

DOI: 10.12401/j.nwg.2022020

商丹俯冲增生带南缘土地沟—池沟地区 侵入岩形成时代及地质意义

李平¹, 陈隽璐^{1,*}, 张越^{1,2}, 孙少珍³, 郝晨羽⁴

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合指挥中心, 新疆 乌鲁木齐 830057; 3. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068; 4. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘 要: 位于商丹俯冲增生带南缘山阳—柞水地区的侵入岩类在形成时代主要集中在新元古代 (885~621 Ma) 和中晚三叠—早白垩世 (233~132 Ma) 2 个阶段, 且后者多为秦岭造山带印支期—燕山期造山活动的产物。该构造带内土地沟至池沟地区出露有部分与成矿作用有关的小岩体, 锆石 LA-ICP MS U-Pb 同位素测年结果表明其形成时代为 144.4~158.8 Ma, 属于晚侏罗世—早白垩世侵入岩类。岩石地球化学特征显示出富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 高 Sr、低 Y 的特征。结合区域岩浆岩演化研究, 可以认为土地沟—池沟地区晚侏罗—早白垩世侵入岩类的形成可能与西太平洋活动应力作用以及区内的北西向构造系统约束具有密切关联。受此影响, 以中南秦岭地区在后碰撞—后造山阶段拆沉和幔源物质上涌作用下, 地壳物质发生重熔从而在山阳—柞水一带形成一系列中酸性侵入岩类。

关键词: 商丹俯冲增生杂岩带; 晚侏罗世—早白垩世岩浆作用; 岩石成因

中图分类号: P588.12

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0010-18

The Formation Age of Intrusions from Tudigou-Chigou Region in Southern Margin of Shangdan Subduction-Accretion Belt and Its Geological Significance

LI Ping¹, CHEN Junlu^{1,*}, ZHANG Yue^{1,2}, SUN Shaozhen³, HAO Chenyu⁴

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Center for Orogenic Belt Geology of CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Center of Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Urumqi 830057, Xinjiang, China; 3. Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical and Geochemical Exploration Co. Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Located in the south margin of Shangdan subduction-accretion belt, intrusive rocks in Shanyang-Zhushui region are mainly formed in two stages: the former is Neoproterozoic (885~621 Ma), and the latter is Middle-Late Triassic and Early Cretaceous (233~132 Ma) that was a result of Qinling orogenic event during

收稿日期: 2021-12-08; 修回日期: 2022-05-16; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“秦岭祁连地区区域地质调查”(DD20230215), “北方造山带重要地区区域地质调查工程”(DD20230005), “西北地区铜镍钴等战略性矿产资源调查”(DD20230032), “西北重大岩浆事件及其成矿作用和构造背景综合研究”(12120114020501)和“西北地区自然资源动态监测与风险评估”(DD20211393)联合资助。

作者简介: 李平(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事岩浆岩石学研究和区域地质调查。E-mail: gogogis@qq.com。

* 通讯作者: 陈隽璐(1964-), 男, 研究员, 长期从事大地构造研究工作。E-mail: chj10116@163.com。

Indosinian–Yanshan period. Zircons LA–ICP–MS U–Pb dating of intrusions in Tudigou–Chigou region show them formed between 144.4 Ma and 158.8 Ma, during Late Jurassic and Early Cretaceous. Geochemical study on these rocks reveals, they are enriched in large ion lithophile element (LILE) and depleted in high field strength elements (HFSE), with a high ratio of Sr/Y. Combined with the research on regional magmatic evolution, intrusions formed between Late Jurassic and Early Cretaceous in Tudigou and Chigou may be controlled by the movement of western Pacific and NE faults. And also, with the crustal delamination and the addition of fluid from subduction–accretion belt in post–collision and post–orogenic stages, intrusions from Shanyang–Zhushui region are formed by the melting of crust in Middle–south Qinling.

Keywords: Shangdan subduction–accretion belt; late Jurassic–early Cretaceous magmatic activity; petrogenesis

商丹俯冲增生带由丹凤岩群、商丹蛇绿岩、罗汉寺组、武关岩组、大草滩组及具有进积沉积特征的刘岭岩群构成(徐学义等, 2014), 可东延至西峡–桐柏–信阳段(李承东等, 2019)。近年来, 在商丹带南缘及南秦岭地区发现众多与燕山期中酸性花岗(斑)岩体密切相关的斑岩–矽卡岩型 Cu–Mo–Fe 矿床(矿化点)(王瑞廷等, 2008, 2012, 2016, 2021; 闫臻等, 2014; 刘凯等, 2020)。尤其是山阳–柞水地区的花岗(斑)岩体已新获得了一系列同位素年龄证据, 这些岩体的形成时代主要为 276.6~94.6 Ma(严阵, 1985; 尚瑞钧等, 1988; 李先梓等, 1993; 谢桂青等, 2012; 王瑞廷等, 2012; 任涛等, 2014; 吴发富等, 2014)。由于山阳–柞水地区花岗(斑)岩体的形成时代、岩石成因研究对于探讨侏罗纪–白垩纪秦岭造山带构造演化乃至岩浆成矿作用规律都具有重要意义, 笔者旨在通过对土地沟、池沟和白沙沟地区与成矿有关的斑岩体进行锆石 U–Pb 同位素定年和地球化学分析工作, 以探讨中南秦岭燕山期花岗岩浆活动及其所反映的构造演化特征。

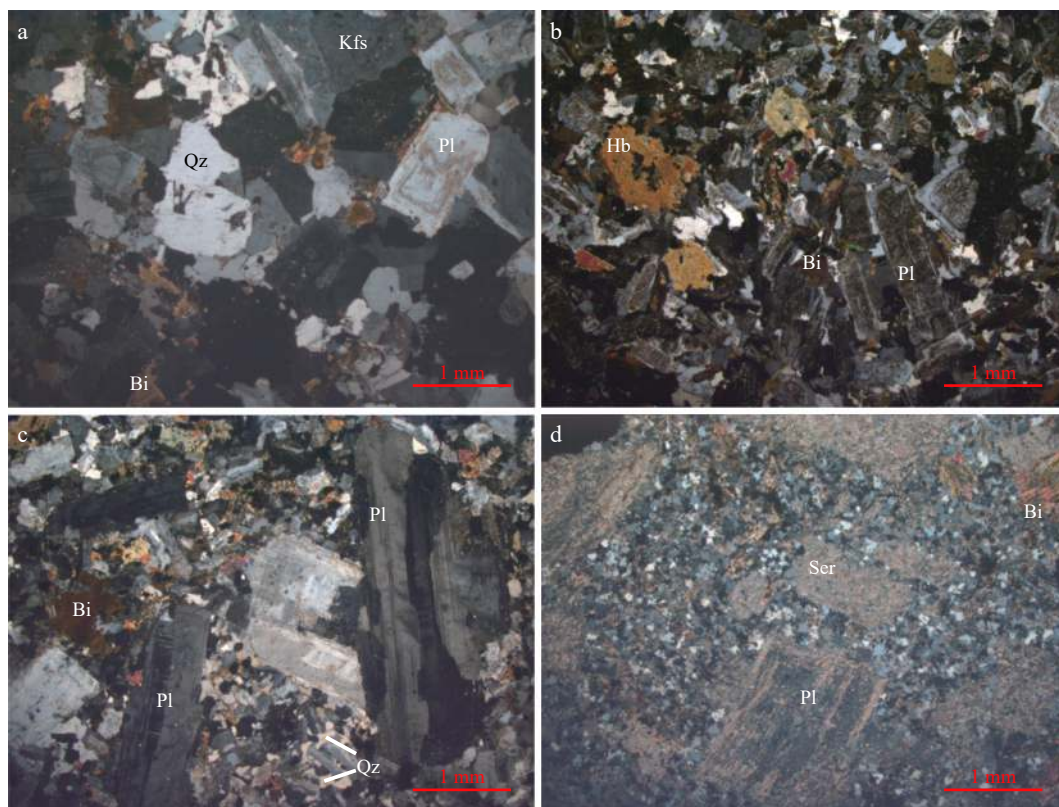
1 区域地质概况

工作区位于商丹断裂和山阳–凤镇断裂之间, 大地构造位置上属于商丹俯冲增生带(图 1a), 亦属于商丹构造混杂岩带南缘(裴先治等, 1997; 张国伟等, 2001)(图 1)。其中, 山阳–柞水地区的断裂以近东西向的山阳–凤镇断裂和红岩寺–黑山断裂为主, 具有多期活动及同沉积地质特征(端木合顺, 2000; 方维萱等, 2013)。区内出露一套泥盆纪地层(王宗起等, 2009; Yan et al., 2012), 主要包括桐峪寺组、青石垭组、池沟组、牛耳川组、云镇组、古道岭组、星红铺组及九里坪

组, 多由粉砂岩、砂岩、板岩、结晶灰岩、石英杂砂岩及白云岩共同组成(图 1b), 为一套滨、浅海相–河流三角洲相沉积组合(Yan et al., 2006; 闫臻等, 2007)。在山阳–柞水地区已发现池沟斑岩型铜钼矿、付桑沟矽卡岩型铜矿和白沙沟金矿点等, 矿体与岩体空间关系密切, 均为燕山期成岩成矿, 反映存在斑岩型铜钼金成矿系统(王瑞廷等, 2012)。

中南秦岭地区岩浆活动强烈, 从元古代到古生代、中生代均具有不同规模的岩浆活动, 但以中生代最为强烈且分布最为广泛(张成立等, 2008; 王晓霞等, 2011)。其中, 晚三叠世岩体出露面积相对较大, 如东江口岩体、柞水岩体、曹坪岩体、沙河湾岩体等。晚侏罗世–早白垩世岩体则在商丹俯冲增生带内集中出露, 主要有袁家沟、小河口、园子街、下官坊、白沙沟、池沟、双元沟及土地沟岩体等。此外, 在南部的冷水沟复式岩体中也有晚侏罗世–早白垩世的花岗斑岩和花岗闪长斑岩出露(陈雷等, 2014)。这些晚侏罗世–早白垩世岩体与围岩多呈侵入接触关系, 岩体与地层的接触带常见矽卡岩化、角闪岩化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化及硅化等热液蚀变, 并伴生有矽卡岩型 Cu–Mo–Fe(Au)矿化。山阳–柞水矿集区内大量发育的中生代中酸性(斑)岩体、岩脉出露面积较小, 多以呈岩枝、岩株、岩瘤、岩筒状出现, 部分岩体外围可见爆破角砾岩(图 1b); 在空间上, 它们多成带产出, 主要沿凤镇–山阳断裂和庙沟–小西沟断裂周边分布(闫臻等, 2007; 徐学义等, 2014)。

本次采集样品的岩体位于山阳–柞水地区牛耳川镇以北, 处于中南秦岭地区的商丹俯冲增生带内, 围岩多为近东西向展布的泥盆纪池沟组(图 1a)。池沟组下段以中厚层、巨厚层石英砂岩及薄层长石石英细砂岩为主; 上段以粉砂岩、粉砂质板岩、钙质板岩夹



a.池沟花岗闪长岩; b.池沟闪长玢岩; c.白沙沟石英闪长玢岩; d.土地沟石英闪长玢岩; Pl.斜长石;
Bi.黑云母; Q.石英; Kfs.钾长石; Ser.绢云母; Hb.角闪石

图2 土地沟-池沟地区中酸性岩体显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Micrograph for intrusions of Tudigou and Chigou region in XPL view

0.1 mm 大小的细粒板柱状斜长石(~82%)和少量的黑云母(~3%)组成(图 2b)。白沙沟和土地沟岩体均为石英闪长玢岩(图 2c、图 2d), 岩体中斜长石斑晶发育且基质中均含有 5%~7% 的细粒石英。

2 样品采集及分析

山阳县以西的土地沟-池沟地区侵入岩, 围岩均为中—晚泥盆世的砂岩-粉砂岩-钙质板岩组合。调查区植被覆盖较为严重, 以致路线范围内可观察到的岩体野外露头极为有限, 岩体大小和形态相对难以有效控制。从岩石组合上来看, 工作区出露的侵入岩为花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩, 以及少量的石英闪长玢岩和闪长玢岩。本次工作挑选池沟花岗闪长岩(14CG01)、池沟闪长玢岩(14CG04)、白沙沟石英闪长玢岩(13BS01)和土地沟石英闪长玢岩(14TD01)的锆石, 锆石 CL 阴极发光(CL)照相、U-Pb 同位素测年和地球化学测试分析在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与

找矿重点实验室完成。

岩石的主量元素分析采用 Panalytical 公司产 PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定, 分析误差低于 5%。其中, TFeO 含量由 XRF 法直接测得, FeO 含量由滴定法完成, Fe₂O₃ 含量则通过化学换算进一步得出。微量元素和稀土元素采用 Themrmo Fisher 公司产 X-series II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 相对标准偏差优于 5%。由于土地沟石英闪长玢岩遭受了较强的后期蚀变作用, 及较为显著的绢云母化(图 2d), 因此本次对土地沟石英闪长玢岩仅进行了同位素年代学的测试, 而未进行岩石地球化学分析工作。测试结果分别见表 2。

单矿物锆石经透射光显微镜分析和阴极发光显微图像(CL)照相后, 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP MS)U-Pb 同位素定年工作采用的激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 型号为 Agilent 7700x, 激光剥蚀斑束径为 30 μm, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。每个时间分辨分析数据包括

表 1 土地沟-池沟地区岩体地质特征一览表

Tab. 1 Geological characteristics of intrusions in Tudigou-Chigou region

地名	围岩	侵入岩组合	采集岩性/形成时代	蚀变	矿化类型
池沟	中泥盆世地层：长石石英砂岩、石英砂岩夹薄层粉砂质板岩、板岩，夹大理岩	花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩和石英闪长玢岩	花岗闪长岩 (14CG1)/144.4 Ma	围岩具角岩化、矽卡岩化，岩体与地层接触部位普遍发育接触变质晕；岩体：钾化、绢云母化、硅化、绿泥石化，其次有黏土化、黑云母化	Cu、Mo
			闪长玢岩 (14CG4)/150.7 Ma		
白沙沟			石英闪长玢岩 (13BS01)/151.0 Ma	围岩具角岩化、矽卡岩化；岩体：不同程度的绿泥、绿帘石化	Au、Cu
土地沟		似斑状花岗岩和石英闪长(玢)岩、爆破角砾岩	石英闪长玢岩 (14TD1)/158.8 Ma	岩体具钾化、绢云母化、碳酸盐化、高岭土化	Mo

大约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 Glitter 4.4 完成,详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015)。锆石样品的 U-Pb 同位素年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot (Ludwig, 2003)完成。

3 测试结果

3.1 锆石 LA-ICP MS U-Pb 同位素定年

池沟花岗闪长岩和闪长玢岩、白沙沟石英闪长玢岩、土地沟石英闪长玢岩所挑选的锆石均发育有典型岩浆锆石特有的震荡环带,且 4 个岩体所选锆石的 Th/U 值均大于 0.4,暗示被挑选的锆石均为岩浆成因(图 3)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图中(图 4),这些岩浆锆石测定点的同位素比值均位于谐和线上或其附近。其中,池沟花岗闪长岩的加权平均年龄为 $(144.4\pm 1.4)\text{Ma}$ (MSWD=1.4),池沟闪长玢岩的加权平均年龄为 $(150.7\pm 1.5)\text{Ma}$ (MSWD=1.5),白沙沟石英闪长玢岩的加权平均年龄为 $(151\pm 1.7)\text{Ma}$ (MSWD=2.4),土地沟石英闪长玢岩的加权平均年龄为 $(158.8\pm 1.1)\text{Ma}$ (MSWD=1.1)(表 2)。可见,土地沟-池沟一带中酸性岩体的岩浆结晶年龄主要为 144.4~158.8 Ma,晚侏罗世—早白垩世可能是山阳-柞水地区的重要岩浆活动期。

3.2 岩石地球化学特征

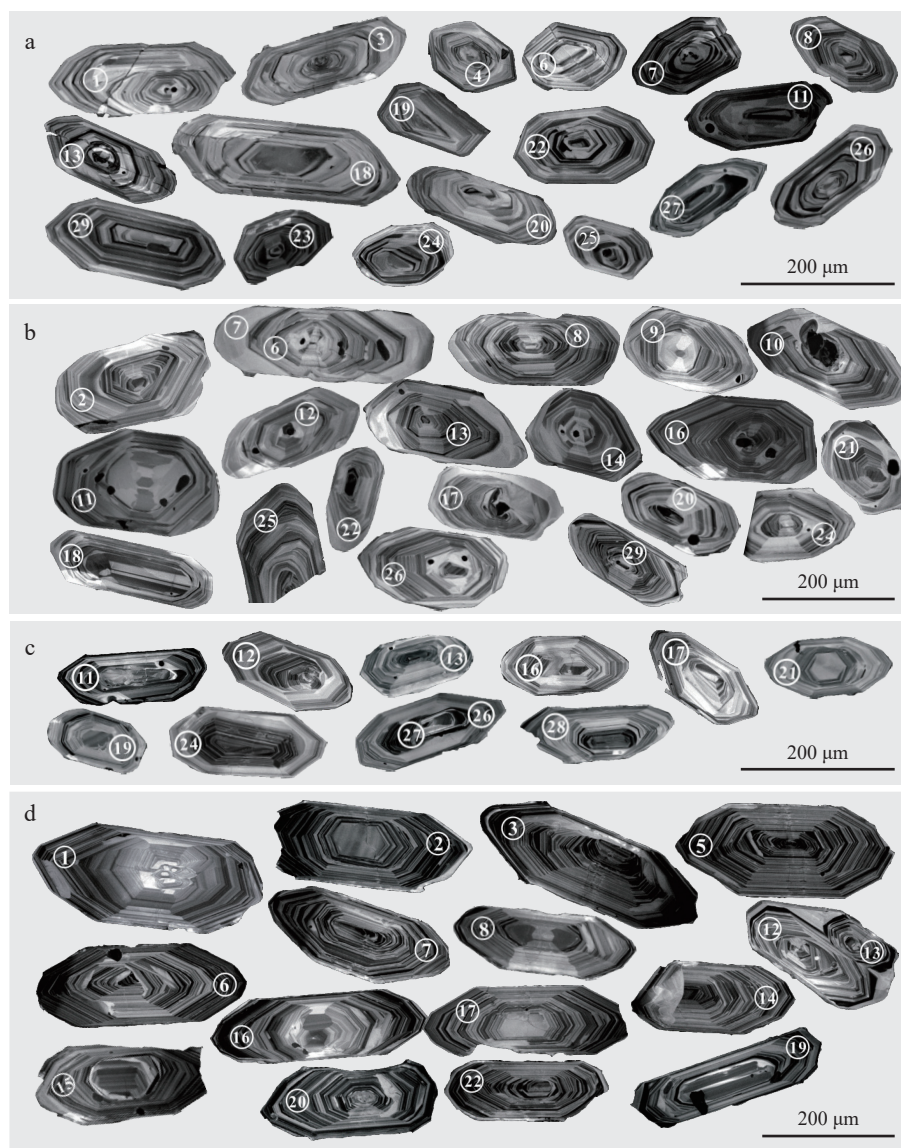
池沟岩体和白沙沟岩体的 SiO_2 含量为 60.56%~68.33%,结合他们的矿物结构和野外产出特征,池沟

岩体和白沙沟岩体可分别定为花岗闪长岩、闪长玢岩和石英闪长玢岩(表 3,图 5)。池沟花岗闪长岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.95~1.32, ACNK 值为 1.22~1.24,整体为高钾钙碱性-钾玄系列的强过铝质岩石;池沟闪长玢岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.81~0.89, ACNK 值为 1.17~1.21,属高钾钙碱性的强过铝质岩石;白沙沟石英闪长玢岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.70~0.75, ACNK 值为 1.06~1.08,属高钾钙碱性的弱过铝质岩石。土地沟石英闪长玢岩由于蚀变过强,且局部具有明显后期构造作用的改造而呈中酸性构造角砾岩,因而并未进行地球化学测试工作。池沟花岗闪长岩、闪长玢岩和白沙沟石英闪长玢岩的 Al_2O_3 含量为 15.63%~16.43%, TiO_2 含量为 0.39%~0.79%,属于高 Al、低 Ti 型(斑)岩体。

4 讨论

4.1 岩石形成构造环境分析

在稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 6a),中南秦岭山(阳)-柞(水)地区池沟、白沙沟岩体均显示出相似的稀土元素配分模式, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 2.73~6.90、 $\text{Gd}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 值为 1.88~2.94、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 8.28~33.75,呈轻稀土富集、重稀土略微平坦的右倾型特征。这些晚侏罗-早白垩世(斑)岩体具有十分明显的 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu}=1.34\sim 2.21$),反映了岩浆演化过程存有中斜长石的堆晶作用。他们具有较低的 HREE 元素含量 ($7.44\times 10^{-6}\leq Y\leq 18.9\times 10^{-6}$, $0.73\leq \times 10^{-6}\text{Yb}\leq 2.11\times 10^{-6}$),极高的 Sr 元素含量 ($\text{Sr}\geq 820\times 10^{-6}$)以及较高的 Sr/Y (60.6~162.6)和 Sr/Yb(575.7~1 551.2)值。因此认为,



a.池沟花岗闪长岩; b.池沟闪长玢岩; c.白沙沟石英闪长玢岩; d.土地沟石英闪长玢岩

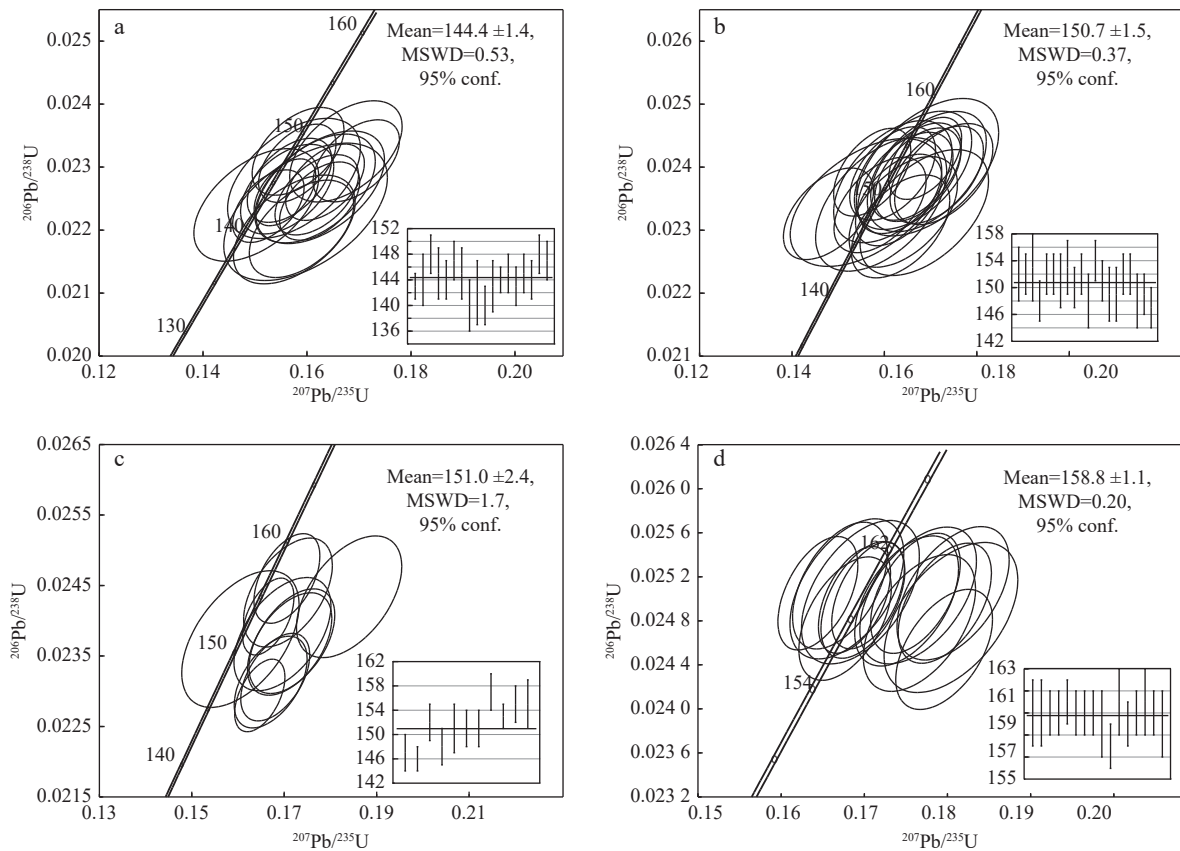
图3 土地沟-池沟地区中酸性岩体锆石 CL 照片

Fig. 3 CL images of intrusions in Tudigou-Chigou region

工作区此类具有高 Sr、低 Y 地球化学特征的中酸性(斑)岩体的源区残留相中含石榴子石矿物。此外,岩体普遍富钾,为高钾钙碱性系列岩石组合,该岩石系列多形成于洋盆闭合后的岩浆活动期(Wilson, 1989; Martin, 2005)。

微量元素的原始地幔标准化图解上(图 6b),大离子亲石元素富集,高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 等明显亏损,此与交代地幔的部分熔融作用或后期富集物质的加入有关。区内同期侵入岩、斑岩体锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均为 $-4.5 \sim 1.78$, 且大多 < 0 , 也表明岩浆源区应为地壳物质的熔融且有部分幔源物质加入(陈雷等, 2014)。池沟闪长玢岩和白沙沟石英闪长玢岩的稀土元素球

粒陨石标准化图解上具有极为相似的配分模式,暗示二者具有相近的岩浆过程和物质源区;而池沟花岗闪长岩同前二者的稀土元素配分模式显著不同,尤其以较低的 ΣHREE 含量与前二者有所区分。此可能表明池沟花岗闪长岩与池沟闪长玢岩和白沙沟石英闪长玢岩分别经历不同的岩浆作用过程,此过程在侵入岩构造环境判别图(图 7)中也有所体现。池沟花岗闪长岩(14CG1)属于后碰撞造山事件下岩浆演化的产物,而池沟闪长玢岩(14CG4)和白沙沟石英闪长玢岩则落入后碰撞-后造山事件的过渡区域内。从形成时代上看,池沟(14CG1)花岗闪长岩形成时代也略早于池沟闪长玢岩(14CG4)和白沙沟石英闪长玢岩



a.池沟花岗闪长岩; b.池沟闪长玢岩; c.白沙沟石英闪长玢岩; d.土地沟石英闪长玢岩

图4 土地沟-池沟地区中酸性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb age Concordia diagram for intrusions in Tudigou and Chigou

(13BS01)。

可见,山-柞地区晚侏罗—早白垩世侵入岩(斑岩/玢岩)为一类富 Al、低 Ti 的高钾钙碱性—钾玄系列,其锆石部分具有正 $\epsilon Hf(t)$ 值、高 Sr、低 Y 的岩石地球化学特征。由此推断,中南秦岭土地沟-池沟地区的晚侏罗世—早白垩世侵入岩,具有地壳物质为主要源区兼具幔源物质混染的同位素特征,是后碰撞—后造山构造演化阶段,地壳物质拆沉引发部分幔源物质上涌诱发地壳物质熔融的产物。

4.2 区域岩浆作用及大地构造意义

根据区域性断裂和商丹带南北两侧的沉积特征,山阳-柞水矿集区可以划分为商丹俯冲增生带和南秦岭构造带 2 个构造单元。这些地区出露的中酸性岩(斑岩/玢岩)所反映的岩浆事件时代跨度较大,从新元古代至早白垩世(885~132 Ma)均有体现。

山阳-柞水地区第一期侵入岩浆活动期为 885~621 Ma,侵入岩类主要出露在山阳-竹林关-西峡断裂以南的南秦岭地区。此阶段形成的岩体主要包括迷魂阵复式岩体(885~846.7 Ma)(刘仁燕等,

2011; 阎明等, 2014)、黑沟碱性花岗岩(686 Ma)(牛宝贵等, 2006)、李家砭辉长岩(621 Ma)(郭现轻等, 2014)、宋家屋场辉长辉绿岩(864 Ma)(刘仁燕, 2011)、板板山 A_1 型正长花岗岩(730.0 Ma)(吴发富等, 2012)构成的碱性-基性侵入岩带。此外,南秦岭东段的耀岭河群、郧西群、武当群火山岩和基性岩墙群的形成时代主要为 676~833 Ma(凌文黎等, 2007),且被认为形成于大陆板内裂谷环境之中(夏林圻等, 2008)。从形成时代和构造岩石成因上看,山柞地区第一期岩浆剧烈活动(885~621 Ma)主要位于南秦岭地区,岩石组合和地球化学特征均显示此阶段岩浆活动与伸展机制有密切关联。

山阳-柞水地区第二期侵入岩浆活动期为 233~132 Ma,此阶段侵入岩多出露在商丹蛇绿构造混杂岩带和山阳-西峡断裂以北的俯冲增生带内。该阶段中南秦岭地区较大的岩体数量相对有限,多沿主干断裂在东西向构造与北东向构造复合部位产出,如:东江口岩体(209~219 Ma)(杨恺等, 2009)、柞水岩体(214.8~233.6 Ma)(弓虎军等, 2009; 秦江锋等, 2010;

表2 土地沟-池沟地区中酸性岩体锆石 U-Pb 同位素物质成分组成表

Tab. 2 Zircon LA-ICP MS U-Pb analytical data of the intrusions in Tudigou-Chigou region

样品	比值					年龄 (Ma)					组成 (10^{-6})				
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm \%$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm \sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm \sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm \sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm \sigma$	^{210}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U
池沟花岗岩闪长岩 (14CG1), n=28															
-01	0.049 4	0.159	0.152 5	0.454	0.022 3	0.038	0.006 3	0.017	169	39	144	4	143	2	1.01
-03	0.051 7	0.269	0.161 5	0.765	0.022 6	0.057	0.006 4	0.028	273	63	152	7	144	4	0.97
-04	0.052 2	0.244	0.167 4	0.714	0.023 2	0.053	0.008 2	0.034	296	57	157	6	148	3	0.72
-06	0.050 0	0.295	0.157 4	0.844	0.022 8	0.063	0.005 8	0.032	198	74	149	7	145	4	0.89
-07	0.052 0	0.186	0.161 8	0.530	0.022 5	0.042	0.006 7	0.021	288	42	152	5	144	3	0.97
-08	0.053 2	0.188	0.169 4	0.549	0.023 1	0.043	0.006 5	0.021	338	41	159	5	147	3	0.88
-11	0.051 9	0.286	0.162 5	0.816	0.022 6	0.059	0.007 5	0.038	285	68	153	7	145	4	0.67
-13	0.051 9	0.280	0.157 5	0.772	0.022 0	0.057	0.007 5	0.039	282	66	149	7	140	4	0.64
-18	0.051 9	0.370	0.159 7	1.039	0.022 2	0.072	0.008 0	0.052	285	91	150	9	142	5	0.64
-19	0.052 3	0.240	0.158 9	0.663	0.022 0	0.051	0.007 8	0.034	302	54	150	6	140	3	0.67
-20	0.048 6	0.280	0.150 2	0.793	0.022	0.059	0.007 4	0.038	131	74	142	7	143	4	0.76
-22	0.049 9	0.135	0.155 7	0.391	0.022	0.035	0.007 2	0.017	195	31	147	3	144	2	1.14
-23	0.052 1	0.173	0.163 4	0.499	0.022 7	0.040	0.007 0	0.022	290	39	154	4	145	3	0.80
-24	0.052 4	0.179	0.162 4	0.509	0.022 4	0.041	0.007 3	0.023	306	39	153	4	143	3	0.87
-25	0.049 8	0.185	0.156 6	0.536	0.022 7	0.044	0.007 3	0.024	188	45	148	5	145	3	0.83
-26	0.050 0	0.207	0.156 1	0.592	0.022 6	0.047	0.007 4	0.026	196	51	147	5	144	3	1.02
-27	0.049 3	0.197	0.158 2	0.583	0.023 2	0.046	0.007 0	0.027	166	50	149	5	148	3	0.78
-29	0.049 7	0.167	0.158 1	0.491	0.023 0	0.041	0.007 5	0.023	183	40	149	4	147	3	0.91
池沟闪长玢岩 (14CG1), n=20															
-02	0.051 3	0.283	0.169 1	0.850	0.023 9	0.063	0.007 8	0.044	254	68	159	7	152	4	0.64
-06	0.052 0	0.222	0.171 3	0.667	0.023 8	0.051	0.008 1	0.033	288	51	161	6	152	3	0.78
-07	0.051 1	0.336	0.169 3	1.017	0.024 0	0.072	0.009 2	0.058	249	84	159	9	153	5	0.65
-08	0.046 1	0.214	0.147 8	0.644	0.023 2	0.048	0.007 5	0.030	4	54	140	6	148	3	0.94
-09	0.052 4	0.233	0.172 8	0.701	0.023 8	0.053	0.007 9	0.036	306	53	162	6	152	3	0.76

续表 2

样品	比值				年龄 (Ma)				组成 (10 ⁻⁵)																								
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±%	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ±1σ	²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U																		
-10	0.0507	0.204	0.1672	0.616	0.0238	0.049	0.0074	0.030	231	48	157	5	152	3	150	6	<2.99	29.3	1.48	3.27	203	283	0.71										
-11	0.0493	0.282	0.1618	0.845	0.0237	0.064	0.0086	0.045	166	73	152	7	151	4	173	9	<2.43	18.6	0.96	2.33	153	197	0.77										
-12	0.0503	0.278	0.1661	0.838	0.0239	0.062	0.0083	0.045	211	70	156	7	153	4	167	9	<2.62	14.4	0.77	1.45	103	146	0.70										
-13	0.0504	0.207	0.1630	0.617	0.0234	0.048	0.0078	0.034	213	51	153	5	150	3	158	7	<1.68	23.3	1.19	2.39	176	240	0.73										
-14	0.0491	0.202	0.1617	0.613	0.0239	0.049	0.0077	0.030	153	51	152	5	152	3	156	6	<1.48	25.3	1.34	3.44	259	262	0.98										
-16	0.0525	0.314	0.1686	0.918	0.0232	0.066	0.0084	0.051	310	73	158	8	148	4	171	10	<2.24	14.1	0.87	1.39	99.9	151	0.66										
-17	0.0507	0.169	0.1688	0.522	0.0241	0.043	0.0084	0.031	229	40	158	5	154	3	171	6	<2.03	23.7	1.23	2.60	181	234	0.77										
-18	0.0502	0.227	0.1645	0.681	0.0237	0.053	0.0079	0.035	207	56	155	6	151	3	161	7	<1.80	20.3	1.17	2.47	184	213	0.86										
-20	0.0483	0.356	0.1560	1.082	0.0234	0.067	0.0082	0.061	114	103	147	10	149	4	167	12	14.9	16.9	4.65	7.78	75.3	135	0.55										
-21	0.0493	0.318	0.1592	0.936	0.0234	0.070	0.0097	0.056	165	82	150	8	149	4	196	11	<2.33	20.5	1.07	2.55	170	219	0.77										
-22	0.0505	0.213	0.1668	0.647	0.0239	0.051	0.0090	0.041	222	51	157	6	152	3	183	8	<2.11	17.0	0.89	1.77	115	171	0.67										
-24	0.0477	0.180	0.1573	0.551	0.0239	0.046	0.0084	0.036	85	47	148	5	152	3	171	7	<1.79	23.2	1.18	2.23	158	239	0.66										
-25	0.0511	0.264	0.1640	0.774	0.0232	0.058	0.0083	0.045	246	64	154	7	148	4	167	9	<1.63	21.5	1.23	2.16	166	235	0.70										
-26	0.0493	0.220	0.1590	0.658	0.0234	0.050	0.0080	0.034	163	57	150	6	149	3	161	7	<3.21	30.1	1.53	4.12	321	322	0.99										
-29	0.0514	0.242	0.1635	0.703	0.0230	0.054	0.0090	0.045	261	57	154	6	147	3	181	9	<1.69	22.0	1.24	2.57	183	245	0.74										
白沙沟石英闪长玢岩 (13BS01), n=11																																	
-11	0.0526	0.176	0.1670	0.521	0.0231	0.043	0.0067	0.019	315	39	157	5	147	3	136	4	<12792	59.9	55.0	507	1371	156	8.75										
-12	0.0523	0.118	0.1647	0.359	0.0229	0.034	0.0062	0.010	302	25	155	3	146	2	125	2	<6631	71.8	65.7	879	2590	189	13.6										
-13	0.0519	0.231	0.1696	0.693	0.0238	0.053	0.0073	0.030	285	54	159	6	152	3	148	6	<6285	26.9	24.5	175	441	68.5	6.44										
-16	0.0529	0.166	0.1680	0.493	0.0232	0.041	0.0068	0.021	325	36	158	4	148	3	138	4	<1115	36.5	34.0	213	595	94.5	6.30										
-17	0.0493	0.281	0.1605	0.838	0.0237	0.064	0.0066	0.036	166	73	151	7	151	4	134	7	<2384	33.9	29.5	198	572	85.6	6.68										
-19	0.0529	0.206	0.1716	0.613	0.0237	0.049	0.0069	0.026	325	45	161	5	151	3	140	5	1.245	27.9	26.2	174	492	70.4	6.98										
-21	0.0528	0.202	0.1711	0.602	0.0236	0.048	0.0074	0.028	322	44	160	5	151	3	150	6	<1072	31.4	29.5	189	506	79.3	6.38										
-24	0.0506	0.151	0.1705	0.471	0.0246	0.042	0.0078	0.032	227	34	160	4	157	3	157	6	<851	47.0	42.7	137	359	113	3.16										
-26	0.0506	0.118	0.1665	0.367	0.0240	0.036	0.0071	0.020	223	25	156	3	153	2	144	4	<736	73.2	66.6	281	814	180	4.50										
-27	0.0511	0.207	0.1708	0.634	0.0244	0.051	0.0070	0.029	248	48	160	5	155	3	141	6	<517	24.6	22.6	133	395	59.7	6.62										
-28	0.0552	0.249	0.1840	0.752	0.0243	0.057	0.0080	0.038	424	51	172	6	155	4	162	8	<718	24.6	24.5	138	358	59.9	5.97										

组成(10^{-6})

样品	比值				年龄 (Ma)				组成 (10 ⁻⁶)														
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±%	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ±1σ	²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U									
土地沟石英闪长玢岩 (14TDG1), n=16																							
-01	0.0515	0.145	0.1764	0.463	0.0250	0.041	0.0072	0.021	266	32	165	4	159	3	146	4	<589	29.2	27.2	168	487	69.1	7.05
-02	0.0527	0.140	0.1806	0.445	0.0250	0.040	0.0080	0.021	317	29	169	4	159	3	162	4	<410	41.7	39.9	272	724	98.2	7.37
-03	0.0496	0.102	0.1698	0.333	0.0249	0.035	0.0075	0.017	180	22	159	3	159	2	152	3	<432	83.4	75.2	370	1053	196	5.35
-05	0.0512	0.129	0.1750	0.412	0.0249	0.039	0.0078	0.023	250	27	164	4	159	2	158	5	<415	48.8	45.4	211	584	114	5.09
-06	0.0486	0.117	0.1670	0.377	0.0251	0.038	0.0076	0.020	129	27	157	3	160	2	154	4	<403	50.4	44.6	247	707	117	6.00
-07	0.0513	0.110	0.1761	0.356	0.0250	0.036	0.0082	0.022	257	23	165	3	159	2	166	4	<495	65.5	61.4	233	621	153	4.05
-08	0.0493	0.086	0.1688	0.286	0.0249	0.032	0.0081	0.018	165	19	158	2	159	2	164	4	<404	111	100	344	939	261	3.59
-12	0.0525	0.116	0.1796	0.370	0.0249	0.036	0.0081	0.020	310	23	168	3	159	2	164	4	<328	61.9	59.8	309	862	144	5.95
-13	0.0530	0.171	0.1804	0.531	0.0248	0.045	0.0095	0.034	331	36	168	5	158	3	191	7	<294	42.2	41.4	195	478	98.7	4.83
-14	0.0534	0.123	0.1796	0.384	0.0245	0.036	0.0089	0.027	347	24	168	3	156	2	179	5	391	54.0	53.4	182	479	127	3.75
-15	0.0493	0.148	0.1695	0.468	0.0250	0.043	0.0087	0.032	165	34	159	4	160	3	175	6	<228	32.5	29.8	118	319	75.4	4.23
-16	0.0493	0.116	0.1676	0.367	0.0248	0.037	0.0091	0.028	162	26	157	3	158	2	184	6	<324	54.3	49.7	167	432	126	3.40
-17	0.0478	0.098	0.1644	0.317	0.0250	0.034	0.0082	0.018	93	22	155	3	159	2	165	4	<363	58.7	52.3	319	922	135	6.78
-19	0.0488	0.143	0.1679	0.452	0.0250	0.042	0.0079	0.027	139	33	158	4	160	3	160	5	<504	97.7	89.0	406	1232	225	5.47
-20	0.0496	0.088	0.1704	0.288	0.0250	0.032	0.0097	0.022	179	18	160	2	159	2	197	4	<176	97.6	90.5	331	819	225	3.64
-22	0.0519	0.143	0.1766	0.445	0.0247	0.041	0.0093	0.031	284	29	165	4	158	3	188	6	279	49.9	48.6	197	517	116	4.45

表 3 土地沟-池沟地区中酸性岩体主量元素(%)和微量元素(10^{-6})地球化学数据表Tab. 3 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of the intrusions in Tudigou-Chigou region

样号	池沟花岗闪长岩					池沟闪长玢岩			
	14CG1-1	14CG1-2	14CG1-3	14CG1-4	14CG1-5	14CG4-1	14CG4-2	14CG4-3	14CG4-4
SiO ₂	68.06	67.5	68.13	67.61	68.33	60.57	60.71	60.53	61.88
Al ₂ O ₃	16.32	16.43	16.41	16	15.63	16.31	16.21	15.99	16.21
Fe ₂ O ₃	1.25	1.45	1.12	1.33	1.34	2.49	2.46	2.73	2
FeO	0.59	1.07	0.93	1.08	0.85	3.14	3.07	3.08	2.71
CaO	1.65	2.13	2.03	1.99	1.88	4.04	4.11	3.95	3.69
MgO	1.35	1.24	1.19	1.42	1.44	2.91	2.93	3.02	2.92
K ₂ O	5.01	4.01	4.21	4.55	4.72	3.18	3.27	3.22	3.42
Na ₂ O	3.8	4.22	4.23	3.79	3.62	3.84	4.02	3.82	3.84
TiO ₂	0.44	0.4	0.39	0.46	0.47	0.77	0.76	0.78	0.75
P ₂ O ₅	0.32	0.27	0.29	0.33	0.33	0.53	0.55	0.57	0.55
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09	0.08	0.08	0.07
LOI	1.19	1.26	1.06	1.4	1.37	2.14	1.82	2.16	1.92
La	22.8	34.2	32.8	45.5	52.7	35.8	40.1	43	48.9
Ce	42.4	61.1	56.2	82.9	92.1	73.6	78.5	82.8	95.1
Pr	4.57	6.33	5.7	8.68	9.51	9.01	9.51	10	11.4
Nd	16	21.8	19.6	29.1	31.9	35.7	37.3	39.5	43
Sm	2.94	3.28	3.07	4.38	4.96	6.24	6.58	6.52	7.39
Eu	1.69	1.74	1.97	1.81	1.99	2.74	2.72	2.72	2.95
Gd	2.38	2.48	2.43	3.55	3.88	5.3	5.4	5.52	5.82
Tb	0.34	0.34	0.34	0.49	0.57	0.78	0.76	0.79	0.84
Dy	1.78	1.66	1.62	2.31	2.55	3.68	3.77	3.7	4.2
Ho	0.33	0.3	0.3	0.4	0.44	0.69	0.7	0.68	0.74
Er	0.88	0.78	0.82	1.02	1.18	1.97	1.99	1.93	2
Tm	0.13	0.11	0.12	0.15	0.17	0.3	0.3	0.28	0.3
Yb	0.85	0.73	0.78	1	1.12	1.9	1.91	1.83	1.91
Lu	0.13	0.11	0.11	0.15	0.16	0.29	0.27	0.27	0.28
Y	8.12	7.51	7.44	10.3	11.8	17.9	17.3	17.1	18.3
Cu	836	1 380	921	1880	1 300	90.3	72.4	96.2	85.5
Pb	13.6	18.5	58.2	7.47	27.3	29.4	19.1	23.8	34.3
Zn	26.6	26.8	24.2	27.3	27.7	56	54.9	49.4	47.8
Cr	16.2	16.7	14.5	17.4	16.6	57.7	50.7	52.2	54.1
Ni	10.5	18.8	13.5	15.8	10.8	28	25.8	26.4	27.1
Co	7.38	13	10.8	10.5	8.87	12.1	12.2	12.1	10.2
Li	7.67	8.43	6.83	9.22	8.83	10.1	8.48	10	13.1
Rb	109	82.5	128	93.1	144	62.7	72.1	73.2	96.2
Sr	820	1 100	1 210	1 000	1 100	1 210	1 250	1 260	1 250
Ba	3 260	3 160	3 380	3 120	3 330	3 970	3 960	3 840	3 970

续表 3

样号	池沟花岗闪长岩					池沟闪长玢岩			
	14CG1-1	14CG1-2	14CG1-3	14CG1-4	14CG1-5	14CG4-1	14CG4-2	14CG4-3	14CG4-4
V	61	58	55.3	69.6	70.8	136	131	133	124
Sc	8.48	7.51	8.22	9.77	8.98	14.8	14.5	14.6	15.4
Nb	14.4	14.8	14.1	17.2	16.5	17.8	17.9	18	18.7
Ta	1.18	1.14	1.16	1.43	1.25	1.42	1.35	1.38	1.46
Zr	179	140	134	180	166	225	233	226	235
Hf	5.28	4.12	3.88	5.24	5.01	6.24	6.38	6.28	6.44
Be	2.04	2.33	2.52	2.67	2.43	2.51	2.43	2.49	2.68
Ga	18.9	19.3	19.6	18.6	18.7	21.5	20.1	20.2	20.7
Th	13	15.5	14.4	16.8	18.1	11.7	11.7	12.6	14.3
(La/Sm) _N	5.01	6.73	6.90	6.71	6.86	3.70	3.93	4.26	4.27
(Gd/Yb) _N	2.32	2.81	2.58	2.94	2.87	2.31	2.34	2.50	2.52
(La/Yb) _N	19.24	33.60	30.16	32.64	33.75	13.52	15.06	16.85	18.36
δEu	1.95	1.87	2.21	1.40	1.39	1.46	1.40	1.39	1.38
K ₂ O/Na ₂ O	1.32	0.95	1.00	1.20	1.30	0.83	0.81	0.84	0.89
ACNK	1.24	1.24	1.23	1.23	1.22	1.21	1.17	1.20	1.21

样号	池沟闪长玢岩	白沙沟石英闪长玢岩						
	14CG4-5	13BS01-1	13BS01-2	13BS01-3	13BS01-4	13BS01-5	13BS01-6	13BS01-7
SiO ₂	61.93	63.54	62.74	62.95	63.15	62.92	63.00	63.14
Al ₂ O ₃	16.22	16.05	16.16	16.23	16.03	16.14	16.12	16.02
Fe ₂ O ₃	1.84	2.72	3.18	2.88	2.83	2.94	2.48	2.8
FeO	2.79	2.11	2.18	2.15	2.14	2.25	2.55	2.28
CaO	3.76	3.6	3.54	3.49	3.64	3.6	3.46	3.56
MgO	2.93	1.88	1.92	1.93	1.93	1.9	1.94	1.93
K ₂ O	3.43	3.58	3.43	3.57	3.58	3.51	3.55	3.45
Na ₂ O	3.86	4.78	4.88	4.87	4.82	4.89	4.86	4.88
TiO ₂	0.77	0.63	0.65	0.63	0.65	0.64	0.65	0.65
P ₂ O ₅	0.56	0.43	0.45	0.44	0.44	0.45	0.46	0.45
MnO	0.08	0.12	0.14	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12
LOI	1.81	0.54	0.71	0.69	0.67	0.61	0.8	0.7
La	41.4	40.2	36	42.5	20.8	40.9	39.4	19.4
Ce	83.6	75.4	68.9	80.6	46.1	78.8	77.1	41.2
Pr	9.96	9.22	8.59	9.41	5.77	9.49	9.07	5.59
Nd	39.4	35.2	33.6	36.4	23.1	37.2	34.2	23.2
Sm	6.8	5.98	5.91	6.12	4.56	6.43	6.23	4.58
Eu	2.88	2.44	2.42	2.63	2.08	2.62	2.45	2.02
Gd	5.64	4.8	5.16	5.23	3.86	5.24	5	3.84
Tb	0.81	0.74	0.74	0.77	0.56	0.79	0.73	0.58
Dy	4.06	3.56	3.71	3.79	3.08	3.84	3.65	3.11

续表 3

样号	池沟闪长玢岩	白沙沟石英闪长玢岩						
	14CG4-5	13BS01-1	13BS01-2	13BS01-3	13BS01-4	13BS01-5	13BS01-6	13BS01-7
Ho	0.75	0.69	0.73	0.72	0.59	0.74	0.68	0.6
Er	2.01	1.94	2.04	2.07	1.68	2.11	1.91	1.66
Tm	0.3	0.28	0.3	0.31	0.26	0.32	0.27	0.25
Yb	1.98	1.94	1.99	2.02	1.7	2.11	1.82	1.68
Lu	0.3	0.28	0.3	0.3	0.26	0.32	0.29	0.25
Y	18.8	17.4	18	17.9	12.2	18.9	17.6	12.9
Cu	67.4	75.4	82	74.8	69.3	86.9	80.1	80.6
Pb	9.65	42.3	41.3	27	47.5	35.7	43.1	31.3
Zn	46.3	104	85.7	80.1	105	97.3	84.1	76.4
Cr	53.3	15.8	22.6	18.1	15.6	19.2	18	18.7
Ni	26.6	11.4	15	12.2	10.8	14	11.1	12.2
Co	10	9.82	9.94	9.43	10	10.3	9.18	8.75
Li	11.6	11.7	11.5	11.5	11.8	12.1	12	12
Rb	73.7	95.2	57.8	79.9	20.5	74.2	75.7	22
Sr	1 140	1 320	1 230	1 320	1 220	1 330	1 270	1 020
Ba	3 940	3 610	3 690	4 040	3 800	3 940	3 580	3 640
V	123	91.4	101	102	100	99.9	94.7	99.6
Sc	14.8	11.7	10.2	12.4	7.03	11.8	10.8	7.46
Nb	19.2	17.2	17.8	17.4	18.2	17.6	16.8	16.3
Ta	1.48	1.36	1.35	1.34	1.45	1.43	1.33	1.28
Zr	243	192	207	209	219	218	177	195
Hf	6.51	5.48	5.83	5.84	6.23	5.94	4.97	5.55
Be	2.33	2.84	2.72	3.13	2.98	2.82	2.32	2.68
Ga	20.5	20.4	20.1	21.3	20.5	21.3	20	19.8
Th	13.6	11.2	9.96	10.2	5	10.1	9.25	3.93
(La/Sm) _N	3.93	4.34	3.93	4.48	2.94	4.11	4.08	2.73
(Gd/Yb) _N	2.36	2.05	2.15	2.14	1.88	2.05	2.27	1.89
(La/Yb) _N	15.00	14.86	12.98	15.09	8.78	13.90	15.53	8.28
δEu	1.42	1.39	1.34	1.42	1.52	1.38	1.34	1.47
K ₂ O/Na ₂ O	0.89	0.75	0.70	0.73	0.74	0.72	0.73	0.71
ACNK	1.20	1.07	1.08	1.08	1.06	1.07	1.07	1.07

刘春花等, 2014)、曹坪岩体(224.1 Ma)(弓虎军等, 2009)和沙河湾岩体(212 Ma)(王晓霞等, 2005; 弓虎军等, 2009)等。其余岩体虽出露面积相对较小, 但分布却较为广泛, 包括土地沟、白沙沟以及池沟等众多岩体多以岩枝、岩株、岩筒状产。它们多沿 2 组或 2 组以上的断裂交汇部位常呈岩株状形态, 主要由闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、石英二长斑岩、石

英二长岩和石英正长斑岩等构成(张银龙等, 2002; 徐学义等, 2014), 为晚三叠世以来滨西太平洋构造应力影响下的产物(赵东宏等, 2019)。

秦岭早中生代较早形成的埃达克质花岗岩(245~215 Ma)代表了中国南、北两大陆块碰撞造山进入到后碰撞阶段陆壳增厚过程大陆岩石圈发生拆沉作用的产物; 后期形成的高分异富钾花岗岩和环斑

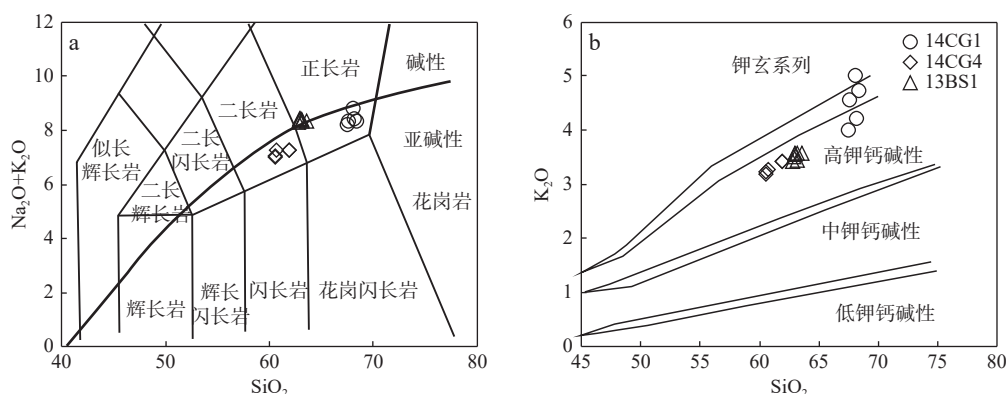
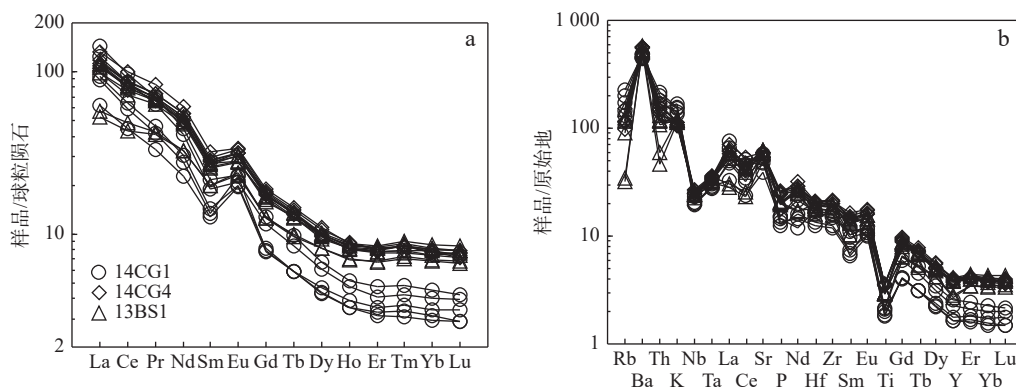


图5 土地沟-池沟地区中酸性岩体 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)图(a)(Irvine et al., 1971; Middlemost, 1994)和 SiO_2 - K_2O 图(b)(Richwood, 1989)

Fig. 5 (a) SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ Diagram and (b) SiO_2 versus K_2O Diagram for intrusions in Tudigou-Chigou region



a. 标准化数据自 Taylor et al., 1985; b. 标准化数据引自 Sun et al., 1989

图6 土地沟-池沟地区中酸性岩体稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素原始地幔标准化图(b)

Fig. 6 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns for the intrusions in Tudigou-Chigou region, and (b) Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram

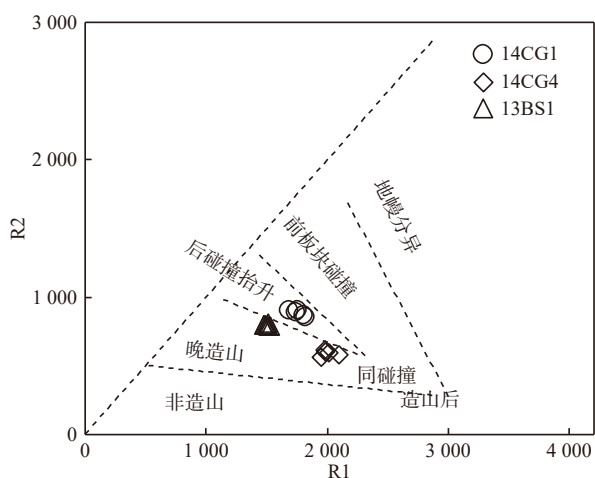


图7 土地沟-池沟地区中酸性岩体 R1-R2 成因环境判别图(Batchelor et al., 1985)

Fig. 7 Diagrams of R1 versus R2 for Intrusions in Tudigou and Chigou

结构花岗岩(217~200 Ma)则标志着秦岭开始步入后碰撞拉张环境(王晓霞等, 2005; 张成立等, 2008)。山阳-柞水地区侵入岩多集中形成于 143~158 Ma(谢桂青等, 2012; 吴发富等, 2014), 且池沟、白沙沟(玢岩)等岩体在花岗岩构造成因判别图中(图7)分别落入后碰撞-后造山阶段花岗岩范围内, 显示有后碰撞-后造山阶段的地球化学特征。其高钾钙碱性-钾玄系列的高 Sr、低 Y 型岩石化学特征, 便是此种环境下花岗质岩浆演化的地质记录。

从区域构造特征上看, 中南秦岭地区北西西向、北东向 2 组断裂系统控制了区内晚侏罗世—早白垩世的岩体: 北西西向构造多为印支期构造的继承性断裂, 并表现出由挤压向张剪走滑构造转变的特征; 而北东向断裂则表现为逆时针滑移的压剪性质(赵东宏等, 2019)。山柞地区出露有较多的斑岩型铜钼矿(陈雷等, 2014), 部分工作认为挤压向伸展的转换环境或

陆内造山过程均可以为此类矿床的形成提供有利环境(侯增谦等, 2006, 2009)。王瑞廷等(2021)提出山-柞地区金矿的产生也与区域构造应力密切相关, 认为山-柞地区金矿床主要受印支期东向挤压剪切构造和北东向张性断裂构造叠加部位控制, 燕山期陆内造山作用进一步促使金矿的富集。由此可见, 此阶段大量存在与剪切、张性构造应力相关联的构造活动和成矿作用, 与中南秦岭山阳-柞水地区一系列的燕山期后碰撞-后造山花岗岩在大地构造成因机制上是耦合的。

5 结语

(1) 商丹俯冲增生带内的山阳-柞水地区出露的池沟花岗闪长岩、池沟闪长玢岩、白沙沟石英闪长玢岩和土地沟石英闪长玢岩的 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 144.4 Ma、150.7 Ma、151.0 Ma 和 158.8 Ma。

(2) 土地沟-池沟一带的侵入岩为一类富 Al、低 Ti 的高钾钙碱性-钾玄系列岩石, 且具有高 Sr、低 Y 的地球化学特征, 岩石构造环境判别显示其与后碰撞-后造山构造事件下地壳物质熔融作用有关。

(3) 中南秦岭山-柞地区的岩浆事件主要集中在 2 个阶段: 885~621 Ma 和 233~132 Ma。早期岩浆活动与新元古代区域伸展机制有密切联系; 晚期岩浆活动与印支末期-燕山期西太平洋构造应力和北东向区域断裂系统控制下的后碰撞造山事件等有关。区内通过一定程度的拆沉作用、幔源物质上涌诱发地壳物质熔融从而形成了广泛的中酸性花岗(斑)岩类。

致谢: 感谢审稿专家对本文提出的许多建议, 中国地质科学院谢桂青研究员、西北有色地质勘查局 713 总队刘凯高级工程师、西安地质调查中心王虎高级工程师以及陕西紫阳中志留统底界层型剖面野外科学观测研究站均给予过帮助, 在此一并感谢。

参考文献(References):

- 陈雷, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭山阳-柞水矿集区 150~140Ma 斑岩-矽卡岩型 CuMoFe(Au) 矿床成矿作用研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 415-436.
- CHEN Lei, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. Metallogenesis of 150~140Ma porphyry-skarn CuMoFe(Au) deposit in Shanyang-zhashui ore concentration area, Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 415-436.
- 端木合顺. 陕西凤县-山阳泥盆系同沉积断裂砾岩[J]. 古地理学报, 2000, 2(3): 92-98.
- DUANMU Heshun. The Conglomerates Controlled by Synsedimentary Faults of the Devonian in the Fengxian-shanyang, Shaanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(3): 92-98.
- 方维萱, 刘家军. 陕西柞-山-商晚古生代拉分断陷盆地动力学与成矿作用[J]. 沉积学报, 2013, 31(2): 193-209.
- FANG Weixuan, LIU Jiajun. Dynamics of the Late Paleozoic Apert-pull Basin and Its Relationship with Mineralization of Gold-silver-polymetallic-barite-siderite Deposits in Zha-Shan-Shang, Shaanxi Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(2): 193-209.
- 弓虎军, 朱赖民, 李博亚, 等. 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[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 248-264.
- GONG Hujun, ZHU Laimin, LI Boya, et al. Zircon U-Pb ages and Hf Isotopic Characteristics and Their Geological Significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui Granitic Plutons in the South Qinling Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 248-264.
- 郭现轻, 闫臻, 王宗起, 等. 山阳-柞水矿集区李家砭 Ti-Fe 矿床成矿构造背景研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 437-450.
- GUO Xianqing, YAN Zhen, WANG Zongqi, et al. Tectonic Setting of Lijiabian Ti-Fe Deposit in Shanyang-zhashui Ore Concentration Area, Qinling Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 437-450.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 629-651.
- HOU Zengqian, QU Xiaoming, YANG Zhusen, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(6): 629-651.
- 侯增谦, 杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1779-1817.
- HOU Zengqian, YANG Zhiming. Porphyry Deposits in Continental Settings of China: Geological Characteristics, Magmatic Hydrothermal System, and Metallogenic Model[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(12): 1779-1817.
- 李承东, 赵利刚, 许雅雯, 等. 东秦岭造山带龟山岩组的解体及俯冲增生杂岩的厘定[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 438-439.
- LI Chengdong, ZHAO Ligang, XU Yawen, et al. Disintegration of Guishan Formation-complex and Delineation of Subduction Hyperplasia Complex in East Qinling Orogenic Belt[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 438-439.
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 秦岭—大别山花岗岩[M]. 北京: 地质出

- 版社, 1993.
- LI Xianzi, YAN Zhen, LU Xinxiang. Granitoids of Qinling-Dabie-shan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400-2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2400-2418.
- 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(12): 1445-1456.
- LING Wenli, REN Bangfang, DUAN Ruichun, et al. Zircon U-Pb Isotopic Geochronology of Wudangshan Group, Yaolinghe Group and Basic Intrusions and Its Geological Significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(12): 1445-1456.
- 刘春花, 吴才来, 邵源红, 等. 南秦岭东江口、柞水和梨园堂花岗岩类锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学与锆石 Lu-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2402-2420.
- LIU Chunhua, WU Cailai, HAO Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopic System of Dongjiangkou, Zhashui, and Liyuantang Granitoid Intrusions, South Qinling Belt, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2402-2420.
- 刘凯, 赵亮, 任涛, 等. 南秦岭柞水—山阳矿集区成矿特征及找矿方向[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(5): 849-857.
- LIU Kai, ZHAO Liang, REN Tao, et al. Analysis on Metallogenic Characteristics and Prospecting Direction of Zhashui-Shanyang Ore Cluster in South Qinling Mountains[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(5): 849-857.
- 刘仁燕, 牛宝贵, 和政军, 等. 陕西柞水地区小茅岭复式岩体东段 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质通报*, 2011, 30(2-3): 448-460.
- LIU Renyan, NIU Baogui, HE Zhenjun, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Eastern Part of the Xiaomaoling Composite Intrusives in Zhashui Area, Shaanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2-3): 448-460.
- 牛宝贵, 何政军, 任纪舜, 等. 秦岭地区陡岭-小磨岭隆起西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质论评*, 2006, 52(6): 826-835.
- NIU Baogui, HE Zhengjun, REN Jishun, et al. SHRIMP U-Pb Ages of Zircon from the Intrusion in the Western Douling-Xiaomaoling Uplift and their Geological Significances[J]. *Geological Review*, 2006, 52(6): 826-835.
- 裴先治. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安地图出版社, 1997.
- PEI Xianzhi. Composition and Tectonic Evolution of the Shangdan Structural Zone in the East Qinling, China [M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1997.
- 秦江锋. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- QIN Jiangfeng. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-trassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- 任涛, 王瑞廷, 谢桂青, 等. 陕西池沟斑岩型铜矿床含矿岩体地球化学特征、成岩成矿时代及其意义[J]. *矿床地质*, 2014, 33(4): 807-820.
- REN Tao, WANG Ruiting, XIE Guiqing, et al. Geochemistry and rock-forming and ore-forming epochs of Chigou Cu porphyry deposit in Shaanxi Province, and their implications[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(4): 807-820.
- 尚瑞钧, 严阵. 秦巴花岗岩 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
- SHAN Ruijun, YAN Zhen. Granites of Qinling-Dabashan Mountains [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988.
- 王瑞廷, 代军治, 张西社, 等. 陕西秦岭地区与小岩体有关的铜钼多金属矿床成矿背景与找矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- WANG Ruiting, DAI Junzhi, ZHANG Xishe, et al. Metallogenic setting and prospecting prediction of copper-molybdenum deposits related to small intrusions in Qinling, Shaanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- 王瑞廷, 冀月飞, 成欢, 等. 南秦岭柞水-山阳矿集区金铜矿床成矿规律与找矿方向[J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1487-1503.
- WANG Ruiting, JI Yuefei, CHENG Huan, et al. Metallogenic Regularities and Future Prospecting Direction of Gold-Copper Deposits in the Zhashui-Shanyang Orefield, Southern Qinling Orogen[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1487-1503.
- 王瑞廷, 李剑斌, 任涛, 等. 柞水-山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析[J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1291-1298.
- WANG Ruiting, LI Jianbin, REN Tao, et al. Metallogenic Conditions and Prospecting Potential of the Zhashui-Shanyang Polymetal Ore Cluster[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6): 1291-1298.
- 王瑞廷, 任涛, 孟德明, 等. 柞-山矿集区侵入岩与成矿[J]. *西北地质*, 2012, 45(Z1): 29-33.
- WANG Ruiting, REN Tao, MENG Deming, et al. Intrusive rocks and mineralization in Zhashui-Shanyang ore concentration area[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(Z1): 29-33.
- 王晓霞, 王涛, Ilmari H., 等. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义——元素和 Nd、Sr 同位素地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 935-946.

- WANG Xiaoxia, WANG Tao, Ilmari H., et al. Genesis of Mafic Enclaves from Rapakivi-textured granites in the Qinling and Its Petrological Significance: Evidence of Elements and Nd, Sr Isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 935-946.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573-1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial Variations, Origin and Their Tectonic Significance of the Late Mesozoic Granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1573-1593.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[M]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1527-1546.
- WANG Zongqi, YAN Quanren, YAN Zhen, et al. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, Central China [M]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1527-1546.
- 吴发富, 王宗起, 王涛, 等. 南秦岭山阳板板山钾长花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(2): 63-73.
- WU Fafu, WANG Zongqi, WANG Tao, et al. SHRIMP Zircons U-Pb Age and Geochemical Characteristics of the Banbanshan K-feldspar Granite in Shangyang, Southern Qinling Orogenic Belt[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(2): 63-73.
- 吴发富, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭山阳-柞水地区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 451-471.
- WU Fafu, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. Geochemical Characteristics, Zircons U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopic Composition of the Yanshanian Intermediate-acidic Plutons in the Shanyang-Zhashui Areas, Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(2): 451-471.
- 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 南秦岭东段耀岭河群、陕西群、武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因[J]. *西北地质*, 2008, 41(03): 1-29.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, LI Xiangmin, et al. Petrogenesis of the Yaolinghe Group, Yunxi Group, Wudangshan Group Volcanic Rocks and Basic Dyke Swarms from Eastern Part of the South Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(03): 1-29.
- 谢桂青, 任涛, 李剑斌, 等. 陕西柞山盆地池沟铜钼矿区含矿岩体的锆石年龄和岩石成因[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 15-26.
- XIE Guiqing, REN Tao, LI Jianbin, et al. Zircon U-Pb age and Petrogenesis of ore-bearing granitoids for the Chigou Cu-Mo deposit from the Zhashan basin, Shaanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 15-26.
- 徐学义, 陈隽璐, 张二朋, 等. 秦岭及邻区地质图 (1: 500000)[M]. 西安: 西安地图出版社, 2014.
- XU Xueyi, CHEN Junlu, ZHANG Erpeng, et al. Geological Map of Qinling and Its Adjacent Region[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2014.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1023-1042.
- YAN Zhen, WANG Zengqi, WANG Tao, et al. Tectonic Setting of Devonian Sediments in the Qinling Orogen: Constraints from Detrital Modes and Geochemistry of Clastic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1023-1042.
- 闫臻, 王宗起, 陈雷, 等. 南秦岭山阳-柞水矿集区构造-岩浆-成矿作用[J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 401-414.
- YAN Zhen, WANG Zongqi, CHEN Lei, et al. Tectono-magmatism and Metallogenesis of Shanyang-Zhashui Ore Concentration Area in Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(2): 401-414.
- 严阵. 陕西省花岗岩[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- YAN Zhen. Granite from Shaanxi Province [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1985.
- 阎明, 刘树文, 李秋根, 等. 南秦岭迷魂阵岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 390-400.
- YAN Ming, LIU Shuwen, LI Qiugen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Chronology and Lu-Hf Isotopic Features of the Mihunzhen Pluton in the South Qinling Tectonic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(2): 390-400.
- 杨恺, 刘树文, 李秋根, 等. 秦岭柞水岩体和东江口岩体的锆石 U-Pb 年代学及其意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5): 841-847.
- YANG Kai, LIU Shuwen, LI Qiugen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Geological Significance of Zhashui Granitoids and Dongjiangkou Granitoids from Qinling, Central China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(5): 841-847.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 304-316.
- ZHANG Chengli, WANG Tao, WANG Xiaoxia. Origin and Tectonic Setting of the Early Mesozoic Granitoids in Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 304-316.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling

- orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Beijing: Science Press, 2001.
- 张银龙. 陕西省山阳县小河口地区酸性-中酸性岩体地质特征及其成矿地质条件分析[J]. *陕西地质*, 2002, 20(2): 27-38.
- ZHANG Yinlong. Geological features and the metallogenic conditions of acid-intermediate acid small rock bodies in Xiaohoukou area of Shangyang County, Shaanxi Province[J]. *Shaanxi Geology*, 2002, 20(2): 27-38.
- 赵东宏, 杨忠堂, 李宗会, 等. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- ZHAO Donghong, YANG Zhongtang, LI Zonghui, et al. Geological Setting and Metallogenic Regularity of Dominant Minerals in Qinling Metallogenic Belt[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 1985, 45: 43-55.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- Ludwig K R. Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 2003: 70.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79: 1-24.
- Middlemost E A H. Naming materials in magma-igneous rock system[J]. *Earth Sciences Reviews*, 1994, 7: 215-224.
- RichWood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22: 247-263.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D, Norry M J (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*[M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crusts: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman Ltd, 1989.
- Yan Zhen, Wang Zengqi, Yan Quanren, et al. Devonian Sedimentary Environments and Provenance of the Qinling Orogen: Constraints on Late Paleozoic Southward Accretionary Tectonics of the North China Craton[J]. *International Geology Review*, 2006, 48(7): 585-618.
- Yan Zhen, Wang Zengqi, Yan Quanren, et al. Geochemical Constraints on the Provenance and Depositional Setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, Central China: Implications for the Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(1): 9-20.