming. 1994. Qingtian composite body—the coexisting of two different types of granites[J]. *Journal of Zhejiang University(Natural Science)*, 28(4):440–448(in Chinese with English abstract).
- Dong Chuanwan, Xu Xisheng, Yan Qiang, Lin Xiubin, Zhu Guoqiang. 2007. A new case of Late Mesozoic crust–mantle interaction in eastern Zhejiang: Geochronology and geochemistry of the Ru’ao diabase–granite composite intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1303–1312(in Chinese with English abstract).
- Dong Chuanwan, Yang Shufeng, Tang Limei, Du Zhenyong. 2008. Petrology and geochemistry of the Xinchang composite igneous complexes, Zhejiang and their geological implication[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 365–376(in Chinese with English abstract).
- Dong Chuanwan, Shen Zhongyue, Du Zhenyong, Yang Yongfeng, Gu Hongyan. 2009. A new case of Late Mesozoic magma mixing in eastern Zhejiang: Discovery of the Ruao enclave swarms, Xinchang County and its geological implication[J]. *Journal of Zhejiang University(Science Edition)*, 36(2):224–230(in Chinese with English abstract).
- Eсна–Ashari A, Hassanzadeh J, Valizadeh M V. 2011. Geochemistry of microgranular enclaves in Aligoodarz Jurassic arc pluton, western Iran: Implications for enclave generation by rapid crystallization of cogenetic granitoid magma[J]. *Mineralogy and Petrology*, 101(3/4): 195–216.
- Ferla P, Melic. 2006. Evidence of magma mixing in the “Daly Gap” of alkaline suites: A case study from the enclaves of Pantelleria (Italy) [J]. *Journal of Petrology*, 47(8): 1467–1507.
- Fernandez A N, Barbarin B. 1991. 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, Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology*. Amsterdam: Elsevier: 263–276.
- Frost C D, Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 52(1): 39–53.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zhidan. 1999. The structure and composition of the crust in eastern China[J]. *Science in China(Series D)*, 29(3): 204–213(in Chinese).
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O’Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U–Pb and Hf–isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131: 231–282.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O’Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237–269.
- Hawkesworth C J, Kemp A I S. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution[J]. *Chem. Geol.*, 226: 144–162.
- Hoskin P, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139–155.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U–Pb zircon dating using laser ablation–multi ion counting–ICP–MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation–MC–ICP–MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract).
- Kaygusuz A, Aydınçakır E. 2009. Mineralogy, whole-rock and Sr–Nd isotope geochemistry of mafic microgranular enclaves in Cretaceous Dagbasi granitoids, Eastern Pontides, NE Turkey: evidence of magma mixing, mingling and chemical equilibration[J]. *Chemie der Erde–Geochemistry*, 69(3): 247–277.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, Paterson B A, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf–O isotopes in zircon[J]. *Science*, 315(5814): 980–983.
- Kinny P D, Maas R. 2003. Lu–Hf and Sm–Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327–341.
- Kumar S, Rino V. 2006. Mineralogy and geochemistry of microgranular enclaves in Palaeoproterozoic Malanjkhanda granitoids, central India: Evidence of magma mixing, mingling, and chemical equilibration[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 591–609.
- Liao S Y, Jiang Y H, Jiang S Y, Yang W Z, Zhou Q, Jin G D, Zhao P.

2010. Subducting sediment-derived arc granitoids: Evidence from the Datong pluton and its quenched enclaves in the western Kunlun orogen, northwest China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 100(1/2): 55-74.
- Liégeois J P, Navez J, Hertogen J, Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization[J]. *Lithos*, 45(1/4): 1-28.
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Li Zhen. 2011. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of quartz monzonite and enclosed mafic enclaves in Muchen Pluton, Zhejiang Province: Tracing magma mixing in their petrogenesis[J]. *Geological Review*, 57(3): 327-336 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Li zhen, Li Youlian. 2012. Petrogenesis of the Early Cretaceous quartz monzonite pluton at Muchen in Longyou County, Zhejiang Province: Evidences from elemental and isotopic geochemistry of mafic microgranular enclaves and their host rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3993-4006 (in Chinese with English abstract).
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, Yuan H L, Hu Z C. 2007. Simultaneous in situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 1257-1264.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C. 2010. 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537-571.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 4: 1-71.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635-643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 37: 215-224.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Liu Chengdong, Chen Hongwei, Yuan Wanming, Liu Yunhua. 2007. Granitoids and crustal growth in the east-Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403-414 (in Chinese with English abstract).
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, Miller J S, Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 255(1): 231-235.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- Pitcher W S. 1983. Granite: typology, geological environment and melting relationships[J]. *Migmatites, melting and metamorphism*: 277-287.
- Pitcher W S, Atherton M P, Cobbing E J, Beckinsale R D. 1985. *Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes*[M]. Glasgow: Blackie-Halsted Press.; 1-238.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Brent I A McInnes. 1999. Geochemistry and petrogenesis of the I- and A-type composite granite masses in the coastal area of Zhejiang and Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237-246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Li Zhen, Liu Liang, Zhao Jiaolong. 2012. Petrogenesis of the Zhangpu composite granite pluton in Fujian Province: constraints from zircon U-Pb ages, elemental geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 561-576 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Liu Liang, Li Zhen. 2011. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of quartz syenite from Wanghaigang pluton in Huangyan County, Zhejiang Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1557-1572 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468-2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 1990. On the geotectonics of southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 275-288 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22: 47-263.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3): 249-260 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, (48): 26-30 (in Chinese with English abstract).
- Song Chuanzhong, Li Jiahao, Yan Jiayong, Wang Yangyang, Liu Zhendong, Yuan Fang, Li Zhenwei. 2019. A tentative discussion on some tectonic problems in the east of South China continent[J]. *Geology in China*, 46(4): 704-722 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313-345.
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332-335 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust Its Composition and Evolution*[J]. United States: Blackwell Scientific

- Publications :1-312.
- Wang Dezi, Xie Lei. 2008. Magma Mingling: Evidence from Enclaves[J]. Geological Journal of China Universities, 14(1): 16-21(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhou Jincheng. 2005. New progress in studying the large igneous province[J]. Geological Journal of China Universities, 11(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Duixing, Li Chunlin, Gao Wanli, Wang Zongxiu, Zhao Zhidan. 2013. Late Mesozoic magma mixing in eastern Zhejiang Province: Evidence from U-Pb geochronology and geochemistry of Xiaojiang pluton in Xinchang[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3993-4003(in Chinese with English abstract).
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Wu F Y. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Gondwana Research, 19(1): 244-259.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66(3): 241-273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Mao J W, Zhao H J. 2011. zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China[J]. Lithos, 125:693-710.
- Xie Lei, Wang Dezi, Wang Rucheng, Qiu Jiansheng, Chen Xiaoming. 2004. Complex zoning texture in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo granitic complex, Zhejiang Province: record of magma mixing[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(6): 1397-1408 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng. 2008. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China[J]. Geological Journal of China Universities, 14(3): 283-294(in Chinese with English abstract).
- Xue Yushan, Liu Zhenjiang, Wang Jianping, Cheng Shaobo. 2014. Characteristics of mafic microgranule enclaves(MMEs) [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(1): 20-30(in Chinese with English abstract).
- Yan Lili, He Zhenyu, Liu Lei, Zhao Zhidan. 2015. Magma mixing in the Yandangshan volcanic-intrusive complex, Zhejiang Province: Evidence from feldspar zoning of the mafic microgranular enclave[J]. Geological Bulletin of China, 34(2):466-473(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 153(2): 177-190.
- Yang Jinbao, Sheng Dan, Zhao Zhidan, Ding Cong, Zhou Hongfang, Cui Yuanyuan, Jiang Ting, Hu Zhaochu. 2013. Petrogenesis and implications of granites and associated dioritic enclaves in Jiamei area, Zhangzhou, Fujian Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 4004-4010(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolin, Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Wang Rucheng, Xu Xisheng, Chen Xiaoming. 2005. Geochemistry and magmatic mixing of the Putuoshan biotite mylonites and their enclaves, Zhejiang Province[J]. Acta Petrologica et Mineralgica, 24(2): 81-92(in Chinese with English abstract).
- Zhao K D, Jiang S Y, Yang S Y, Dai B Z, Lu J J. 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China[J]. Gondwana Research, 22(1): 310-324.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 29(1): 26-33.
- Zhou Xinmin, Yao Yupeng, Xu Xisheng. 1992. Quenched enclaves in Dajushan granitoid and their genesis, east Zhejiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 8(3): 234-242(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Yanli, Cheng Xiyin, Tian Ye. 2016. Geological and geochemical characteristics of xenoliths in Yaogangxian granite, Hunan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralgica, (1):16-32(in Chinese with English abstract).
- Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B. 1991. Hybridization between felsic and mafic magmas in calc-alkaline granitoids: A case study in northern Sardinia, Italy[J]. Chemical Geology, 92(1/3): 45-86.

附中文参考文献

- 陈江峰, 周泰禧, 印春生, Foland K A. 1991. 浙东南某些中生代侵入岩体的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄测定[J]. 岩石学报, 7(3):37-44.
- 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 沈加林, 周宇章. 2005. 浙东白垩纪北漳和梁弄花岗岩体及其暗色岩石包体研究[J]. 高校地质学报, 11(2): 264-275.
- 陈荣, 周金城. 1999. 浙东早白垩世复合岩流和岩墙中蕴含的壳幔作用信息[J]. 地质论评, 45(增刊):784-795.
- 陈希节, 张奎华, 周健. 2016. 东天山哈密地区早二叠世花岗岩体及镁铁质包体的年代学、岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 90(9): 2334-2354.
- 崔加伟, 郑有业, 孙祥, 吴松, 高顺宝, 田立明, 孙君一, 杨超. 2016. 青海省赛支寺花岗岩闪长岩及其暗色包体成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 地球科学, (7): 1156-1170.
- 董传万, 彭亚鸣. 1994. 青田复式岩体: 两种不同类型花岗岩的复合[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 28(4): 440-448.
- 董传万, 徐夕生, 闫强, 林秀斌, 竺国强. 2007. 浙东晚中生代壳幔相互作用的新例证——新昌儒岙辉绿岩-花岗岩复合岩体的年代

- 学与地球化学[J]. 岩石学报, 23(6): 1303-1312.
- 董传万, 杨树锋, 唐立梅, 杜振永. 2008. 浙江新昌复合式火成杂岩的岩石学、地球化学及其地质意义[J]. 高校地质学报, 14(3): 365-376.
- 董传万, 沈忠悦, 杜振永, 杨永峰, 顾红艳. 2009. 浙东晚中生代岩浆混合作用新证据: 新昌儒鸟岩石包体群的发现与地质意义[J]. 浙江大学学报(理学版), 36(2): 224-230.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学: D 辑, 29(3): 204-213.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. 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, 23(10): 2595-2604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 刘亮, 邱检生, 李真, 李友连. 2012. 浙江龙游沐尘早白垩世石英二长岩体的成因: 镁铁质包体及寄主岩的元素与 Sr-Nd 同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 28(12): 3993-4006.
- 刘亮, 邱检生, 李真. 2011. 浙江沐尘石英二长岩及其镁铁质包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成——对岩浆混合作用的示踪[J]. 地质论评, 57(3): 327-336.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403-414.
- 邱检生, 刘亮, 李真. 2011. 浙江黄岩望海岗石英正长岩的锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的制约[J]. 岩石学报, 27(6): 1557-1572.
- 邱检生, 李真, 刘亮, 赵姣龙. 2012. 福建漳浦复式花岗岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Nd-Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 86(4): 561-576.
- 邱检生, 王德滋, McInnes B I. 1999. 浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因[J]. 岩石学报, 15(2): 237-246.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 24(11): 2468-2484.
- 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, 4: 275-288.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚古中生代构造作用[J]. 地质论评, 48(3): 249-260.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊): 26-30.
- 宋传中, 李加好, 严加永, 王阳阳, 刘振东, 袁芳, 李振伟. 2019. 华南大陆东部若干构造问题的思考[J]. 中国地质, 46(4): 704-722.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 332-335.
- 王德滋, 周金城. 2005. 大火成岩省研究新进展[J]. 高校地质学报, 11(1): 1-8.
- 王德滋, 谢磊. 2008. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. 高校地质学报, 14(1): 16-21.
- 王对兴, 李春麟, 高万里, 王宗秀, 赵志丹. 2013. 浙东早白垩世岩浆混合作用: 新昌小将岩体 U-Pb 年代学及地球化学证据[J]. 岩石学报, 29(11): 3993-4003.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 谢磊, 王德滋, 王汝成, 邱检生, 陈小明. 2004. 浙江普陀花岗岩杂岩体中的石英闪长质包体: 斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录[J]. 岩石学报, 20(6): 1397-1408.
- 徐夕生. 2008. 华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题[J]. 高校地质学报, 14(3): 283-294.
- 薛玉山, 柳振江, 王建平, 成少博. 2014. 花岗岩暗色微粒包体特征及其研究方向[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 20-30.
- 颜丽丽, 贺振宇, 刘磊, 赵志丹. 2015. 浙江雁荡山火山-侵入杂岩的岩浆混合作用——暗色包体中长石环带的证据[J]. 地质通报, 34(2): 466-473.
- 杨金豹, 盛丹, 赵志丹, 丁聪, 周红芳, 崔圆圆, 蒋婷, 胡兆初. 2013. 福建漳州角美花岗岩与闪长质包体的岩石成因及意义[J]. 岩石学报, 29(11): 4004-4010.
- 张晓琳, 邱检生, 王德滋, 王汝成, 徐夕生, 陈小明. 2005. 浙江普陀山黑云母钾长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, 24(2): 81-92.
- 周新民, 姚玉鹏, 徐夕生. 1992. 浙东大衢山花岗岩中淬冷包体及其成因机制[J]. 岩石学报, 8(3): 234-242.
- 祝新友, 王艳丽, 程细音, 田野. 2016. 湖南瑶岗仙花岗岩体中包体的地质地球化学特征与岩浆演化[J]. 岩石矿物学杂志, (1): 16-32.