

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.316



南秦岭沙河湾和曹坪花岗岩体年代学、 地球化学特征及其构造意义

黄倩雯^{1,2}, 时毓^{1,2*}, 刘明辉^{1,2}, 刘希军^{1,2}, 柏治安^{1,2}, 覃康乐^{1,2}

1. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 桂林理工大学, 广西桂林 541004

2. 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 桂林理工大学, 广西桂林 541004

摘要: 对南秦岭沙河湾和曹坪岩体花岗岩进行了地球化学、锆石 U-Pb 年龄和锆石 Lu-Hf 同位素分析。地球化学分析显示, 两个岩体富碱、富镁, 属于高钾钙碱性准铝质 I 型花岗岩。轻、重稀土分馏明显, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 等, 亏损重稀土元素和高场强元素 Nb、Ta、Ti、Y 和 Yb 等, 大部分样品的 Eu 元素显示无异常或弱正异常 ($\delta\text{Eu}=1.00\sim 1.12$), 仅有一个样品 Eu 元素为中等负异常 ($\delta\text{Eu}=0.66$)。锆石 U-Pb 年龄分析显示, 沙河湾岩体和曹坪岩体的岩浆结晶年龄分别为 214~207 Ma 和 215~212 Ma; 锆石 Hf 同位素分析显示沙河湾岩体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.38\sim 1.81$, 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 为 1.30~1.11 Ga; 曹坪岩体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.0\sim 3.1$, $t_{\text{DM}2}$ 为 1.29~1.03 Ga。沙河湾和曹坪岩体中的绝大部分样品具有相似的岩石学、形成时代、地球化学及锆石 Lu-Hf 同位素特征, 显示两岩体具有同源性。研究表明, 两个岩体的母岩浆来源于中元古代地壳与地幔物质的混合, 形成于后碰撞阶段发生拆沉作用的伸展阶段。指示勉略洋在晚三叠世之前已完全闭合, 扬子板块和华北板块碰撞造山运动已达到后期。

关键词: 岩石学; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 沙河湾和曹坪岩体; 南秦岭。

中图分类号: P581; P597

文章编号: 1000-2383(2018)S2-0081-22

收稿日期: 2018-03-24

Geochronology and Geochemistry of the Shahewan and Caoping Granites in South Qinling and Their Significance

Huang Qianwen^{1,2}, Shi Yu^{1,2*}, Liu Minghui^{1,2}, Liu Xijun^{1,2}, Bai Zhian^{1,2}, Qin Kangle^{1,2}

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: This study presents the granites from the Shahewan and Caoping plutons in South Qinling area, including their geochemical, geochronological, and zircon Lu-Hf isotopic compositions. Based on the geochemical analyses, the two plutons exhibit high alkali and MgO contents and belong to metaluminous I-type granite of high-K calc-alkaline series. The samples show evident fractionation of light rare earth elements (LREE) and heavy rare earth elements (HREE), as the samples are enriched in LREE and large ion lithophile elements (LILE, e.g., Rb, Ba and Sr) and relatively depleted in HREE and high-field-strength elements (HFSE, e.g., Nb, Ta, Ti, Y, and Yb). Most of the samples exhibit slightly or no positive Eu anomalies except for one sample showing moderate negative anomaly. LA-ICP-MS U-Pb zircon age analyses indicate that the magmatic crystallization age of the Shahewan pluton is 214–207 Ma while the Caoping pluton is 215–212 Ma. Zircon Hf isotopic analyses show that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are between -1.38 and $+1.81$ and the two-stage model ages ($t_{\text{DM}2}$) are 1.30–1.11 Ga for the Shahewan pluton. Correspondingly, the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are -1.0 to $+3.1$ and $t_{\text{DM}2}$ values of 1.29–1.03 Ga for the Caoping pluton. Nearly all the samples in the Shahewan and Caoping plutons display similar characteristics of petrology, geochronology, geochemistry and zircon Lu-Hf isotopes, indicating homologous evolution. It is concluded that the parental magma of the two plutons is a mixture of Mesoproterozoic crust and mantle and the plutons formed during the extensional delamination stage of the post-collisional stage. The Mianlue Ocean closed completely before the Late Triassic, at which time the collisional orogeny between the Yangtze and North China blocks was in the late stage.

Key words: petrology; geochemistry; U-Pb zircon ages; Hf isotopes; Shahewan and Caoping plutons; South Qinling.

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos.41562005, 41302155); 广西自然科学基金 (Nos.2016GXNSFAA380001, 2017GXNSFBA198167).

作者简介: 黄倩雯 (1992—), 硕士研究生, 主要从事岩石学研究. ORCID: 0000-0002-3553-2934. E-mail: HuangQW_31@163.com

* **通讯作者:** 时毓, E-mail: shiyu_61@163.com

引用格式: 黄倩雯, 时毓, 刘明辉, 等, 2018. 南秦岭沙河湾和曹坪花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义. 地球科学, 43 (Suppl. 2): 81–102.

0 引言

秦岭造山带是华北板块和扬子板块的碰撞聚合带,其地壳组成和构造特征复杂,是一条复合型大陆造山带(时毓等, 2009, 2014; Shi *et al.*, 2013, 2017, 2018; 毕诗健, 2016; Dong and Santosh, 2016; Dong *et al.*, 2016). 南秦岭以北部的商南—丹凤(商丹)缝合带和南部的勉县—略阳(勉略)缝合带为界,是秦岭造山带的重要组成部分. 早—中古生代,南秦岭洋盆向北俯冲形成北部的商丹缝合带(Meng and Zhang, 1999); 中—晚古生代,南秦岭继续向北俯冲碰撞,南部的勉略古洋盆逐渐打开并持续扩张发育,形成独立的南秦岭微陆块(Dong *et al.*, 2011; Ping *et al.*, 2013); 晚古生代—早中生代,勉略古洋盆向北俯冲消减(董云鹏等, 2008; Dong *et al.*, 2011); 早中生代,扬子板块与南秦岭碰撞,形成了南部的勉略缝合带(张成立等, 2005; 许志琴等, 2012)(图1a). 但有关华

北板块和扬子板块沿勉略缝合带的最终碰撞拼贴时间,仍存在较大争议. 根据早石炭世放射虫化石的出现,被认为其碰撞时间为早石炭世之后(Feng *et al.*, 1996); 根据 245~200 Ma 的同碰撞和后碰撞花岗岩判定其碰撞时间为中—晚三叠世(Dong *et al.*, 2016; Dong and Santosh, 2016); 此外,南秦岭高压麻粒岩相峰期变质作用的时代为 241~215 Ma,折返过程中的退变质作用的时间为 220~184 Ma(梁莎等, 2013).

在中生代,南秦岭的强烈造山运动引发了大量花岗质岩浆基底的侵入,这些岩浆在上升过程中记录了秦岭造山带构造演化的重要信息,研究这些侵入体的地质学、地球化学和年代学特征,对反演秦岭造山带的构造演化过程具有重要意义. 秦岭造山带广泛分布三叠纪花岗岩,南秦岭大量的年代学资料表明其花岗岩的侵位时代集中于 225~200 Ma(Wang *et al.*, 2011, 2015; 李佐臣等, 2013; Li *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018). 对南秦

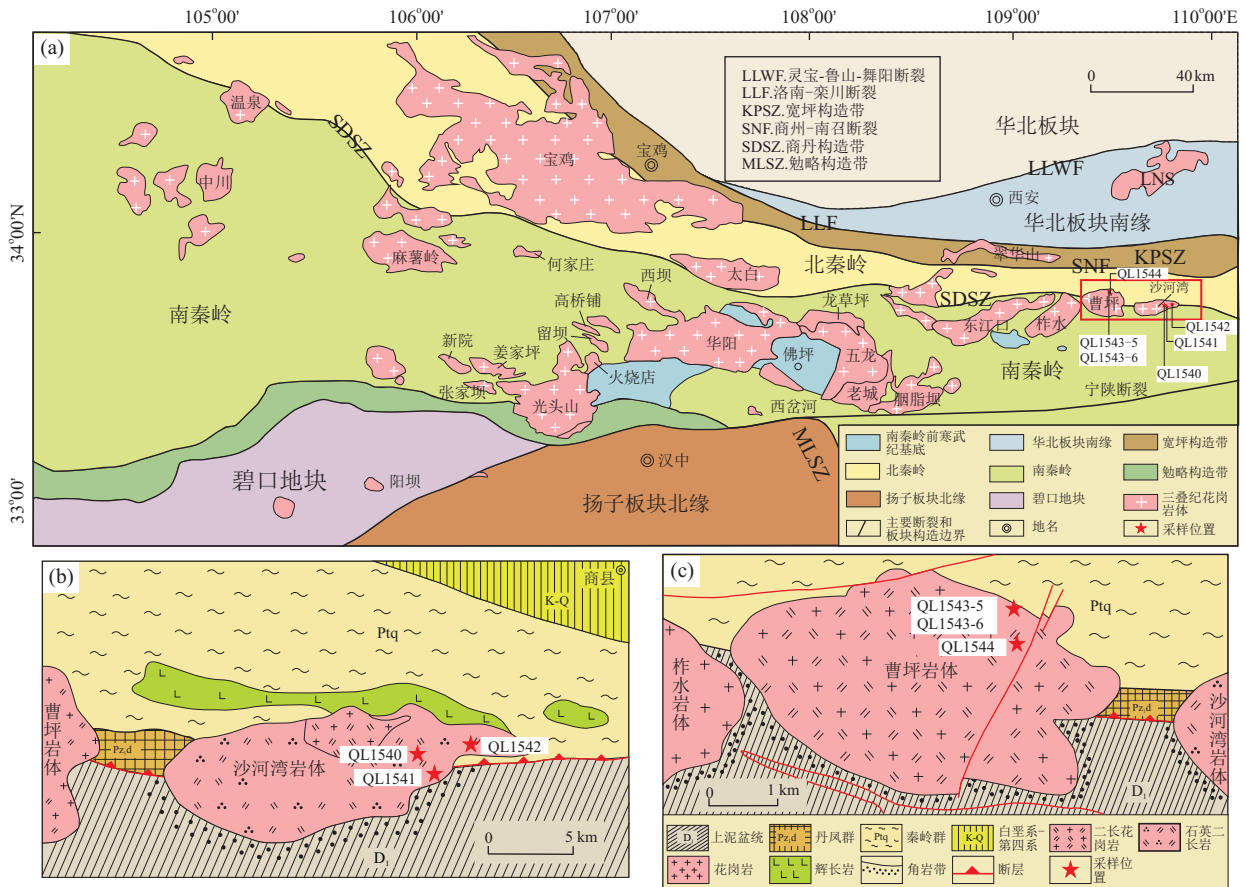


图 1 (a) 秦岭中生代花岗岩分布地质简图; (b) 沙河湾岩体地质简图; (c) 曹坪岩体地质简图

Fig.1 (a) Distribution map of Late Triassic granite plutons in the Qinling orogenic belt; (b) geological sketch map of the Shahewan granite pluton; (c) geological sketch map of the Caoping granite pluton

a. 改自 Hu *et al.*(2016) 和 Lu *et al.*(2017); b. 改自 Lu *et al.*(1996); c. 改自印纯清 (1993)

岭花岗岩的成因, 一直以来存在着很大的争议, 部分学者认为这些岩体具有壳源特点 (Zhang *et al.*, 1996), 且这些花岗岩体与扬子板块基底具有相似的放射性成因 Pb 同位素特征 (韦龙猛等, 2016), 表明南秦岭三叠纪花岗岩主要源自扬子板块基底; 近几年, 通过研究花岗岩中锆石的 Lu-Hf 同位素特征发现, 这些花岗岩主要源自扬子板块, 但有幔源物质的加入 (张成立等, 2005, 2009; Wang *et al.*, 2007; 弓虎军等, 2009; 何宇, 2018); 也有学者对这一观点提出了质疑, 认为这些花岗岩不同于大别造山带加厚下地壳起源的埃达克质岩石, 南秦岭下地壳镁铁质岩石发生 20%~30% 的部分熔融也可形成 (路应辉, 2017). 关于这一时期花岗岩形成的构造背景, 有俯冲过程中花岗岩侵位 (Li *et al.*, 2015)、同碰撞 (周滨等, 2008)、同碰撞晚期或后碰撞 (Wang *et al.*, 2015) 和同碰撞过程中的板片断离环境 (Bao *et al.*, 2015) 等不同的认识.

对南秦岭中生代花岗岩的研究, 可进一步探究其地壳组成特征, 并为其壳—幔演化历史和造山带的构造演化格局提供重要信息, 因此本文选取东江口岩体群中的中生代沙河湾岩体和曹坪岩体为研究对象, 以期对南秦岭中生代花岗岩的形成机制及形成时的构造环境提供重要信息. 沙河湾岩体被认为由环斑花岗岩组成, 代表拉张环境的环斑花岗岩对研究南秦岭的演化历史及华北板块和扬子板块沿勉略缝合带的拼贴缝合历史具有重要的研究意义. 前人对该岩体群进行了大量的研究, 但对其成因和构造环境的认识仍存在分歧. 在构造属性方面, 主要争议为沙河湾岩体是否为典型的奥长环斑花岗岩, 形成于华北板块与扬子板块碰撞之前 (Li *et al.*, 2015), 或碰撞造山作用过程中的同碰撞、后碰撞或伸展阶段 (张宗清等, 1999; 卢欣祥等, 2003; 王晓霞和卢欣祥, 2003; Sun *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2006; 周滨等, 2008; 弓虎军等, 2009; Wang *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2016). Li *et al.* (2015) 研究得到南秦岭三叠纪 S 型及 I 型花岗岩与碳酸盐岩岩墙的形成时间一致, 认为南秦岭三叠纪花岗岩形成于活动大陆边缘环境, 远在扬子板块与华北板块碰撞的时间之前. 卢欣祥等 (2003) 和张宗清等 (1999) 认为该岩体具有环斑结构, 是典型的奥长环斑花岗岩, 代表了秦岭主造山运动结束并向伸展构造环境转变的阶段; 王晓霞和卢欣祥 (2003) 及王晓霞等 (2002) 从矿物学角度出发, 认为沙河湾岩体中的暗色矿物具有 A 型花岗岩特征, 从而判断

该岩体具有 I-A 型过渡的特征. 部分学者 (Zhou *et al.*, 2006; 周滨等, 2008; 弓虎军等, 2009) 认为沙河湾岩体虽具环斑结构, 但并非奥长环斑花岗岩, 不能标识造山运动结束和伸展构造运动开始. Sun *et al.* (2006) 和周滨等 (2008) 发现沙河湾岩体具有与南秦岭同碰撞花岗岩相似的地球化学特征, 故将该岩体划分到南秦岭同碰撞花岗岩系列中; 弓虎军等 (2009) 认为沙河湾和曹坪岩体形成于同碰撞向后碰撞转变的环境; Wang *et al.* (2007) 测得东江口岩体群的锆石 U-Pb 年龄晚于扬子板块与华北板块发生全面碰撞的年龄及大别—苏鲁造山带榴辉岩相的变质年龄, 认为该岩体群应形成于后碰撞构造环境; Wang *et al.* (2011) 认为沙河湾岩体及其包体以及邻近的煌斑岩脉为同时期产物, 代表了伸展应力条件下的后碰撞构造环境.

在沙河湾岩体和曹坪岩体的形成机制方面, 也存在较大的争议. 部分学者认为南秦岭花岗岩是拆沉作用形成 (Lu *et al.*, 1996; 张成立等, 2005; 秦江锋等, 2007; 弓虎军等, 2009), 认为扬子板块向华北板块碰撞造山的过程中, 使得消减带下地壳的镁铁质岩石发生超高压变质作用形成榴辉岩, 因榴辉岩比重大, 与地壳发生分离而进入软流圈, 发生拆沉作用, 地幔物质上涌发生减压熔融形成基性岩浆并诱使下部的地壳发生减压熔融, 地壳也由挤压状态转变为伸展状态. 因此, 下部的基性岩浆在浮力作用下进入酸性岩浆房, 两者进行机械混合上升后, 形成后碰撞花岗岩. 部分学者认为这些花岗岩的形成主要源于俯冲消减板块的断离, 从而使软流圈物质上侵所致 (Hu *et al.*, 2016).

在前人的研究基础上, 本文对沙河湾及曹坪岩体进行了全岩主量、微量元素分析、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析及锆石 Lu-Hf 同位素分析, 进一步厘定这些岩体的侵位时代并分析岩石成因, 进一步探讨其形成的构造环境, 为华北板块与扬子板块的最终碰撞拼贴时间提供依据, 并为秦岭造山带的构造演化格局提供信息.

1 地质概况和样品特征

1.1 地质概况

北秦岭出露的地层由老到新依次为秦岭杂岩、宽坪群、丹凤群和二郎坪群. 秦岭杂岩夹持于朱夏断裂与商丹缝合带之间 (王涛等, 1997), 主要由黑云母斜长片麻岩、钙硅酸盐岩和石墨大理岩组成, 夹少量

变基性火山岩,原岩为一套成熟度低的陆源碎屑岩(杂砂岩)夹碳酸盐岩的沉积建造(张本仁等,2002;时毓等,2009,2014)。最近,Shi *et al.*(2018)把秦岭杂岩中的新元古代变质沉积岩划分为上、中、下3个岩性单元。宽坪群位于北秦岭最北部,可分为两部分:一为部分变沉积岩,包括原岩为陆缘碎屑岩的云母石英片岩—片麻岩和原岩为碳酸盐岩的大理岩类;另一部分是原岩为基性火山岩的绿片岩类,其中夹有后期侵入于变质火山岩中的斜长角闪岩岩脉(第五春荣等,2010;Li *et al.*,2015)。丹凤群的主体为变玄武岩,含少量变中性火山岩(安山岩)的火山岩系,伴有少量变碎屑沉积岩(张本仁等,2002;Dong *et al.*,2011);二郎坪群由碎屑岩构造岩片和蛇绿岩构造岩片组成(Liu and Zhang,2013)。北秦岭出露的岩体自东向西为翠华山岩体、太白岩体和宝鸡岩体,为海西—印支运动的产物(张本仁等,2002;Xue *et al.*,2018)(图1a)。

南秦岭出露的地层主要为鱼洞子群、陡岭群、佛坪群、武当群、郧西群和耀岭河群。鱼洞子群自下而上为斜长角闪岩、角闪混合岩、浅粒岩夹少量斜长角闪岩、斜长角闪岩夹浅粒岩、角闪磁铁矿石英岩、浅粒岩夹绢云片岩、绿泥片岩和磁铁矿石英岩,岩石遭受角闪岩相变质改造(张宗清等,2001)。陡岭群由黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩、石墨片岩及少量斜长角闪岩和大理岩组成(Zhang *et al.*,2010)。佛坪群主体是片麻岩和斜长角闪岩(张本仁等,2002)。武当群和郧西群均由石英角斑岩、角斑岩、英安岩、流纹岩和火山岩等组成,伴有少量细碧岩(张本仁等,2002)。耀岭河群以变质玄武质火山岩(熔岩、火山碎屑岩或凝灰岩)为主,夹少量变酸性火山岩和变泥质岩(Zhu *et al.*,2014)。如图1a所示,南秦岭中生代花岗岩群主要有3个,自东向西分别为东江口岩体群(包括沙河湾、曹坪、柞水和东江口等岩体)、五龙岩体群和光头山岩体群(孟旭阳等,2013)。

南秦岭沙河湾岩体出露于陕西商州市南20 km的沙湾、牛槽一带,紧邻商丹断裂带南侧发育。该岩体北部侵位于北秦岭造山带前寒武纪秦岭杂岩混合片麻岩、加里东期拉鸡庙辉长岩和元古宙—古生代的丹凤群变质火山岩中;南部侵位于泥盆纪刘岭群中部的黑云母角岩、钙质板岩以及石炭纪二峪河组的砂岩、粉砂岩、板岩和石灰岩中(图1b)(Lu *et al.*,1996;Wang *et al.*,2007;刘春花等,2013)。岩体以中粗和中细粒似斑状黑云角闪石英二长岩为主,从接触

带向内,岩石类型依次为巨斑状黑云角闪二长花岗岩、含巨斑黑云角闪石英二长岩、中粗粒似斑状黑云角闪石英二长岩、中细粒似斑状黑云角闪石英二长岩,环斑结构和暗色包体由岩体边部向中心逐渐减少。岩体的北部被岩石类型为细粒黑云二长花岗岩和含斑角闪黑云石英二长岩的油岭岩体侵入(王晓霞和卢欣祥,2003)。岩体围岩中有煌斑岩及中基性岩脉侵入,暗示岩体在形成过程前后有幔源岩浆加入(张成立等,2009;刘春花等,2013)。

曹坪岩体出露于沙河湾岩体西侧10 km处,位于商丹断裂带南侧,与围岩呈侵入接触关系,其北部侵入于前寒武纪秦岭杂岩变质结晶岩块中,接触变质带混染和蚀变现象不明显;南部侵入于泥盆纪刘岭群的板岩中,接触热变质作用强烈(图1c)(印纯清,1993;弓虎军等,2009)。岩体主要由边缘相的中—粗粒黑云母花岗岩闪长岩和中心相的中—细粒黑云母二长花岗岩组成(路应辉,2017)。

1.2 样品特征

沙河湾岩体样品QL1540采自松树嘴乡附近(GPS:109°47'46"E,33°45'42"N)(图2a),样品QL1541采自203省道旁(GPS:109°48'32"E,33°45'24"N)(图2b),样品QL1542采自尧河南岸(GPS:109°49'59"E,33°46'20"N)(图2c),这3个样品均为角闪石英二长岩。岩石呈肉红色,具似斑状结构,基质为中—细粒结构,似斑晶主要为条纹长石,呈自形—半自形板柱状,内部包裹有细小的石英、斜长石,具卡氏双晶,边部被钠长石不均匀交代,含量5%~10%;基质主要由斜长石(35%~40%)、条纹长石(30%~35%)和石英(10%~15%)组成,含少量普通角闪石(5%~7%)和黑云母(1%~3%),副矿物为磁铁矿(<1%)、榍石(<1%)、磷灰石(<1%)和锆石(<1%)。斜长石轻微绢云母化,钾长石轻微高岭土化,斜长石发育环带构造;普通角闪石和黑云母弱绿泥石化。样品QL1541颗粒较QL1540粗大,基质具中—粗粒结构。岩体北缘含形态各异、大小不一的闪长质包体。

曹坪岩体样品QL1543-5和QL1543-6采自307省道西900 m处(GPS:109°33'25"E,33°48'52"N)(图2d~2e),为黑云角闪花岗岩闪长岩,中—细粒结构,主要组成矿物为斜长石(40%~45%)、钾长石(17%~18%)和石英(20%~25%),含少量黑云母(5%~7%)和普通角闪石(8%~10%),副矿物为磁铁矿(<1%)、榍石(<1%)、磷灰石(<1%)和锆石(<1%)。

斜长石发育聚片双晶, 偶见环带构造, 轻微绢云母化; 钾长石由条纹长石和少量正长石组成, 呈半自形板柱状—他形不规则状, 边部被钠长石不均匀交代; 石英呈他形粒状填充在长石间隙中; 普通角闪石和黑云母轻微绿泥石化。样品 QL1544 采自蓝田县葛牌镇庙沟 (GPS:109°32'48"E, 33°47'15"N)(图2f), 为二长花岗岩, 中—粗粒花岗结构, 主要由钾长石 (40%~45%)、斜长石 (29%~31%)、石英 (20%~25%) 和少量黑云母 (3%~5%) 组成, 副矿物为磁铁矿

(<1%)、榍石 (<1%)、磷灰石 (<1%) 和锆石 (<1%)。钾长石由条纹长石组成, 呈半自形板柱状—他形不规则状, 内部含细小的石英、斜长石包裹体, 轻微高岭土化, 边部被细小的钠长石不均匀交代; 斜长石聚片双晶发育, 可见环带构造, 轻微绢云母化; 石英呈他形粒状填充在长石间隙中; 黑云母呈鳞片状, 弱绿泥石化。在岩体边部可见大小不一、略定向排列的闪长质暗色包体。

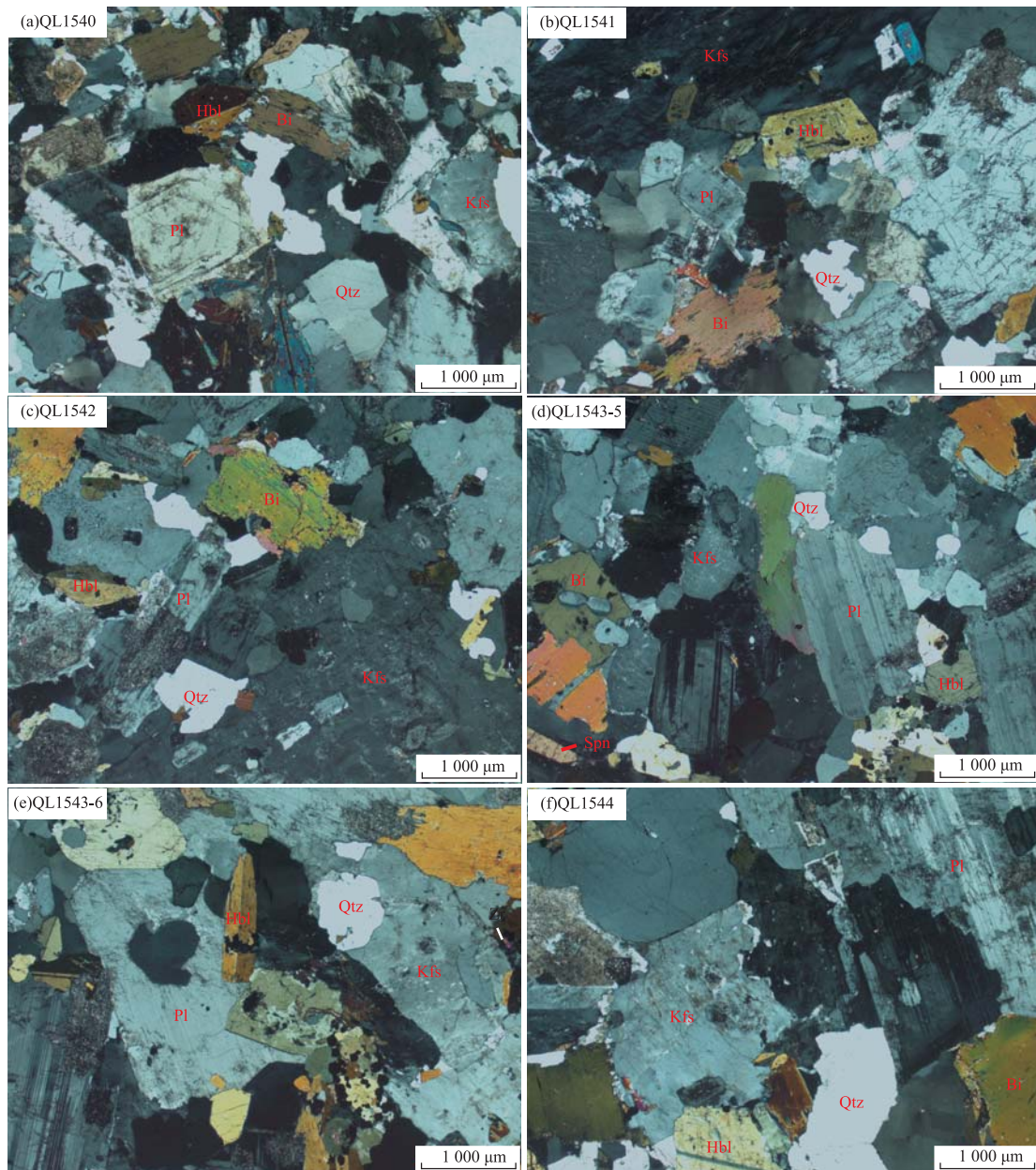


图 2 沙河湾和曹坪岩体的显微图像

Fig.2 Photomicrographs of Shahewan and Caoping plutons

a. 沙河湾角闪石英二长岩; b. 沙河湾角闪石英二长岩; c. 沙河湾角闪石英二长岩; d. 曹坪黑云角闪花岗岩闪长岩; e. 曹坪黑云角闪花岗岩闪长岩; f. 曹坪二长花岗岩; Bi. 黑云母; Hbl. 普通角闪石; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Spn. 榍石

2 样品分析方法

本文岩石样品的主量元素成分在南京大学现代分析中心运用 ARL9800XP + 型 X 射线荧光光谱分析仪 (XRF) 测定, 分析精度优于 2% (Franzini *et al.*, 1972). 微量元素成分在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 Finnigan Element II ICP-MS 测定, 分析精度优于 10%, 且绝大多数优于 5%. 锆石分选采用传统的方法进行淘选, 首先选取新鲜无风化样品粉碎至 60 目以下, 并用磁选和重液浮选的方法初步富集锆石, 然后在双目镜下挑选出晶形完好的锆石制成锆石靶, 对锆石进行透射光、反射光和 CL 图像拍摄. 阴极发光 (CL) 显微图像在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成拍摄. 锆石 U-Pb 年龄测定在南京大学内生金属矿床成

矿机制研究国家重点实验室完成, 测试在 7500a 型 ICP-MS 与 Merchantek/New Wave Research 213 nm 激光熔蚀探针联机上进行, 剥蚀激光束斑直径为 32 μm . 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成, 剥蚀激光束直径为 50 μm . 锆石 U-Pb 年龄测试和 Lu-Hf 同位素分析均以标准锆石 91500 作为外部标样, 对同位素分馏进行校正. 锆石谐和图用 ISOPLOT 程序 (ver4.15) 完成绘制, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 采用平均大陆壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 计算 (Griffin *et al.*, 2002).

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

沙河湾岩体和曹坪岩体的全岩地球化学分析结果如表 1 所示.

表 1 沙河湾和曹坪岩体主量 (%) 和微量 (10^{-6}) 分析结果

Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Shahewan and Caoping plutons

岩体	沙河湾岩体			曹坪岩体		
	角闪石英二长岩	角闪石英二长岩	角闪石英二长岩	黑云角闪花岗岩闪长岩	黑云角闪花岗岩闪长岩	二长花岗岩
样品号	QL1540	QL1541	QL1542	QL1543-5	QL1543-6	QL1544
SiO ₂	66.33	65.96	65.54	63.66	60.77	67.29
TiO ₂	0.62	0.53	0.64	0.76	0.71	0.48
Al ₂ O ₃	14.02	14.46	14.70	15.07	12.97	14.35
Fe ₂ O ₃ ^T	4.61	4.53	4.98	5.16	7.21	4.35
MnO	0.17	0.18	0.16	0.13	0.21	0.19
MgO	2.34	2.21	2.41	2.78	4.07	1.71
CaO	2.90	3.03	3.18	3.84	5.34	2.54
Na ₂ O	4.06	4.19	4.16	3.91	3.26	3.85
K ₂ O	3.60	3.52	3.66	3.44	3.47	4.13
P ₂ O ₅	0.19	0.16	0.19	0.15	0.20	0.08
LOI	1.23	1.01	0.10	0.61	1.39	0.97
Total	100	99.8	99.7	99.5	99.6	99.9
Li	24.7	29.3	24.3	27.2	17.4	32.5
Be	3.28	3.34	2.99	3.01	4.31	3.39
Sc	8.64	8.63	9.57	11.81	17.88	7.07
Ti	3758	3190	3867	4581	4353	2917
V	68.0	62.2	68.8	94.8	158.4	53.2
K	30 275	29 556	30 481	28 879	29 302	34 650
P	833	722	825	645	903	344
Cr	81.5	77.3	81.9	80.8	199.1	53.6
Mn	638	630	676	805	1812	555
Co	17.5	17.1	18.2	24.6	32.0	14.4
Ni	72.4	66.4	71.1	75.1	125.8	44.5
Cu	500	11.0	12.5	19.4	27.5	6.80
Zn	56.4	54.5	61.2	64.0	107.0	46.3
Ga	19.1	18.8	19.2	19.4	18.7	18.4
Rb	102	109	102	88.7	59.7	124
Sr	633	614	649	581	428	480
Y	15.2	16.1	17.7	18.0	28.6	20.7
Zr	209	180	228	175	392	146
Nb	20.6	20.8	19.4	22.8	19.9	19.9
Mo	0.77	0.69	0.84	1.24	1.75	0.88
Mn	638	630	676	805	1 812	555
Sn	1.65	1.52	2.12	1.78	2.77	1.43
Cs	3.19	5.44	4.98	8.64	4.52	7.16

续表 1

岩体 岩性	沙河湾岩体			曹坪岩体		
	角闪石英二长岩	角闪石英二长岩	角闪石英二长岩	黑云角闪花岗岩闪长岩	黑云角闪花岗岩闪长岩	二长花岗岩
样品号	QL1540	QL1541	QL1542	QL1543-5	QL1543-6	QL1544
Ba	1 402	1 299	1 509	1 183	636	1 208
La	38.7	37.1	42.3	36.1	51.9	29.5
Ce	69.8	64.9	80.3	66.5	93.7	51.5
Pr	9.32	8.43	10.11	8.15	11.34	6.16
Nd	30.4	27.5	35.5	28.9	41.6	21.3
Sm	5.08	4.55	5.95	5.00	7.58	3.66
Eu	1.62	1.49	1.84	1.65	1.59	1.29
Gd	4.29	3.90	5.04	4.45	6.76	3.28
Tb	0.59	0.53	0.70	0.64	1.02	0.47
Dy	2.92	2.70	3.54	3.45	5.54	2.53
Ho	0.54	0.49	0.65	0.66	1.06	0.48
Er	1.47	1.33	1.73	1.78	2.84	1.32
Tm	0.26	0.24	0.31	0.33	0.53	0.25
Yb	1.59	1.45	1.90	2.04	3.36	1.57
Lu	0.23	0.21	0.27	0.30	0.51	0.23
Hf	6.04	5.30	6.64	5.12	11.32	4.56
Ta	1.14	1.13	1.75	1.41	1.79	1.35
W	0.25	0.21	0.35	0.32	0.58	0.38
Pb	79.3	55.8	51.8	50.4	41.2	62.8
Bi	2.16	0.50	0.88	1.03	1.93	0.72
Th	12.2	14.7	15.4	13.6	19.6	20.0
U	3.39	2.76	2.70	3.45	5.58	3.43
Na ₂ O+K ₂ O	7.67	7.71	7.82	7.35	6.73	7.98
Na ₂ O/K ₂ O	1.13	1.19	1.14	1.14	0.94	0.93
Mg [#]	54	53	53	56	57	48
A/CNK	0.88	0.89	0.89	0.88	0.69	0.93
A/NK	1.32	1.35	1.36	1.48	1.42	1.33
σ	2.52	2.59	2.71	2.62	2.55	2.62
ΣREE	167	155	190	160	229	124
LREE	155	144	176	146	208	113
HREE	11.9	10.8	14.1	13.6	21.6	10.1
LREE/HREE	13.0	13.3	12.4	10.7	9.61	11.2
La _N /Yb _N	17.4	18.4	16.0	12.7	11.1	13.5
Nb/Y	2.21	1.99	2.60	2.32	3.89	1.90
Rb/Ba	3.13	3.04	3.24	3.03	4.78	2.83
Zr/Y	59.8	41.3	38.1	34.0	28.9	47.3
δEu	1.03	1.06	1.00	1.05	0.66	1.12
δCe	0.87	0.86	0.92	0.91	0.91	0.89

注: A/CNK = Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO), A/NK = Al₂O₃/(K₂O+Na₂O).

沙河湾岩体 SiO₂ 成分含量为 65.54%~66.33%; TiO₂ 为 0.53%~0.64%; Na₂O/K₂O 为 1.13~1.19; Na₂O+K₂O 为 7.67%~7.82%; 里克曼指数 (σ) 为 2.52~2.71; 铝指数 A/NCK 值介于 0.88~0.89; 镁指数 (Mg[#]) 为 53~54, 大于 45, 含量相对偏高. 曹坪岩体 SiO₂ 成分含量为 60.77%~67.29%; TiO₂ 为 0.48%~0.76%; Na₂O/K₂O 为 0.93~1.14; Na₂O+K₂O 为 6.73%~7.98%; 里克曼指数 (σ) 为 2.55~2.62; A/NCK 值介于 0.69~0.93; Mg[#] 为 48~57, 大于 45.

曹坪和沙河湾岩体铝含量中等, 属于准铝质系列 (图3a). 在 SiO₂-K₂O 图解中 (图3b), 沙河湾和曹坪岩体均落入高钾钙碱性系列的范围. 在 SiO₂-FeO^T/(FeO^T+MgO) 图中 (图3c), 样品均落入 I 型花岗岩类范围, 表明这两个岩体属于 I 型花岗岩. 在

TAS 岩石分类图解上 (图3d), 沙河湾岩体和曹坪岩体样品基本落入石英二长岩范围, 个别落入二长岩范围, 结合岩相学特征, 表明沙河湾和曹坪两个岩体以石英二长岩为主, 本文样品特征与前人基本一致 (Hu *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2017). Hu *et al.* (2016) 中的化学分析点较为分散, 但大多数样品属于准铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩.

沙河湾岩体和曹坪岩体的微量元素和稀土元素特征相似. 两个岩体的球粒陨石稀土配分图 (图4a) 均表现为强烈的轻、重稀土分馏, 整体为右倾型, 具弱的 Eu 正异常或负异常. 沙河湾岩体的稀土元素含量中等 (表1), ΣREE 介于 (155~190)×10⁻⁶; LREE/HREE=12.4~13.3; 轻、重稀土中度分异, (La/Yb)_N 为 16.0~18.4; Eu 显示弱正异常或无异常

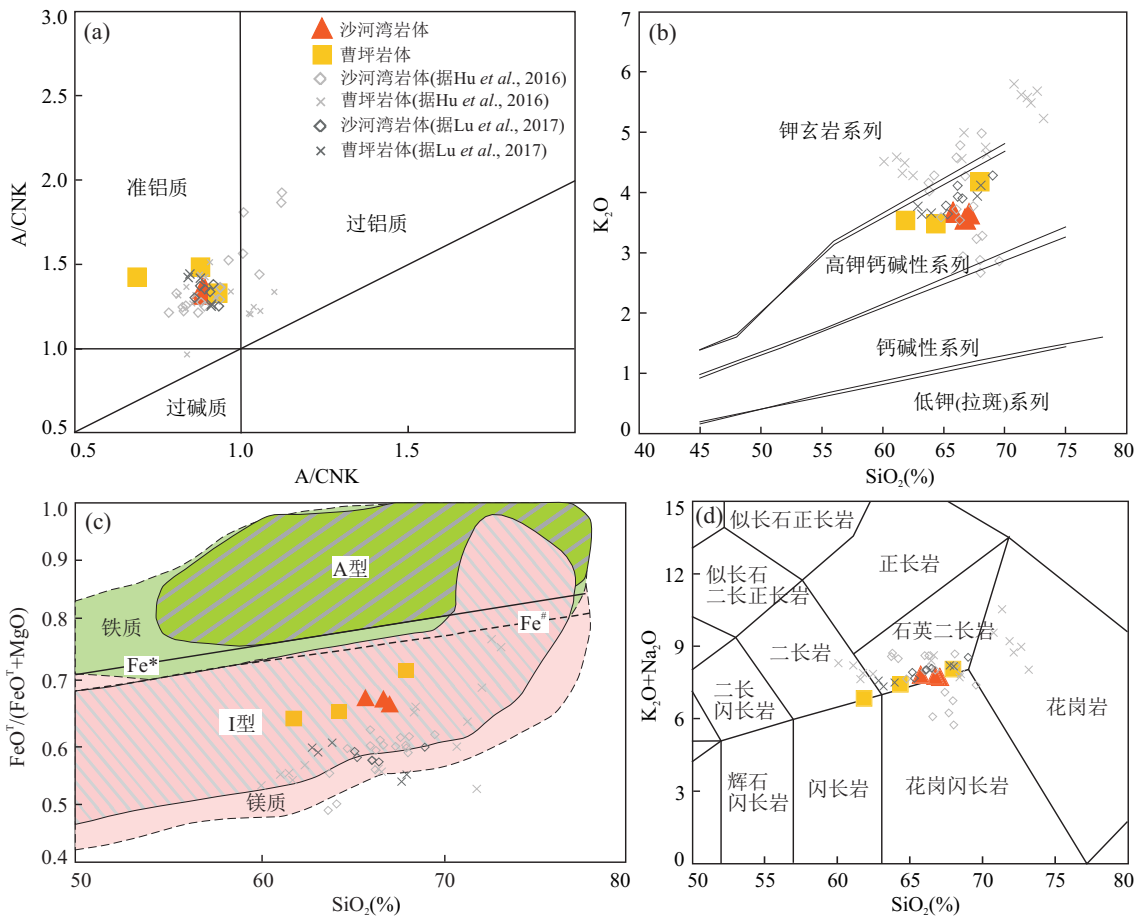


图 3 沙河湾和曹坪岩体 A/NK-A/CNK 图解 (a)、K₂O-SiO₂ 图解 (b)、SiO₂-FeO^T/(FeO^T+MgO) 图解 (c) 及 (Na₂O+K₂O)-SiO₂ 分类图解 (d)

Fig.3 A/NK-A/CNK diagram (a), K₂O-SiO₂ diagram (b), SiO₂-FeO^T/(FeO^T+MgO) diagram (c) and (Na₂O+K₂O)-SiO₂ diagram (d) of granite from Shahewan and Caoping plutons

a 据 Rollinson(1993); b 据 Peccerillo and Taylor(1976); c 据 Frost *et al.*(2001); d 据 Middlemost(1994)

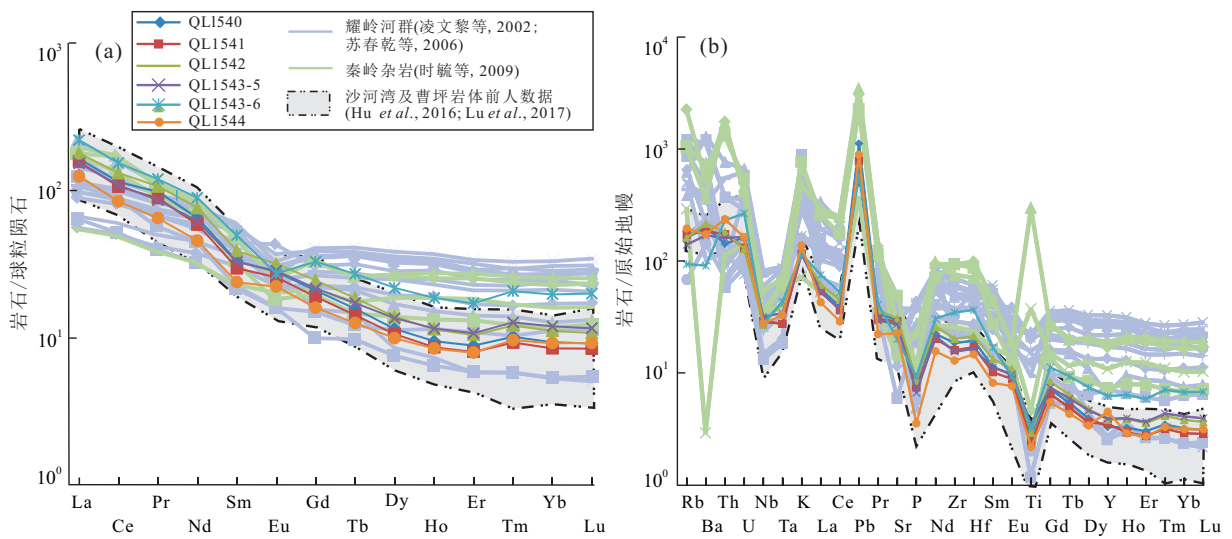


图 4 沙河湾和曹坪岩体花岗岩稀土元素球粒陨石标准化曲线 (a) 和微量元素蛛网图 (b)

Fig.4 REE patterns (a) and spider diagrams for trace elements (b) of granites from the Shahewan and Caoping plutons

原始地幔标准化值和球粒陨石标准化值引自文献 Sun and McDonough(1989)

($\delta\text{Eu}=1.00\sim 1.06$). 曹坪岩体的稀土总含量 ΣREE 介于 $(124\sim 299)\times 10^{-6}$; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $11.1\sim 13.5$; $\delta\text{Eu}=0.66\sim 1.12$. 样品 QL1543-6 显示 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.66$; 表1), 指示源区可能有斜长石的残留或岩浆结晶过程中母岩浆经历了斜长石的结晶分异作用. 如图4b, 样品富集大离子亲石元素 (LILE)Rb、Ba、K 等, 亏损高场强元素 (HFSE)Nb、Ta、Sr、P、Ti、Y 和 Yb 含量较低(表1). 本文大部分样品的稀土配分模式图和微量元素蛛网图特征相似, 推断其可能是同源岩浆演化的产物.

3.2 锆石 U-Pb 定年

沙河湾岩体的 3 个样品 (QL1540、QL1541 和 QL1542) 中的锆石呈自形长柱状或短柱状, 颗粒较大 (长为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$, 宽为 $50\sim 130\ \mu\text{m}$), 长宽比介于 $1.5\sim 3.0$. CL 图像 (图5) 显示锆石发育紧闭的震荡环带, 为岩浆成因锆石. 个别锆石呈圆粒状, 具有继承核, 可能为古老的捕获锆石. 对样品 QL1540(角闪石英二长岩) 中的锆石进行了 21 次 U-Pb 年龄分析 (表2), 其 Th 和 U 含量变化较大, 分别为 $(42\sim 474)\times 10^{-6}$ 和 $(152\sim 745)\times 10^{-6}$, 其 Th/U 值大部分大于 0.40(均值为 0.52), 符合岩浆成因锆石特征 (Wu and Zheng, 2004). 该样品中 17 颗锆石的年龄集中在 $212\sim 203\ \text{Ma}$, 加权平均年龄为 $207\pm 1\ \text{Ma}$ (谐和度大于 95%, $\text{MSWD}=1.03$)(图6a). 有 4 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较大 (年龄为 $414\sim 308\ \text{Ma}$), 可能是岩浆上升过程中从围岩或其他区域捕获的锆石. 对样品 QL1541(角闪石英二长岩) 中 25 颗锆石进行了 U-Pb 的年龄测定 (表2), 其中 Th、U 含量变化于 $(83\sim 556)\times 10^{-6}$ 和 $(212\sim 852)\times 10^{-6}$, Th/U 值大部分大于 0.40(均值为 0.49). 该样品中的 21 颗锆石年龄集中于 $214\sim 201\ \text{Ma}$, 加权平均年龄为 $208\pm 2\ \text{Ma}$ (谐和度大于 95%, $\text{MSWD}=1.6$)(图6b). 有 4 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较高 ($313\sim 299\ \text{Ma}$), 可能为捕获的围岩锆石. 样品 QL1542(角闪石英二长岩) 中 22 颗锆石的 Th 和 U 含量分别为 $(45\sim 592)\times 10^{-6}$ 和 $(156\sim 734)\times 10^{-6}$, Th/U 比为 $0.29\sim 1.49$ (均值为 0.61)(表2). 其中 16 颗锆石的年龄较集中 ($221\sim 207\ \text{Ma}$), 平均为 $214\pm 2\ \text{Ma}$ (谐和度大于 95%, $\text{MSWD}=1.12$). 其余 6 颗捕获锆石的年龄集中于 $395\sim 304\ \text{Ma}$ (表2, 图6c).

曹坪岩体的 3 个样品 (QL1543-5、QL1543-6 和 QL1544) 的锆石呈长柱状或短柱状, 晶形完好, 大

部分锆石颗粒较大, 长度为 $130\sim 260\ \mu\text{m}$, 宽为 $60\sim 100\ \mu\text{m}$, 长/宽比为 $1.5\sim 2.5$. CL 图像显示锆石发育紧闭的震荡环带, 为岩浆成因锆石 (图5). 样品 QL1543-5(黑云角闪花岗岩闪长岩) 中的 24 颗锆石的 Th、U 含量为 $(135\sim 425)\times 10^{-6}$ 和 $(389\sim 742)\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.35\sim 0.85$ (平均为 0.44)(表2), 结合其 CL 特征显示其为岩浆锆石. 该样品中的锆石年龄均谐和 (谐和度大于 95%), 年龄集中于 $223\sim 208\ \text{Ma}$ (均值为 $215\pm 2\ \text{Ma}$, $\text{MSWD}=1.5$). 样品 QL1543-6(黑云角闪花岗岩闪长岩) 中 24 颗锆石的 Th、U 含量分别为 $(119\sim 327)\times 10^{-6}$ 和 $(304\sim 683)\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.28\sim 0.56$ (平均为 0.42), 结合其具岩浆环带的特征, 显示为岩浆锆石. 除 1 颗捕获锆石 (No.9) 年龄较大 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $312\ \text{Ma}$), 其余锆石的谐和年龄集中于 $219\sim 206\ \text{Ma}$, 平均为 $212\pm 2\ \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.5$). 样品 QL1544 为二长花岗岩, 24 颗锆石剥蚀点的 Th、U 的含量为 $(115\sim 380)\times 10^{-6}$ 和 $(224\sim 768)\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.32\sim 0.70$ (平均为 0.44). 除 No.13 锆石 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $314\ \text{Ma}$) 之外, 其余锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 $223\sim 210\ \text{Ma}$, 平均值为 $214\pm 1\ \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.94$).

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素特征

本文对沙河湾岩体中的样品 QL1540、QL1541、QL1542 和曹坪岩体样品 QL1543-5、QL1543-6、QL1544 进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析 (表3), 其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 说明这些锆石形成后的放射性成因 Hf 积累十分有限, 因而测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值能够较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征 (吴福元等, 2007; 张成立等, 2009).

沙河湾岩体样品 QL1540(角闪石英二长岩) 中的 11 颗锆石, 3 颗年龄较老的捕获锆石 (年龄为 $414\sim 308\ \text{Ma}$) 的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 初始比值为 $0.282\ 620\sim 0.282\ 704$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $1.01\sim 6.36$, 二阶段 Hf 模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 为 $1.24\sim 0.98\ \text{Ga}$; 其余 8 颗锆石 ($212\sim 203\ \text{Ma}$) 以它们的形成年龄 $t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄) 计算, 得到的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 初始比值集中在 $0.282\ 639\sim 0.282\ 666$, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.64\sim 0.47$, $t_{\text{DM}2}$ 为 $1.26\sim 1.19\ \text{Ga}$. 本文对样品 QL1541(角闪石英二长岩) 中的 15 颗锆石进行了 16 次 Lu-Hf 同位素分析, 其 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 $0.282\ 619\sim 0.282\ 690$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.38\sim 1.38$, $t_{\text{DM}2}$ 为 $1.30\sim 1.14\ \text{Ga}$. 样品 QL1542(角闪石英二长岩) 中的 10 颗锆石中, 1 颗捕获锆石 (年龄为 $395\ \text{Ma}$)

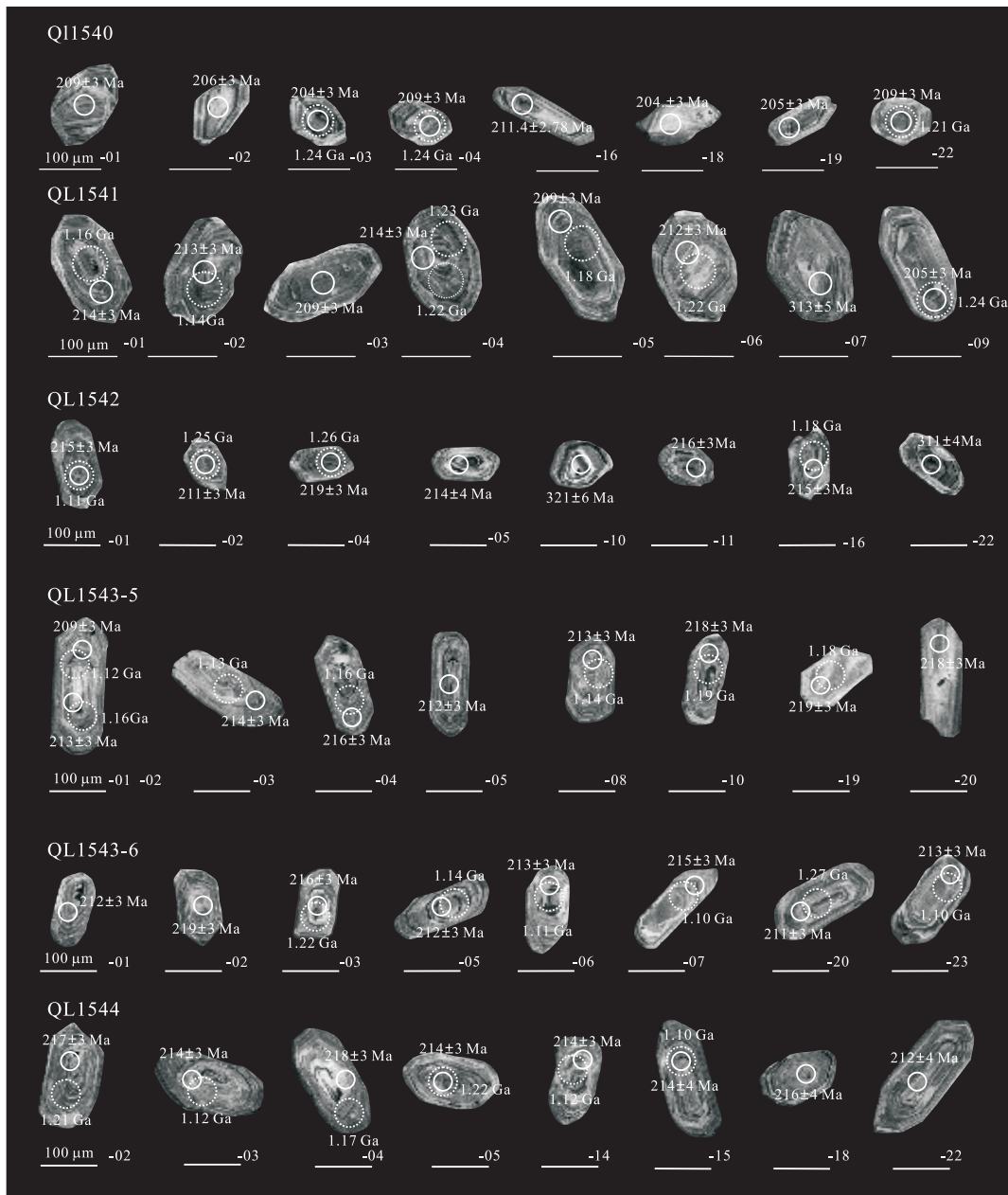


图 5 沙河湾和曹坪岩体锆石的阴极发光 CL 图像

Fig. 5 CL images from representative samples in Shahewan and Caoping plutons showing internal structure and morphology of zircons

图中实圈为锆石 U-Pb 年龄剥蚀点, 虚圈为 Hf 同位素分析点, 图中年龄值分别为 U-Pb 年龄 (Ma) 和 t_{DM2} (Ga)

的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 值为 0.282 773, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 8.37, t_{DM} 为 0.84 Ga; 其余 9 颗锆石 (219~207 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 为 0.282 633~0.282 701, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.59\sim 1.81$, t_{DM2} 为 1.27~1.11 Ga.

对曹坪岩体中的 3 个样品, 样品 QL1543-5 (黑云角闪花岗岩) 中 12 颗锆石 (223~209 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 值集中在 0.282 649~0.282 698, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.04\sim 1.65$, t_{DM2} 为 1.23~1.12 Ga. 样品 QL1543-6 (黑云角闪花岗岩) 中的 15 颗锆石 (218~206 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 值为 0.282 620~0.282 710,

其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.0\sim 2.1$, t_{DM2} 为 1.29~1.09 Ga. 样品 QL1544 (二长花岗岩) 中 14 颗锆石 (218~210 Ma) 的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 值为 0.282 654~0.282 739, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.1\sim 3.1$, t_{DM2} 为 1.22~1.03 Ga.

4 讨论

4.1 岩石成因类型及其源岩

沙河湾岩体和曹坪岩体紧邻商丹断裂带南侧相伴而生, 岩体主要造岩矿物为斜长石、钾长石、石英

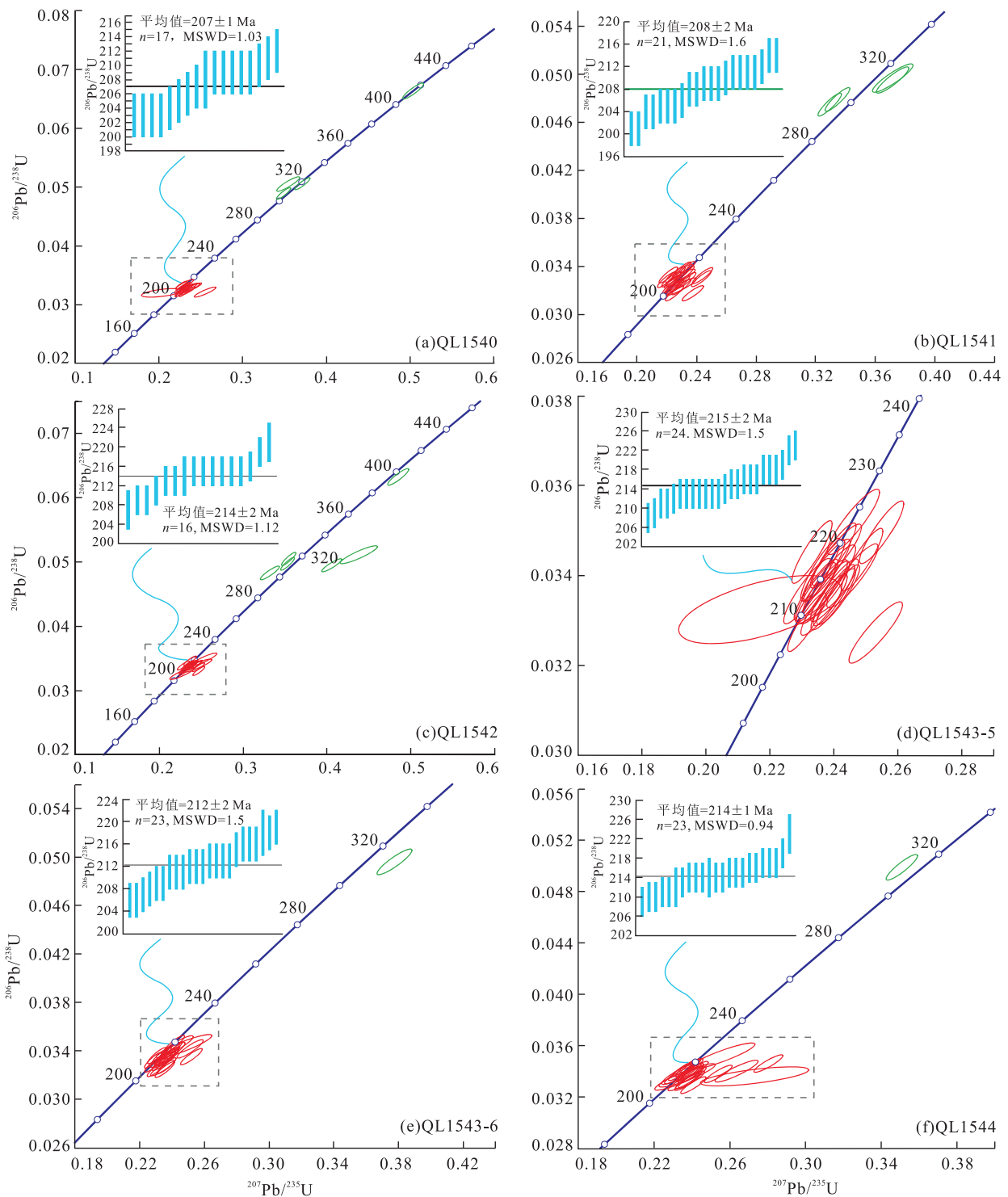


图 6 沙河湾和曹坪岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig.6 Concordia plots for zircons of rocks from the Shahewan and Caoping plutons

和少量的角闪石、黑云母, 未出现富铝矿物, 且均包含有暗色闪长质包体。这两个岩体具有相似的地球化学特征, 其 Ti 含量低, Mg[#] 高, K 含量高, δ<3.3, A/CAN<1.1, 均属于钙碱性准铝质 I 型花岗岩; 微量元素以富集 LILE, 亏损 Nb、Ta 等 HFSE 为特征; 轻重稀土分馏强烈, 表现为轻稀土 (LREE) 富集, 重

稀土 (HREE) 亏损, Eu 具有弱异常或无异常的特征, 表现出类似岛弧 I 型花岗岩类的地球化学属性。两个岩体的结晶年龄比较相近, 沙河湾岩体 3 个样品的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 207±1 Ma、208±2 Ma 和 214±2 Ma, 曹坪岩体 3 个样品的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 215±2 Ma、212±2 Ma 和 214±1 Ma。

表 2 沙河湾和曹坪岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of granites from Shahewan and Caoping plutons

样品	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
角闪石英二长岩 (QL1540) 沙河湾岩体															
-01	287	685	0.42	0.052 18	0.001 21	0.237 13	0.005 57	0.032 96	0.000 46	293	52	216	5	209	3
-02	246	595	0.41	0.051 05	0.001 02	0.228 92	0.004 92	0.032 53	0.000 48	243	45	209	4	206	3
-03	246	523	0.47	0.051 31	0.001 04	0.226 88	0.004 73	0.032 07	0.000 43	255	46	208	4	204	3
-04	265	489	0.54	0.051 71	0.000 81	0.234 54	0.004 06	0.032 90	0.000 44	273	35	214	3	209	3
-05	199	628	0.32	0.051 08	0.000 96	0.225 73	0.004 40	0.032 05	0.000 42	244	43	207	4	203	3
-06	175	357	0.49	0.055 05	0.000 80	0.503 38	0.008 24	0.066 33	0.000 89	414	32	414	6	414	5
-07	474	629	0.75	0.051 71	0.000 72	0.348 72	0.005 56	0.048 91	0.000 65	273	32	304	4	308	4
-08	393	534	0.74	0.053 24	0.000 77	0.371 18	0.006 02	0.050 57	0.000 67	339	32	321	4	318	4
-09	262	697	0.38	0.050 06	0.000 96	0.225 70	0.004 55	0.032 71	0.000 45	198	44	207	4	208	3
-10	284	634	0.45	0.050 53	0.000 88	0.230 87	0.004 30	0.033 15	0.000 45	219	40	211	4	210	3
-11	286	561	0.51	0.050 62	0.000 80	0.230 44	0.004 00	0.033 02	0.000 44	224	36	211	3	209	3
-12	275	708	0.39	0.049 99	0.001 53	0.230 76	0.007 03	0.033 49	0.000 54	195	70	211	6	212	3
-13	275	566	0.49	0.052 03	0.000 78	0.229 93	0.003 83	0.032 05	0.000 43	287	34	210	3	203	3
-14	471	714	0.66	0.050 86	0.001 23	0.354 22	0.009 02	0.050 52	0.000 81	234	55	308	7	318	5
-16	383	657	0.58	0.049 29	0.000 94	0.226 54	0.004 47	0.033 34	0.000 45	161	44	207	4	211	3
-17	42	152	0.28	0.052 45	0.001 96	0.237 49	0.008 82	0.032 85	0.000 57	305	83	216	7	208	4
-18	71	279	0.25	0.057 51	0.001 91	0.255 01	0.008 48	0.032 16	0.000 56	511	72	231	7	204	3
-19	411	745	0.55	0.052 60	0.001 37	0.234 25	0.006 15	0.032 30	0.000 48	312	58	214	5	205	3
-20	465	486	0.96	0.052 60	0.001 19	0.234 80	0.005 40	0.032 38	0.000 45	311	51	214	4	205	3
-21	262	453	0.58	0.052 75	0.001 34	0.239 45	0.006 05	0.032 92	0.000 47	318	56	218	5	209	3
-22	244	523	0.47	0.050 07	0.000 82	0.227 34	0.004 09	0.032 93	0.000 45	198	38	208	3	209	3
角闪石英二长岩 (QL1541) 沙河湾岩体															
-01	211	562	0.38	0.049 93	0.000 97	0.232 09	0.004 63	0.033 72	0.000 45	192	45	212	4	214	3
-02	263	565	0.47	0.050 03	0.000 8	0.231 15	0.004 00	0.033 51	0.000 44	196	37	211	3	213	3
-03	246	665	0.37	0.048 53	0.000 88	0.220 00	0.004 13	0.032 88	0.000 43	125	42	202	3	209	3
-04	232	525	0.44	0.049 53	0.000 83	0.230 05	0.004 10	0.033 69	0.000 44	173	39	210	3	214	3
-05	317	593	0.53	0.049 17	0.000 94	0.223 20	0.004 40	0.032 93	0.000 43	156	44	205	4	209	3
-06	218	537	0.41	0.050 50	0.000 85	0.232 15	0.004 13	0.033 35	0.000 44	218	38	212	3	212	3
-07	500	788	0.63	0.054 28	0.001 24	0.371 76	0.009 00	0.049 68	0.000 78	383	50	321	7	313	5
-08	438	752	0.58	0.050 68	0.000 74	0.334 68	0.005 50	0.047 90	0.000 65	226	33	293	4	302	4
-09	264	679	0.39	0.051 66	0.000 90	0.229 78	0.004 17	0.032 26	0.000 42	270	39	210	3	205	3
-10	501	852	0.59	0.050 34	0.000 70	0.329 44	0.005 20	0.047 47	0.000 63	211	32	289	4	299	4
-11	239	618	0.39	0.048 19	0.000 86	0.221 05	0.004 12	0.033 27	0.000 44	109	42	203	3	211	3
-12	207	487	0.43	0.053 30	0.000 93	0.244 08	0.004 50	0.033 22	0.000 44	342	39	222	4	211	3
-13	556	677	0.82	0.054 44	0.000 95	0.371 69	0.007 17	0.049 52	0.000 72	389	38	321	5	312	4
-14	264	651	0.41	0.049 17	0.000 93	0.225 82	0.004 39	0.033 31	0.000 43	156	44	207	4	211	3
-15	273	685	0.40	0.049 52	0.000 76	0.224 12	0.003 76	0.032 83	0.000 43	173	36	205	3	208	3
-16	318	621	0.51	0.054 26	0.001 06	0.237 51	0.004 74	0.031 75	0.000 42	382	44	216	4	202	3
-17	319	774	0.41	0.050 38	0.000 82	0.223 83	0.003 87	0.032 23	0.000 41	212	37	205	3	205	3
-18	207	551	0.37	0.050 36	0.001 41	0.229 44	0.006 36	0.033 05	0.000 47	212	64	210	5	210	3
-19	209	500	0.42	0.050 12	0.000 90	0.223 61	0.004 25	0.033 36	0.000 43	201	41	205	4	205	3
-20	212	568	0.37	0.051 44	0.000 87	0.225 18	0.004 03	0.031 75	0.000 42	261	38	206	3	202	3
-21	214	398	0.54	0.051 47	0.000 93	0.232 87	0.004 43	0.032 82	0.000 44	262	41	213	4	208	3
-22	207	393	0.53	0.050 98	0.000 91	0.228 80	0.004 35	0.032 55	0.000 44	240	41	209	4	207	3
-23	280	547	0.51	0.053 52	0.000 90	0.243 26	0.004 39	0.032 97	0.000 44	351	38	221	4	209	3
-24	83	212	0.39	0.051 43	0.001 65	0.228 92	0.007 25	0.032 28	0.000 49	260	72	209	6	205	3
-25	167	394	0.43	0.050 58	0.000 96	0.224 39	0.004 46	0.032 18	0.000 43	222	43	206	4	204	3
角闪石英二长岩 (QL1542) 沙河湾岩体															
-01	228	552	0.41	0.050 00	0.000 91	0.233 82	0.004 48	0.033 91	0.000 46	195	42	213	4	215	3
-02	287	589	0.49	0.050 24	0.000 92	0.230 38	0.004 42	0.033 26	0.000 45	206	42	211	4	211	3
-03	45	156	0.29	0.052 79	0.002 08	0.253 64	0.009 91	0.034 84	0.000 64	320	87	230	8	221	4
-04	273	569	0.48	0.049 61	0.001 02	0.236 86	0.005 03	0.034 62	0.000 48	177	47	216	4	219	3
-05	164	406	0.40	0.052 38	0.002 71	0.244 19	0.012 23	0.033 81	0.000 70	302	114	222	10	214	4
-06	198	487	0.41	0.050 62	0.000 80	0.234 47	0.004 10	0.033 59	0.000 46	224	36	214	3	213	3
-07	591	610	0.97	0.050 93	0.000 72	0.354 39	0.005 70	0.050 46	0.000 68	238	32	308	4	317	4
-08	309	577	0.54	0.051 73	0.001 20	0.241 44	0.005 69	0.033 86	0.000 48	274	52	220	5	215	3
-09	448	690	0.65	0.053 25	0.001 01	0.246 70	0.004 85	0.033 60	0.000 45	340	42	224	4	213	3
-10	493	556	0.89	0.062 12	0.002 10	0.437 89	0.014 70	0.051 11	0.000 92	678	71	369	10	321	6
-11	364	656	0.55	0.052 18	0.000 91	0.244 62	0.004 51	0.034 00	0.000 45	293	39	222	4	216	3
-12	332	536	0.62	0.050 66	0.000 97	0.237 18	0.004 71	0.033 96	0.000 46	226	44	216	4	215	3
-13	344	669	0.51	0.051 13	0.000 85	0.239 09	0.004 39	0.033 92	0.000 48	247	38	218	4	215	3
-14	270	423	0.64	0.054 29	0.000 96	0.247 11	0.004 73	0.033 01	0.000 46	383	39	224	4	209	3
-15	470	649	0.72	0.051 52	0.000 68	0.353 00	0.005 44	0.049 70	0.000 66	264	30	307	4	313	4
-16	349	701	0.50	0.051 25	0.000 84	0.240 05	0.004 19	0.033 98	0.000 44	252	37	219	3	215	3
-17	77	217	0.36	0.055 63	0.000 86	0.484 92	0.008 27	0.063 23	0.000 85	437	33	401	6	395	5
-18	592	734	0.81	0.049 86	0.001 08	0.331 84	0.007 48	0.048 28	0.000 70	188	50	291	6	304	4
-19	336	225	1.49	0.050 55	0.002 21	0.227 40	0.009 78	0.032 64	0.000 62	220	98	208	8	207	4
-20	351	459	0.77	0.050 49	0.000 77	0.229 68	0.003 90	0.032 99	0.000 44	218	35	210	3	209	3
-21	186	459	0.41	0.049 00	0.000 99	0.228 79	0.004 76	0.033 87	0.000 46	148	47	209	4	215	3
-22	230	512	0.45	0.059 48	0.001 10	0.405 66	0.007 88	0.049 47	0.000 67	585	40	346	6	311	4

续表 2

样品	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值								年龄 (Ma)							
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ				
黑云角闪花岗岩长岩 (QL1543-5) 曹坪岩体																			
-01	399	739	0.54	0.050 97	0.000 81	0.231 60	0.003 97	0.032 96	0.000 43	240	36	212	3	209	3				
-02	158	453	0.35	0.051 15	0.001 09	0.237 11	0.005 16	0.033 62	0.000 46	248	48	216	4	213	3				
-03	135	389	0.35	0.050 49	0.000 93	0.234 43	0.004 52	0.033 68	0.000 45	218	42	214	4	214	3				
-04	256	634	0.40	0.050 38	0.000 84	0.237 00	0.004 22	0.034 12	0.000 45	212	38	216	3	216	3				
-05	201	495	0.41	0.051 52	0.001 01	0.236 92	0.004 78	0.033 35	0.000 45	264	44	216	4	212	3				
-06	318	735	0.43	0.049 94	0.001 00	0.231 71	0.004 88	0.033 65	0.000 48	192	46	212	4	213	3				
-07	201	540	0.37	0.048 99	0.000 81	0.233 18	0.004 14	0.034 52	0.000 46	148	38	213	3	219	3				
-08	287	691	0.42	0.050 94	0.001 11	0.236 28	0.005 26	0.033 64	0.000 47	238	50	215	4	213	3				
-09	219	575	0.38	0.050 12	0.000 79	0.235 83	0.004 10	0.034 13	0.000 46	200	36	215	3	216	3				
-10	274	623	0.44	0.050 70	0.001 10	0.240 63	0.005 27	0.034 43	0.000 47	227	49	219	4	218	3				
-11	315	571	0.55	0.056 08	0.001 21	0.253 05	0.005 52	0.032 73	0.000 45	455	47	229	4	208	3				
-12	182	457	0.40	0.046 05	0.003 98	0.210 68	0.017 92	0.033 18	0.000 50	474	57	237	5	213	3				
-13	286	742	0.39	0.051 07	0.001 09	0.238 58	0.005 42	0.033 89	0.000 52	244	48	217	4	215	3				
-14	178	453	0.39	0.052 15	0.000 91	0.241 34	0.004 43	0.033 57	0.000 44	292	39	220	4	213	3				
-15	255	602	0.42	0.050 54	0.000 85	0.234 25	0.004 17	0.033 62	0.000 44	220	38	214	3	213	3				
-16	221	568	0.39	0.052 89	0.000 89	0.254 91	0.004 56	0.034 96	0.000 46	324	38	231	4	222	3				
-17	312	671	0.46	0.050 53	0.001 02	0.237 59	0.004 94	0.034 11	0.000 46	219	46	216	4	216	3				
-18	226	526	0.43	0.050 74	0.001 09	0.246 10	0.005 38	0.035 19	0.000 48	229	49	223	4	223	3				
-19	157	405	0.39	0.050 52	0.000 89	0.240 09	0.004 50	0.034 47	0.000 46	219	40	219	4	219	3				
-20	359	625	0.57	0.052 54	0.000 81	0.248 84	0.004 25	0.034 35	0.000 46	309	35	226	3	218	3				
-21	425	498	0.85	0.051 88	0.000 85	0.240 04	0.004 27	0.033 56	0.000 45	280	37	219	3	213	3				
-22	187	477	0.39	0.052 44	0.001 10	0.245 77	0.005 29	0.033 99	0.000 47	305	47	223	4	216	3				
-23	277	644	0.43	0.051 73	0.001 03	0.240 17	0.004 94	0.033 67	0.000 46	274	45	219	4	214	3				
-24	271	603	0.45	0.051 98	0.000 95	0.239 82	0.004 61	0.033 47	0.000 45	284	41	218	4	212	3				
黑云角闪花岗岩长岩 (QL1543-6) 曹坪岩体																			
-01	176	490	0.36	0.051 22	0.000 88	0.235 90	0.004 30	0.033 40	0.000 45	251	39	215	4	212	3				
-02	258	591	0.44	0.050 68	0.000 81	0.241 49	0.004 19	0.034 57	0.000 46	226	37	220	3	219	3				
-03	327	673	0.49	0.051 11	0.000 83	0.239 78	0.004 17	0.034 03	0.000 45	246	37	218	3	216	3				
-04	274	616	0.44	0.054 56	0.000 90	0.252 05	0.004 43	0.033 51	0.000 44	394	36	228	4	213	3				
-05	296	635	0.47	0.051 62	0.000 84	0.237 86	0.004 16	0.033 42	0.000 44	269	37	217	3	212	3				
-06	267	640	0.42	0.050 44	0.000 76	0.233 63	0.003 90	0.033 60	0.000 45	215	34	213	3	213	3				
-07	206	585	0.35	0.050 99	0.000 80	0.238 53	0.004 12	0.033 93	0.000 46	240	36	217	3	215	3				
-08	250	633	0.39	0.050 79	0.000 89	0.233 10	0.004 31	0.033 29	0.000 44	232	40	213	4	211	3				
-09	167	593	0.28	0.055 23	0.000 96	0.377 56	0.007 14	0.049 59	0.000 70	421	38	325	5	312	4				
-10	213	586	0.36	0.053 37	0.001 06	0.251 26	0.005 34	0.034 15	0.000 50	345	45	228	4	217	3				
-11	212	572	0.37	0.051 57	0.000 82	0.241 75	0.004 23	0.034 00	0.000 46	267	36	220	3	216	3				
-12	302	652	0.46	0.051 23	0.001 03	0.236 73	0.004 87	0.033 52	0.000 45	251	46	216	4	213	3				
-13	257	576	0.45	0.051 51	0.000 96	0.234 48	0.004 52	0.033 02	0.000 43	264	42	214	4	209	3				
-14	209	462	0.45	0.052 13	0.001 06	0.234 15	0.004 85	0.032 58	0.000 43	291	46	214	4	207	3				
-15	281	532	0.53	0.050 52	0.000 77	0.228 93	0.003 80	0.032 88	0.000 43	219	35	209	3	209	3				
-16	232	566	0.41	0.051 48	0.000 82	0.230 66	0.003 91	0.032 50	0.000 42	262	36	211	3	206	3				
-17	256	683	0.37	0.049 89	0.000 68	0.228 41	0.003 55	0.033 21	0.000 43	190	32	209	3	211	3				
-18	228	552	0.41	0.052 70	0.000 80	0.235 62	0.003 96	0.032 44	0.000 43	316	34	215	3	206	3				
-19	215	550	0.39	0.049 82	0.000 75	0.230 70	0.003 79	0.033 59	0.000 44	187	34	211	3	213	3				
-20	235	601	0.39	0.051 34	0.000 90	0.235 54	0.004 42	0.033 28	0.000 45	256	40	215	4	211	3				
-21	174	312	0.56	0.052 24	0.002 47	0.247 53	0.011 33	0.034 37	0.000 64	296	104	225	9	218	4				
-22	226	572	0.39	0.052 43	0.000 75	0.236 84	0.003 80	0.032 77	0.000 43	304	32	216	3	208	3				
-23	205	529	0.39	0.051 48	0.000 75	0.238 90	0.003 89	0.033 66	0.000 44	263	33	218	3	213	3				
-24	119	304	0.39	0.051 27	0.001 35	0.243 27	0.006 56	0.034 42	0.000 54	253	59	221	5	218	3				
二长花岗岩 (QL1544) 曹坪岩体																			
-01	208	653	0.32	0.058 79	0.001 02	0.280 48	0.005 06	0.034 60	0.000 45	559	37	251	4	219	3				
-02	156	492	0.32	0.050 37	0.000 85	0.237 83	0.004 25	0.034 25	0.000 45	212	39	217	3	217	3				
-03	211	536	0.39	0.051 46	0.000 87	0.239 27	0.004 26	0.033 73	0.000 44	262	38	218	3	214	3				
-04	211	486	0.43	0.050 63	0.000 84	0.239 53	0.004 24	0.034 31	0.000 45	224	38	218	3	218	3				
-05	249	629	0.40	0.050 04	0.001 20	0.232 91	0.005 80	0.033 76	0.000 52	197	55	213	5	214	3				
-06	239	626	0.38	0.052 79	0.002 46	0.255 89	0.011 56	0.035 17	0.000 68	320	102	231	9	223	4				
-07	274	652	0.42	0.051 28	0.001 09	0.240 74	0.005 25	0.034 05	0.000 47	253	48	219	4	216	3				
-08	289	622	0.46	0.050 25	0.000 99	0.237 39	0.004 82	0.034 27	0.000 45	207	45	216	4	217	3				
-09	268	654	0.41	0.051 96	0.000 92	0.237 61	0.004 42	0.033 17	0.000 44	284	40	217	4	210	3				
-10	327	695	0.47	0.052 05	0.001 07	0.239 13	0.005 02	0.033 33	0.000 45	287	46	218	4	211	3				
-11	331	672	0.49	0.051 20	0.000 90	0.239 47	0.004 43	0.033 93	0.000 45	250	40	218	4	215	3				
-12	380	543	0.70	0.051 54	0.001 19	0.235 72	0.005 49	0.033 18	0.000 46	265	52	215	5	210	3				
-13	376	677	0.56	0.051 03	0.000 71	0.350 96	0.005 49	0.049 88	0.000 66	242	32	305	4	314	4				
-14	288	660	0.44	0.051 57	0.000 93	0.239 90	0.004 51	0.033 75	0.000 44	266	41	218	4	214	3				
-15	248	559	0.44	0.051 15	0.002 18	0.237 54	0.009 83	0.033 68	0.000 60	248	95	216	8	214	4				
-16	215	545	0.39	0.051 01	0.000 86	0.238 35	0.004 33	0.033 89	0.000 46	241	38	217	4	215	3				
-17	211	531	0.40	0.051 99	0.000 81	0.239 05	0.004 08	0.033 35	0.000 44	285	35	218	3	212	3				
-18	300	768	0.39	0.056 25	0.001 57	0.263 67	0.007 52	0.034 01	0.000 56	462	61	238	6	216	4				
-19	157	432	0.36	0.050 38	0.001 23	0.234 25	0.005 72	0.033 73	0.000 47	212	56	214	5	214	3				
-20	195	424	0.46	0.054 69	0.004 64	0.251 98	0.021 03	0.033 42	0.000 50	1288	34	342	5	220	3				
-21	215	515	0.42	0.053 07	0.000 92	0.240 82	0.004 39	0.032 92	0.000 43	332	39	219	4	209	3				
-22	115	224	0.51	0.050 76	0.001 97	0.234 04	0.008 98	0.033 44	0.000 60	230	87	214	7	212	4				
-23	295	605	0.49	0.050 03	0.000 89	0.234 21	0.004 35	0.033 96	0.000 45	196	41	214	4	215	3				
-24	242	534	0.45	0.054 52	0.001 00	0.253 99	0.004 84	0.033 79	0.000 45	392	40	230	4	214	3				

表 3 沙河湾和曹坪岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic data of rocks from the Shahewan and Caoping plutons

样品号	$t(\text{Ma})$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
角闪石英二长岩 (QL1540) 沙河湾岩体							
-03	204	0.282 649	0.000 800	0.023 683	0.282 646	-0.39	1.24
-04	209	0.282 649	0.000 797	0.019 317	0.282 645	-0.30	1.24
-05	203	0.282 643	0.000 928	0.029 018	0.282 639	-0.64	1.26
-06	414	0.282 710	0.000 752	0.021 387	0.282 704	6.36	0.98
-07	308	0.282 624	0.000 794	0.021 188	0.282 620	1.01	1.24
-08	318	0.282 640	0.000 844	0.024 225	0.282 635	1.78	1.20
-09	208	0.282 660	0.000 824	0.025 305	0.282 657	0.07	1.22
-10	210	0.282 670	0.000 944	0.028 395	0.282 666	0.47	1.19
-11	209	0.282 653	0.000 698	0.022 975	0.282 650	-0.12	1.23
-12	212	0.282 664	0.000 752	0.023 351	0.282 661	0.32	1.21
-22	209	0.282 661	0.000 608	0.020 624	0.282 658	0.16	1.21
角闪石英二长岩 (QL1541) 沙河湾岩体							
-01	214	0.282 684	0.000 747	0.020 076	0.282 681	1.06	1.16
-02	213	0.282 694	0.000 812	0.018 966	0.282 690	1.38	1.14
-04-1	214	0.282 655	0.001 147	0.027 200	0.282 650	-0.02	1.23
-04-2	214	0.282 657	0.000 919	0.023 904	0.282 653	0.09	1.22
-05	209	0.282 676	0.000 593	0.016 412	0.282 674	0.72	1.18
-06	212	0.282 658	0.000 562	0.015 285	0.282 655	0.12	1.22
-09	205	0.282 648	0.000 685	0.018 403	0.282 646	-0.37	1.24
-14	211	0.282 686	0.000 725	0.018 614	0.282 683	1.09	1.16
-15	208	0.282 673	0.000 787	0.020 790	0.282 670	0.57	1.19
-16	202	0.282 622	0.000 652	0.017 201	0.282 619	-1.38	1.30
-18	210	0.282 647	0.000 746	0.020 564	0.282 644	-0.32	1.24
-19	205	0.282 661	0.000 737	0.022 115	0.282 658	0.08	1.21
-20	202	0.282 691	0.000 925	0.025 447	0.282 687	1.03	1.15
-22	207	0.282 650	0.000 771	0.022 088	0.282 647	-0.28	1.24
-24	205	0.282 661	0.000 628	0.016 933	0.282 658	0.07	1.21
-25	204	0.282 666	0.000 912	0.025 972	0.282 663	0.21	1.21
角闪石英二长岩 (QL1541) 沙河湾岩体							
-01	215	0.282 705	0.001 086	0.030 893	0.282 701	1.81	1.11
-02	211	0.282 643	0.000 886	0.021 790	0.282 640	-0.45	1.25
-04	219	0.282 640	0.000 910	0.023 907	0.282 636	-0.39	1.26
-06	213	0.282 685	0.000 692	0.015 477	0.282 682	1.09	1.16
-08	215	0.282 637	0.000 797	0.019 281	0.282 633	-0.59	1.27
-13	215	0.282 660	0.000 445	0.011 843	0.282 658	0.31	1.21
-16	215	0.282 674	0.000 918	0.024 639	0.282 670	0.72	1.18
-17	395	0.282 782	0.001 184	0.035 516	0.282 773	8.37	0.84
-19	207	0.282 662	0.001 084	0.030 287	0.282 657	0.09	1.22
-21	215	0.282 651	0.000 670	0.017 401	0.282 649	-0.05	1.23
黑云角闪花岗岩闪长岩 (QL1543-5) 曹坪岩体							
-01	209	0.282 701	0.000 842	0.026 094	0.282 698	1.56	1.12
-02	213	0.282 681	0.000 607	0.018 034	0.282 679	0.98	1.16
-03	214	0.282 696	0.000 898	0.025 043	0.282 693	1.48	1.13
-04	216	0.282 682	0.000 946	0.028 578	0.282 678	1.0	1.16
-08	213	0.282 692	0.001 001	0.029 890	0.282 688	1.3	1.14
-09	216	0.282 676	0.001 095	0.032 435	0.282 672	0.8	1.18
-10	218	0.282 669	0.000 954	0.028 162	0.282 665	0.6	1.19
-13	215	0.282 652	0.000 732	0.020 682	0.282 649	0.0	1.23
-15	213	0.282 654	0.001 056	0.032 384	0.282 649	-0.1	1.23
-17	216	0.282 700	0.000 929	0.027 145	0.282 696	1.7	1.12
-18	223	0.282 670	0.000 777	0.023 270	0.282 666	0.8	1.19
-19	219	0.282 674	0.000 734	0.021 339	0.282 671	0.8	1.18
黑云角闪花岗岩闪长岩 (QL1543-6) 曹坪岩体							
-03	216	0.282 657	0.000 962	0.028 418	0.282 653	0.1	1.22
-04	213	0.282 684	0.001 228	0.033 175	0.282 679	1.0	1.16
-05	212	0.282 694	0.000 754	0.022 509	0.282 691	1.4	1.14
-06	213	0.282 706	0.000 847	0.025 399	0.282 703	1.8	1.11
-07	215	0.282 707	0.000 513	0.015 435	0.282 705	2.0	1.10
-08	211	0.282 694	0.000 917	0.027 065	0.282 691	1.4	1.14
-12	213	0.282 687	0.000 888	0.026 045	0.282 683	1.1	1.15
-13	209	0.282 676	0.001 081	0.032 046	0.282 672	0.7	1.18
-15	209	0.282 713	0.000 888	0.027 619	0.282 709	2.0	1.10

续表 3

样品号	$t(\text{Ma})$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
-16	206	0.282 667	0.000 792	0.023 028	0.282 664	0.3	1.20
-17	211	0.282 680	0.000 939	0.027 586	0.282 677	0.9	1.17
-19	213	0.282 713	0.000 882	0.026 050	0.282 710	2.1	1.09
-20	211	0.282 637	0.000 834	0.024 553	0.282 634	-0.6	1.27
-23	213	0.282 712	0.000 834	0.024 163	0.282 709	2.0	1.10
-24	218	0.282 623	0.000 641	0.017 025	0.282 620	-1.0	1.29
二长花岗岩 (QL1544) 曹坪岩体							
-02	217	0.282 662	0.000 946	0.025 562	0.282 659	0.4	1.21
-03	214	0.282 704	0.000 937	0.026 080	0.282 700	1.7	1.12
-04	218	0.282 678	0.000 890	0.022 694	0.282 674	0.9	1.17
-05	214	0.282 657	0.000 675	0.019 787	0.282 654	0.1	1.22
-07	216	0.282 680	0.000 844	0.025 185	0.282 677	1.0	1.17
-08	217	0.282 688	0.000 636	0.018 347	0.282 686	1.3	1.15
-11	215	0.282 690	0.000 770	0.022 882	0.282 687	1.3	1.15
-12	210	0.282 680	0.000 950	0.024 554	0.282 677	0.8	1.17
-14	214	0.282 700	0.001 032	0.032 209	0.282 696	1.6	1.12
-15	214	0.282 711	0.000 591	0.017 902	0.282 709	2.1	1.10
-16	215	0.282 745	0.001 542	0.047 269	0.282 739	3.1	1.03
-19	214	0.282 685	0.000 655	0.017 106	0.282 682	1.1	1.16
-22	212	0.282 686	0.000 763	0.022 414	0.282 682	1.1	1.16
-23	215	0.282 702	0.001 026	0.031 026	0.282 698	1.7	1.12

如前所述, 本文样品中的锆石均为岩浆成因, 这些年龄指示两岩体的侵位年龄分别为 214~207 Ma 和 215~212 Ma. 以上这些岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年龄及锆石 Lu-Hf 同位素特征的相似性表明, 沙河湾和曹坪岩体可能具有同源性.

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系具有较高的封闭温度, 后期岩石的部分熔融和结晶分离不会影响 Hf 同位素的比值 (Scherer *et al.*, 2000), 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表岩浆源区的成分特征, 正值通常代表源区为亏损地幔或者是从亏损地幔中增生的年轻地壳, 负值通常代表源区为古老地壳 (吴福元等, 2007). 沙河湾和曹坪岩体锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正值为主, 部分为负值 (图7), 沙河湾岩体的 t_{DM2} 介于 1.30~1.11 Ga, 曹坪岩体的 t_{DM2} 介于 1.29~1.03 Ga, 在 Hf 同位素演化图中 (图8), 本文岩体中的锆石特征和 Hu *et al.* (2016) 和 Lu *et al.* (2017) 类似, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有正有负, 结合其中元古代的 t_{DM2} 表明, 这两个岩体的母岩浆可能源于中元古代地壳物质与晚期新生地幔物质的混合.

实验岩石学证明, 在较大范围的温度、压力条件下, 不同成分的源岩部分熔融可以产生相应的花岗质岩浆, 如地壳中硅铝质沉积岩的部分熔融可以产生富铝或富钾的花岗质、闪长质岩浆, 玄武质岩石的部分熔融则可以产生偏基性的花岗质岩浆 (Wolf and Wyllie, 1994). 沙河湾和曹坪岩体北部均侵位于秦岭杂岩中, 在地理位置上具有紧密的关系. 秦岭杂岩是多期变质形成的结晶杂岩系, 其源岩主体为陆源碎

屑岩和大陆拉斑玄武岩为主的双峰式火山岩和碳酸盐岩 (张国伟等, 1995).

秦岭杂岩上部由黑云斜长片麻岩、角闪岩、钙质硅酸盐、石榴矽线片麻岩和大理岩组成 (Xue *et al.*, 1996), 下部为大理岩夹少量角闪岩和石榴矽线片麻岩 (You *et al.*, 1993). 沙河湾和曹坪岩体的稀土和微量元素与秦岭杂岩具有相似的特征, 均富集 LREE 和 LILE, 亏损 HREE 和 HFSE, 虽然 LREE、HREE 分馏程度和 Eu 异常不一致 (图4), 但可能是这两类岩石发生部分熔融后混合, 为沙河湾和曹坪岩体提供岩浆物质. 沙河湾和曹坪花岗岩具有一致的 Sr-Nd 同位素组成, 具有低的全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值 (0.705 1~0.705 5), 略微负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 -1.5~-0.28, 对应的两阶段 Nd 模式年龄为 1.27~1.11 Ga (路应辉, 2017), 类似于南秦岭出露的新元古代耀岭河群变火成岩和同时代的镁铁质-超镁铁质侵入体的同位素组成 (Wang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2014), 而与秦岭杂岩的正片麻岩、斜长角闪岩不同 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.7033~0.7105, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.9~4.0, 对应的 t_{DM2} 为 2.02~1.19 Ga) (闫全人等, 2009; 刘丙祥, 2014). 一般情况下, 全岩 Nd 模式年龄和锆石 Hf 模式年龄可以近似反映由壳幔分异所形成的新生地球的平均地壳居留时间 (Goldstein *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 2006, 2007), 本次研究的锆石原位 Hf 模式年龄 1.30~1.03 Ga 与路应辉 (2017) 研究的 Nd 模式年龄 1.27~1.11 Ga 相一致. 此外, 张成立等 (2009) 从岩体中的闪长质

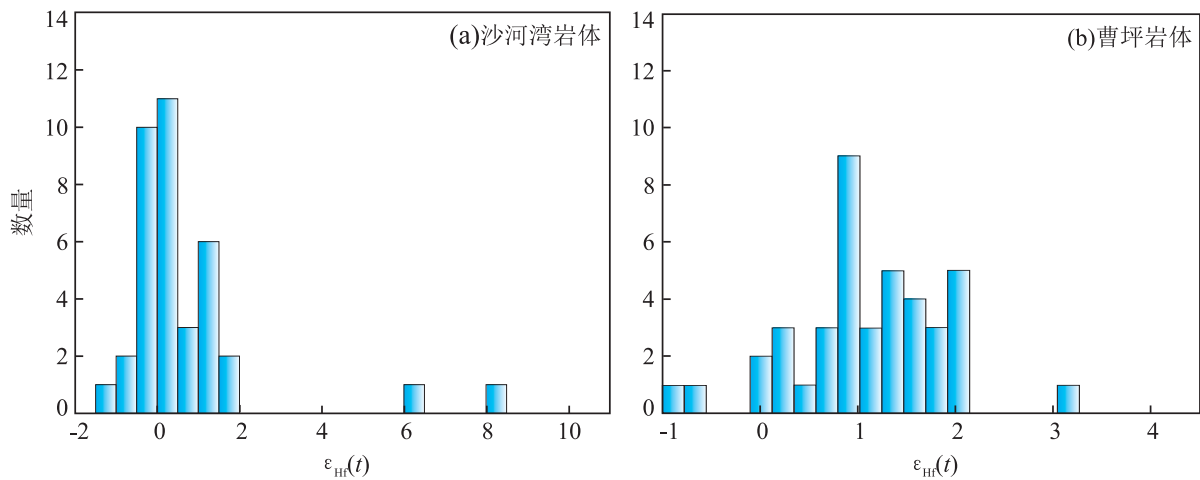
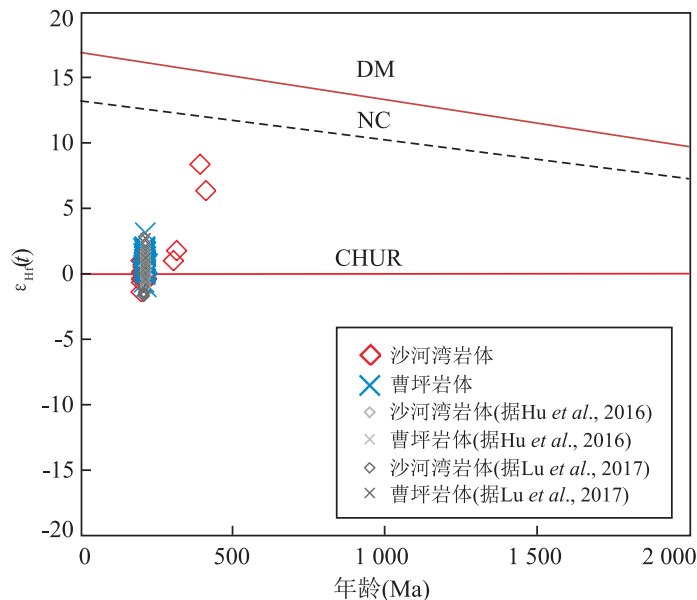
图 7 沙河湾和曹坪岩体中的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 同位素组成Fig.7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ isotopic compositions of Shahewan and Caoping plutons

图 8 沙河湾和曹坪岩体中的锆石 Hf 同位素特征

Fig.8 Hf isotopic characteristics of zircons from the Shahewan and Caoping plutons

包体中,发现其残余锆石的年龄与岩体锆石 Hf 同位素的 $t_{\text{DM}2}$ 一致的现象,均证明沙河湾和曹坪岩体主要是中元古代陆壳部分熔融的产物.这与前人研究的南秦岭在 1.1 Ga 前后强烈增生,产生大量的基性火成岩,并为南北秦岭印支期的花岗岩提供物质来源的结论相符(张宏飞等, 1997; 张本仁等, 2002). 秦岭杂岩中的少量火山岩不可能形成大面积的岩体群.综上所述,沙河湾和曹坪岩体的源岩物质起源于同位素组成上相似的耀岭河群的基性火山岩,亦有亏损地幔物质的加入.

4.2 沙河湾和曹坪岩体的形成机制

对于中生代沙河湾和曹坪岩体的形成机制一直以来未有定论.一般认为,下地壳发生部分熔融存在

两种机制:一种是在主造山期,大陆地壳间发生强烈的挤压,使得下地壳增厚和壳内构造剪切,从而在地温梯度的影响下地壳增温,加上剪切作用产生的热量,致使下地壳发生部分熔融(Zhang *et al.*, 2007);另一种是在主造山期后的伸展应力作用下,由于拆沉作用,地幔物质上涌诱发下地壳物质发生部分熔融(Zhang *et al.*, 2007).事实上,在主造山阶段,强大挤压应力环境下不利于形成岩浆,而在后碰撞阶段,挤压应力逐渐松弛,往往会形成大量的富钾钙碱性岩浆(张成立等, 2005).沙河湾和曹坪岩体整体似椭球状(图1b、1c),岩石未发生变形,且其内部含有大小不一、形态各异的暗色闪长质包体,反映它们可能是基性岩浆和酸性岩浆在非挤压应力条

件下混合形成的。Pitcher(1993)认为富钾钙碱性花岗岩是在非挤压拉张环境下形成的, I型花岗岩可以形成在岛弧环境, 也可以在后碰撞阶段形成。后碰撞花岗岩相较岛弧火山岩具有较高的碱(K_2O+Na_2O)、高 Sr, $(Fe_2O_3+FeO)/(MgO)$ 和 K_2O/Na_2O 比值也较高(Hunter and Blake, 1995; Elburg and Foden, 1999)。沙河湾岩体和曹坪岩体为钙碱性准铝质 I 型花岗岩, 相对岛弧岩浆岩含有较高的全碱(K_2O+Na_2O)含量(沙河湾岩体为 6.85%~8.06%, 曹坪岩体为 7.76%~7.85%), Nb/Y(7.01~8.64 和 4.44~8.10)、Rb/Ba(0.74~0.93 和 0.83~1.13) 和 Zr/Y(4.54~5.59 和 2.86~5.56) 比值也较高(表1), LREE 和 HREE 强烈分馏, 富集 LREE 和 LILE, 亏损 HREE 和 HFSE、Nb、Ta, Eu 无异常或弱异常等类似岛弧岩浆岩的特征, 表明岩体在形成过程中受到消减带岛弧岩浆的影响。综上所述, 沙河湾和曹坪岩体具有后碰撞高钾钙碱性花岗岩的地球化学特征, 形成于后碰撞由挤压应力向伸展作用转变的阶段, 属于后碰撞型花岗岩, 而非形成于板块俯冲作用期间。

前人研究表明, 大别山超高压变质作用发生在 232~221 Ma, 而南秦岭的变质变形、勉—略构造带洋盆闭合的时间为 242~221 Ma(Gao *et al.*, 1999; 李三忠等, 2000)。Gao *et al.* (1999) 提出, 大别山造山带在中生代有拆沉作用, 该作用早于或与秦岭早中生代埃达克质花岗岩的形成时间一致, 这恰好反映沙河湾和曹坪岩体的形成可能是拆沉作用的结果。虽然没有找到榴辉岩(麻粒岩)等中—高压变质岩的直接证据, 但是光头山岩体中发现的麻粒岩包体(李三忠等, 2000)以及秦岭西部的埃达克质花岗岩均表明该地区地壳在中生代有明显的增厚。因此, 在早中生代, 扬子板块向华北板块之下俯冲, 导致岩石圈缩短、增厚, 在增厚地壳下部形成麻粒岩相或榴辉岩相等中、高压变质相, 岩石密度增大, 在重力作用影响下, 发生去根作用, 密度大的岩石下沉, 地幔物质沿着板块间的薄弱地带涌烘烤下地壳, 同时地壳上部从挤压状态转变为伸展拉张, 导致下地壳发生部分熔融, 而后幔源基性岩浆与酸性岩浆机械混合, 形成了大量暗色闪长质包体的后碰撞高钾钙碱性花岗岩体(张成立等, 2005; 周滨等, 2008; 弓虎军等, 2009)。

华北板块和扬子板块在晚二叠世由俯冲/增生转换为俯冲/碰撞(曲玮等, 2018), 三叠纪(印支期)是秦岭造山带最后全面碰撞造山时期, 是秦岭花岗岩的

强烈岩浆活动期(Meng and Zhang, 1999; 侯红星等, 2016)。本文测试的沙河湾和曹坪岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 214~207 Ma 和 215~212 Ma, 其所属的地质构造背景均为主造山期的后碰撞阶段, 应力状态也由挤压转变为伸展状态, 证明勉略洋在 215~207 Ma 之前已经完全闭合, 扬子板块和华北板块的碰撞造山阶段进入末期, 即将迎来板内的构造运动。进一步印证了勉略洋在 242~221 Ma 已经完全闭合的观点, 且在晚二叠世—晚三叠世, 扬子板块沿着勉略带向华北板块之下俯冲, 并发生碰撞, 因地壳增厚而发生拆沉作用, 在地壳均衡力的作用下, 下地壳发生减压熔融, 形成如沙河湾和曹坪岩体等高钾钙碱性的酸性岩浆。

5 结论

(1) 沙河湾和曹坪岩体属于高钾钙碱性准铝质 I 型花岗岩, 稀土配分模式基本一致, 均表现为轻、重稀土强烈分馏, 富集轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE), 亏损重稀土(HREE)和高场强元素(HFSE), Eu 无异常或弱异常, 显示两个岩体的同源性。

(2) 沙河湾岩体和曹坪岩体形成于同一期岩浆作用过程, 其侵位时代分别为 214~207 Ma 和 215~212 Ma。

(3) 沙河湾岩体的 $\varepsilon_{Hf}(t) = -1.38 \sim -1.81$, 以正值为主, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 介于 1.30~1.11 Ga; 曹坪岩体 $\varepsilon_{Hf}(t) = -1.0 \sim -3.1$, t_{DM2} 介于 1.29~1.03 Ga, 其源岩可能为中元古代基性火成岩部分熔融物与亏损地幔物质的混合物。

(4) 沙河湾和曹坪岩体的地质和地球化学特征表明, 这两个岩体形成于后碰撞构造环境。242~221 Ma 勉略洋闭合之后, 扬子板块向华北板块俯冲, 在秦岭地区发生碰撞, 晚三叠世—早侏罗世为后碰撞阶段, 下地壳的拆沉作用导致地幔物质上涌, 同时上地壳由挤压状态转变为伸展拉张, 在地幔热和减压熔融的影响下, 形成了沙河湾和曹坪等早中生代花岗岩。

致谢: 感谢南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室武昌老师在锆石定年上的协助; 感谢长安大学雷如雄老师在野外工作上的帮助, 感谢匿名审稿人和编辑部的帮助!

References

- Bi, S.J., Li, Z.K., Tang, K.F., et al., 2016. LA-ICP-MS In Situ Trace Element Analysis of Pyrite from Dongtongyu Gold Deposit and Its Metallogenic Significance, Xiaoqinling Gold District. *Earth Science*, 41(7):1121–1140 (in Chinese with English abstract).
- Bao, Z.W., Wang, C.Y., Zeng, L.J., et al., 2015. Slab Break-Off Model for the Triassic Syn-Collisional Granites in the Qinling Orogenic Belt, Central China: Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Constraints. *International Geology Review*, 57(4):492–507. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1017777>
- Deng, Z.B., Liu, S.W., Zhang, W.Y., et al., 2016. Petrogenesis of the Guangtoushan Granitoid Suite, Central China: Implications for Early Mesozoic Geodynamic Evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 30:112–131. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.012>
- Diwu, C.R., Sun, Y., Liu, L., et al., 2010. The Disintegration of Kuanping Group in North Qinling Orogenic Belts and Neo-Proterozoic N-MORB. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7):2025–2038 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y.P., Safonova, I., Wang, T., 2016. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen and Adjacent Orogenic Belts. *Gondwana Research*, 30:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.12.001>
- Dong, Y.P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1):1–40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.009>
- Dong, Y.P., Zha, X.F., Fu, M.Q., et al., 2008. Characteristics of the Dabashan Fold-Thrust Nappe Structure at the Southern Margin of the Qinling, China. *Geological Bulletin of China*, 27(9):1493–1508 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y.P., Zhang, G.W., Hauzenberger, C., et al., 2011. Palaeozoic Tectonics and Evolutionary History of the Qinling Orogen: Evidence from Geochemistry and Geochronology of Ophiolite and Related Volcanic Rocks. *Lithos*, 122(1–2):39–56. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.011>
- Elburg, M.A., Foden, J., 1999. Geochemical Response to Varying Tectonic Settings: An Example from Southern Sulawesi (Indonesia). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7–8):1155–1172. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00298-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00298-1)
- Feng, Q.L., Du, Y.S., Yin, H.F., et al., 1996. Carboniferous Radiolaria Fauna Firstly Discovered in Mian-Lue Ophiolitic Mélange Belt of South Qinling Mountains. *Science in China (Series D)*, 39:87–92.
- Franzini, M., Leoni, L., Saitta, M., 1972. A Simple Method to Evaluate the Matrix Effects in X-Ray Fluorescence Analysis. *X-Ray Spectrometry*, 1(4):151–154. <https://doi.org/10.1002/xrs.1300010406>
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11):2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Gao, S., Zhang, B.R., Jin, Z.M., 1999. Lower Crustal Delamination in the Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 42(4):423–433.
- Goldstein, S.L., Arndt, N.T., Stallard, R.F., 1997. The History of a Continent from U-Pb Ages of Zircons from Orinoco River Sand and Sm-Nd Isotopes in Orinoco Basin River Sediments. *Chemical Geology*, 139(1–4):271–286. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00039-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00039-9)
- Gong, H.J., Zhu, L.M., Sun, B.Y., et al., 2009. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Characteristics and Their Geological Significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui Granitic Plutons in the South Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2):248–264 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3–4):237–269.
- He, Y., Zhao, Y.J., Zhang, W.X., 2018. Zircon U-Pb Ages of a Felsic Vein in Ultrahigh-Pressure Eclogite from North Qinling Terrane and Their Geological Implications. *Earth Science*, 43(2):389–400 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H.X., Zhang, D.H., Zhang, R.Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at the East Qinling. *Earth Science*, 41(10):1665–1682 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.122>
- Hu, F.Y., Liu, S.W., Zhang, W.Y., et al., 2016. A Westward Propagating Slab Tear Model for Late Triassic Qinling Orogenic Belt Geodynamic Evolution: Insights from the Petrogenesis of the Caoping and Shahewan Intrusions, Central China. *Lithos*, 262:486–506. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.034>
- Hunter, A.G., Blake, S., 1995. Petrogenetic Evolution of a Transitional Tholeiitic—Calc-Alkaline Series: Towada Volcano, Japan. *Journal of Petrology*, 36(6):1579–1605.
- Li, N., Chen, Y.J., Santosh, M., et al., 2015. Compositional Polarity of Triassic Granitoids in the Qinling Orogen, China: Implication for Termination of the Northernmost Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, 27(1):244–257. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.017>
- Li, S.Z., Zhang, G.W., Li, Y.L., et al., 2000. Discovery of Granulite in the Mianxian-Lüeyang Suture Zone, Mianxian Area and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2):220–226 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemistry of the Mishuling Intrusion in Western Qinling and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8):2617–2634 (in Chinese with English abstract).
- Liang, S., Liu, L., Zhang, C.L., et al., 2013. Metamorphism and Zircon U-Pb Age of High-Pressure Mafic Granulites in Mian-Lüe Suture Zone, South Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5):1657–1674 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W.L., Wang, X.H., Cheng, J.P., et al., 2002. Recognition and Geological Significance of Zhen'an Arc-Volcanic Suite, South Qinling Orogenic Belt. *Geochimica*, 31(3):222–229 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.X., 2014. Magmatism and Crustal Evolution in the Eastern North Qinling Terrain (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).

- Liu, C.H., Wu, C.L., Gao, Y.H., et al., 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopic System of Machihe County and Shahewan Granitoid Rock Masses, South Qinling Belt, Central China. *Earth Science Frontiers*, 20(5):36–56 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.B., Zhang, L.M., 2013. Neoproterozoic Low to Negative $\delta^{18}\text{O}$ Volcanic and Intrusive Rocks in the Qinling Mountains and Their Geological Significance. *Precambrian Research*, 230:138–167. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.02.006>
- Lu, X.X., Dong, Y., Chang, Q.L., et al., 1996. Indosinian Shahewan Rapakivi Granite in Qinling and Its Dynamic Significance. *Science in China (Series D)*, 39(3):266–272.
- Lu, X.X., Wang, X.X., Xiao, Q.H., et al., 2003. A Reply to “A Query on the So-Called Rapakivi Granite in the Qinling Orogen”. *Geological Review*, 49(2):146–154 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.H., 2017. A Geochemical Study of Late Triassic Granitoids from the Qinling Orogen (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.H., Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2017. Geochemical Constraints on the Nature of Magma Sources for Triassic Granitoids from South Qinling in Central China. *Lithos*, 284–285:30–49. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.028>
- Meng, Q.R., Zhang, G.W., 1999. Timing of Collision of the North and South China Blocks: Controversy and Reconciliation. *Geology*, 27(2):123.
- Meng, X.Y., Wang, X.X., Ke, C.H., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age, Geochemistry and Hf Isotope of the Granitoids from Huayang Pluton in South Qinling Orogen: Constraints on the Genesis of Wulong Plutons. *Geological Bulletin of China*, 32(11):1704–1719 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4):215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1):63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Pitcher, W.S., 1993. The Nature and Origin of Granite. Chapman and Hall, London.
- Ping, X.Q., Zheng, J.P., Zhao, J.H., et al., 2013. Heterogeneous Sources of the Triassic Granitoid Plutons in the Southern Qinling Orogen: An E-W Tectonic Division in Central China. *Tectonics*, 32(3):396–416. <https://doi.org/10.1002/tect.20034>
- Qin, J.F., Lai, S.C., Li, Y.F., 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan Adakitic Biotite Plagiogranite in the Mianxian-Lüeyang (Mianlue) Suture, South Qinling, China, and Its Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 26(4):466–471 (in Chinese with English abstract).
- Qu, W., Liu, X.C., Cui, J.J., et al., 2018. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Muscovite from the Guishan Complex in the Tongbai Orogen, Central China, and Its Geological Implications. *Earth Science*, 43(1):247–258 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Science Technology, New York.
- Scherer, E.E., Cameron, K.L., Blichert-Toft, J., 2000. Lu-Hf Garnet Geochronology: Closure Temperature Relative to the Sm-Nd System and the Effects of Trace Mineral Inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19):3413–3432. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(00\)00440-3](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(00)00440-3)
- Shi, Y., Huang, Q.W., Liu, X.J., et al., 2018. Provenance and Tectonic Setting of the Supra-Crustal Succession of the Qinling Complex: Implications for the Tectonic Affinity of the North Qinling Belt, Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158:112–139. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.02.011>
- Shi, Y., Pei, X.L., Castillo, P.R., et al., 2017. Petrogenesis of the ~500 Ma Fushui Mafic Intrusion and Early Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Qinling Belt, Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141:74–96. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.09.003>
- Shi, Y., Yu, J.H., Pei, X.L., et al., 2014. Early Paleozoic Mantle-Derived Magmatism from the Qinling Complex of the Qinling Orogenic Belt. *Journal of Guilin University of Technology*, 34(2):207–217 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y., Yu, J.H., Santosh, M., 2013. Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt, Central China: New Evidence from Geochemical, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Precambrian Research*, 231:19–60. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.001>
- Shi, Y., Yu, J.H., Xu, X.S., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of the Qinling Group in the Eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10):2651–2670 (in Chinese with English abstract).
- Su, C.Q., Hu, J.M., Li, Y., et al., 2006. The Existence of Two Different Tectonic Attributes in Yaolinghe Group in South Qinling Region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4):287–298 (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. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1):313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, W.D., Sun, Y., Zhou, B., et al., 2006. The Emplacement Age of the Songshugou Ultramafic Massif: LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18):A628. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1165>
- Wang, T., Hu, N.G., Pei, X.Y., et al., 1997. The Composition, Tectonic Framework and Evolution of Qinling Complex, Central China. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4):345–351 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.X., Lu, X.X., 2003. Mineralogical Characteristics of Shahewan Rapakivi Textured Granite in North Qinling and Their Petrological Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1):57–62 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.X., Wang, T., Castro, A., et al., 2011. Triassic Granitoids of the Qinling Orogen, Central China: Genetic Relationship of En-

- claves and Rapakivi-Textured Rocks. *Lithos*, 126(3–4):369–387. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.007>
- Wang, X.X., Wang, T., Lu, X.X., 2002. Characteristics of Rapakivi Texture in Mesozoic Shahewan Granite of North Qinling Mountains and Some Related Problems. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1):30–36 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.X., Wang, T., Jahn, B.M., et al., 2007. Tectonic Significance of Late Triassic Post-Collisional Lamprophyre Dykes from the Qinling Mountains (China). *Geological Magazine*, 144(5):837–848. <https://doi.org/10.1017/s0016756807003548>
- Wang, X.X., Wang, T., Zhang, C.L., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Science China: Earth Sciences*, 58(9):1497–1512. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5150-2>
- Wei, L.M., Yang, Y.Z., Zhang, H., et al., 2016. Petrogenesis of Yanzhiba Granite in South Qinling: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotope. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(4):527–546 (in Chinese with English abstract).
- Wolf, M.B., Wyllie, P.J., 1994. Dehydration-Melting of Amphibolite at 10 kbar: The Effects of Temperature and Time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(4):369–383. <https://doi.org/10.1007/bf00320972>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15):1554–1569. <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.Q., et al., 2012. Indosinian Collision-Orogenic System of Chinese Continent and Its Orogenic Mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6):1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- Xue, F., Kröner, A., Reischmann, T., et al., 1996. Palaeozoic Pre- and Post-Collision Calc-Alkaline Magmatism in the Qinling Orogenic Belt, Central China, as Documented by Zircon Ages on Granitoid Rocks. *Journal of the Geological Society*, 153(3):409–417. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.153.3.0409>
- Xue, Y.Y., Siebel, W., He, J.F., et al., 2018. Granitoid Petrogenesis and Tectonic Implications of the Late Triassic Baoji Pluton, North Qinling Orogen, China: Zircon U-Pb Ages and Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Compositions. *The Journal of Geology*, 126(1):119–139. <https://doi.org/10.1086/694765>
- Yan, Q.R., Wang, Z.Q., Yan, Z., et al., 2009. Tectonic Affinity and Timing of Two Types of Amphibolites within the Qinling Group, North Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9):2177–2194 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C.Q., 1993. Tectonic Environment and Ore-Generating Intrusion of the Caoping Granite in Qinling. *Earth Science*, 18(1):21–27, 127 (in Chinese with English abstract).
- You, Z.D., Han, Y.J., Suo, S.T., et al., 1993. Metamorphic History and Tectonic Evolution of the Qinling Complex, Eastern Qinling Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4):549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00171.x>
- Zhang, B.R., Gao, S., Zhang, H.F., et al., 2002. Geochemistry of Qinling Orogenic Belt. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, B.R., Zhang, H.F., Zhao, Z.D., et al., 1996. Geochemical Subdivision and Evolution of the Lithosphere in East Qinling and Adjacent Regions—Implications for Tectonics. *Science in China (Series D)*, 39(3):245–255.
- Zhang, C.L., Li, M., Wang, T., et al., 2010. U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Granitoids in the Douling Group in the Eastern Qinling. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(1):83–95. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2004.tb00678.x>
- Zhang, C.L., Wang, X.X., Wang, T., et al., 2009. Origin of Shahewan Granite Intrusion in Eastern Qinling: Evidences from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3):453–465 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Zhang, G.W., Yan, Y.X., et al., 2005. Origin and Dynamic Significance of Guangtoushan Granitic Plutons to the North of Mianlue Zone in Southern Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):711–720 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Zhang, Z.Q., Dong, Y.P., 1995. Nature of Main Tectono-Lithostratigraphic Units of the Qinling Orogen: Implications for the Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2):101–114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Li, S.Q., Fang, B.W., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Migmatites and Granites in the Foping Dome: Evidence for Late Triassic Crustal Evolution in South Qinling, China. *Lithos*, 296–299:129–141. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.10.024>
- Zhang, H.F., Zhang, B.R., Ling, W.L., et al., 1997. Late Proterozoic Crustal Accretion of South Qinling: Nd Isotopic Study from Granitic Rocks. *Geochimica*, 26(5):16–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.F., Xiao, L., Zhang, L., et al., 2007. Geochemical and Pb-Sr-Nd Isotopic Compositions of Indosinian Granitoids from the Bikou Block, Northwest of the Yangtze Plate: Constraints on Petrogenesis, Nature of Deep Crust and Geodynamics. *Science in China (Series D)*, 50(7):972–983. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0014-z>
- Zhang, Z.Q., Zhang, G.W., Tang, S.H., et al., 1999. Age of the Shahewan Rapakivi Granite in the Qinling Orogen, China, and Its Constraints on the End Time of the Main Orogenic Stage of This Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 44(9):981–984 (in Chinese).
- Zhang, Z.Q., Zhang, G.W., Tang, S.H., et al., 2001. On the Age of Metamorphic Rocks of the Yudongzi Group and the Archean Crystalline Basement of the Qinling Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 75(2):198–204 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Zhang, S.B., Zhao, Z.F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking

- of Continental Crust. *Lithos*, 96(1–2): 127–150. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.003>
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Wu, Y.B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(1–2): 135–158. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.005>
- Zhou, B., Sun, W.D., Sun, Y., et al., 2006. Shahewan Pluton: Implication on the Evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A750. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1572>
- Zhou, B., Wang, F.Y., Sun, Y., et al., 2008. Geochemistry and Tectonic Affinity of Shahewan Orogenic Rapakivi from Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1261–1272 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.Y., Chen, F.K., Nie, H., et al., 2014. Neoproterozoic Tectonic Evolution of South Qinling, China: Evidence from Zircon Ages and Geochemistry of the Yaolinghe Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 245: 115–130. <https://doi.org/10.1016/j.precambres.2014.02.005>
- Zhou, Z.M., Ma, C.Q., Xie, C.F., et al., 2016. Genesis of Highly Fractionated I-Type Granites from Fengshun Complex: Implications to Tectonic Evolutions of South China. *Journal of Earth Science*, 27(3): 444–460.
- ### 附中文参考文献
- 毕诗健, 李占轲, 唐克非, 等, 2016. 小秦岭东桐峪金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其成矿意义. *地球科学*, 41(7): 1121–1140.
- 第五春荣, 孙勇, 刘良, 等, 2010. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB. *岩石学报*, 26(7): 2025–2038.
- 董云鹏, 查显峰, 付明庆, 等, 2008. 秦岭南缘大巴山褶皱—冲断推覆构造的特征. *地质通报*, 27(9): 1493–1508.
- 何宇, 赵宇洁, 张文祥, 等, 2018. 北秦岭超高压榴辉岩中长英质脉体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球科学*, 43(2): 389–400.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等, 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 25(2): 248–264.
- 侯红星, 张德会, 张荣臻, 2016. 东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. *地球科学*, 41(10): 1665–1682. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.122>
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 等, 2000. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义. *岩石学报*, 16(2): 220–226.
- 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 西秦岭糜署岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义. *岩石学报*, 29(8): 2617–2634.
- 梁莎, 刘良, 张成立, 等, 2013. 南秦岭勉略构造带高压基性麻粒岩变质作用及其锆石 U-Pb 年龄. *岩石学报*, 29(5): 1657–1674.
- 凌文黎, 王歆华, 程建萍, 等, 2002. 南秦岭镇安岛弧火山岩的厘定及其地质意义. *地球化学*, 31(3): 222–229.
- 刘丙祥, 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化 (博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等, 2013. 南秦岭麻池河乡和沙河湾花岗岩体锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素组成. *地质前缘*, 20(5): 36–56.
- 卢欣祥, 王晓霞, 肖庆辉, 等, 2003. 答“对秦岭奥长环斑花岗岩质疑”. *地质论评*, 49(2): 146–154.
- 路应辉, 2017. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩地球化学研究 (博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.
- 孟旭阳, 王晓霞, 柯昌辉, 等, 2013. 南秦岭华阳花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素组成——对五龙岩体群成因的约束. *地质通报*, 32(11): 1704–1719.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 2007. 南秦岭勉县—略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义. *地质通报*, 26(4): 466–471.
- 曲玮, 刘晓春, 崔建军, 等, 2018. 桐柏造山带中龟山杂岩的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. *地球科学*, 43(1): 247–258.
- 时毓, 于津海, 裴小利, 等, 2014. 秦岭造山带中秦岭杂岩的早古生代幔源岩浆作用. *桂林理工大学学报*, 34(2): 207–217.
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 等, 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. *岩石学报*, 25(10): 2651–2670.
- 苏春乾, 胡建民, 李勇, 等, 2006. 南秦岭地区存在两种不同构造属性的耀岭河群. *岩石矿物学杂志*, 25(4): 287–298.
- 王涛, 胡能高, 裴先治, 等, 1997. 秦岭杂岩的组成、构造格局及演化. *地球学报*, 18(4): 345–351.
- 王晓霞, 卢欣祥, 2003. 北秦岭沙河湾环斑结构花岗岩的矿物学特征及其岩石学意义. *矿物学报*, 23(1): 57–62.
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 2002. 北秦岭中生代沙河湾岩体环斑结构特征及有关问题的讨论. *地球学报*, 23(1): 30–36.
- 韦龙猛, 杨一增, 张贺, 等, 2016. 南秦岭胭脂坝花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素的制约. *地球科学与环境学报*, 38(4): 527–546.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185–220.
- 许志琴, 杨经绥, 李化启, 等, 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制. *岩石学报*, 28(6): 1697–1709.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等, 2009. 秦岭岩群中两类斜长角闪岩的性质和时代及其地质意义. *岩石学报*, 25(9): 2177–2194.
- 印纯清, 1993. 陕西秦岭曹坪花岗岩的构造环境及含矿性. *地球科学*, 18(1): 21–27, 127.
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 等, 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社.
- 张成立, 王晓霞, 王涛, 等, 2009. 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. *西北大学学报 (自然科学版)*, 39(3): 453–465.
- 张成立, 张国伟, 晏云翔, 等, 2005. 南秦岭勉略带北光头山花岗岩体群的成因及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 711–720.

张国伟, 张宗清, 董云鹏, 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101-114.

张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 等, 1997. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨同位素示踪. 地球化学, 26(5): 16-24.

张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等, 1999. 秦岭沙河湾奥长环斑花岗岩的年龄及其对秦岭造山带主造山期结束时间的限制. 科学通报, 44(9): 981-984.

张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等, 2001. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底. 地质学报, 75(2): 198-204.

周滨, 汪方跃, 孙勇, 等, 2008. 秦岭沙河湾造山带型环斑花岗岩地球化学及构造属性讨论. 岩石学报, 24(6): 1261-1272.

* * * * *

中国国际地学计划项目学术研讨会和纪念杨遵仪先生诞辰 110 周年学术报告会在我校举行

2018 年 12 月 11 日至 12 日, 中国国际地学计划项目学术研讨会暨全国委员会 2018 年工作会议和纪念杨遵仪先生诞辰 110 周年学术报告会在我校举行. 国家自然科学基金委员会副主任、国际地学计划中国委员会主任侯增谦院士, 国际地科联主席成秋明教授, 中国联合国教科文组织乔正顺处长, 国家自然科学基金委员会地学部刘羽处长, 中国科学院院士殷鸿福、金振民、杨经绥, 校长王焰新, 我国主导或参与的 13 个中国国际地学计划项目负责人及来自国内数十所高校、科研院所的近 200 名专家学者参加研讨会.

本次学术研讨会共邀请了我国 6 个主导和 5 个参与的中国国际地学计划项目组、两个联合国教科文组织特别研究中心、2 位国际地质专家作主题报告, 各项目负责人对近年来中国国际地学计划项目取得的成果和解决的重大科学问题进行了集中展示, 内容涵盖了从国际岩溶研究和全球化学尺度, 从地球深部物质循环到特提斯和中亚构造带, 从地史时期地球表面极端环境、气候和生物事件到当代表层关键带和人类生存环境等地学领域全球关注的热点方向. 报告准备充分、内容丰富、深入浅出, 现场交流活跃.

中国国际地学计划中国委员会秘书长吴珍汉汇报了 2018 年全委会工作. 全委会委员评议了各项中国国际地学计划中国工作组 2018 年工作进展, 讨论制订了全委会 2019 年工作计划, 并提议 2019 年在北京举办全球中国国际地学计划项目学术大会.

IGCP 科学计划是我国地学领域国际合作活动中持续最长、规模最大、成效最显著的国际科技合作活动之一, 已成为中国地质学家了解国际地学前沿的桥梁, 也是世界其他国家地学界了解中国地学发展的窗口.

据了解, 此次活动由中国国际地学计划全国委员会主办, 我校生物地质与环境地质国家重点实验室承办.

12 日上午, 杨遵仪先生诞辰 110 周年纪念活动与学术报告会举行. 侯增谦院士表示, 杨遵仪先生是我国首位参与国际地学计划项目的科学家, 在中国国际地学计划项目实施早期, 杨遵仪先生带领中国学者走出去, 主动与世界接轨, 从积极参与到引领国际合作研究, 为促进我国地质科学与国际前沿的交流起到至关重要的作用.

王焰新表示, 杨遵仪先生是我国著名的地学大师和教育家, 是我国地质学和地层古生物学教育的奠基人之一, 为提高我国的地学研究水平做出了开创性的成就.

殷鸿福院士声情并茂地回忆了杨遵仪先生的生平和学术成就, 他说, 杨先生不仅是蜚声海内外的学术大师, 他的高尚品德与学者风骨同样令人肃然起敬. 他的精神并没有随着他的仙逝而随风飘散, 而是作为宝贵的财富, 在一代代学子中传承和发扬, 激励着我们不断攀登地学高峰. (通讯员陈中强)