西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·地球科学·

华北地块南缘骊山花岗岩成因机制:锆石与独居石 U-Pb 年代学及地球化学约束

王　超,李　玮,冯振伟,张　乐,梁　立,姜柳青

西北大学 地质学系/大陆演化与早期生命全国重点实验室,陕西 西安　710127

摘要　为探究华北地块南缘与北秦岭构造带交汇区在晚中生代期间发生的地质事件,以岩石学、锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素地球化学等手段解析骊山地区发育的晚中生代花岗岩体特征。野外地质调查表明,骊山花岗岩岩基由侵入太华群的九岭头、马角、野鸡胡岩体组成;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年揭示,骊山花岗岩基形成于晚侏罗世(152 ~148 Ma)。九岭头岩体锆石 U-Pb 年龄为 151 ~148 Ma,全岩地球化学特征显示出高硅(SiO_2 质量分数为 76.43% ~77.51%)、弱过铝质(A/CNK = 1.02 ~1.09)、高钾钙碱性系列特征,分异指数为 95.1 ~95.8,δEu = 0.57 ~1.01(平均 0.79),是典型高分异 I 型花岗岩;联合锆石和独居石 U-Pb 同位素定年结果显示,马角岩体和野鸡胡岩体的结晶年龄分别为(148 ±1)Ma 到(152 ±1)Ma,具有均一的 SiO_2 质量分数(68.5% ~77.1%)和强过铝质特征(A/CNK 值 = 1.08 ~1.38,标准刚玉质量分数达 3.90%),δ(Eu) = 0.84 ~1.06(平均0.92),为典型 S 型花岗岩。微量元素显示,骊山花岗岩具有典型上地壳属性特征,富集 Rb、Th、U、Nb、Ta、K、Pb 等元素,亏损 Sr、P、Ti 等元素。锆石 Lu-Hf 同位素表现出明显富集特征〔$\varepsilon_{Hf}(t)$ = -27.4 ~ -14.7)〕及古老的二阶段模式年龄(2.93 ~2.13 Ga),与太华群变质结晶基底年龄(2.85 ~2.14 Ga)高度一致,表明其源区为新太古代—古元古代的古老大陆地壳物质。综合区域构造背景及同期岩浆活动特征,推测其源区物质来源于太华群片麻岩和变沉积岩等地壳物质的再造产物,指示了秦岭造山带陆内物质再造的构造 - 岩浆响应过程。

关键词　骊山岩体;U-Pb 定年;晚中生代;华北地块;地壳活化

中图分类号:P588.12　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-016

Genesis of the Lishan granites in the Southern North China Block: Constraints from zircon and monazite U-Pb geochronology and geochemistry

Wang Chao, Li Wei, Feng Zhenwei, Zhang Le, Liang Li, Jiang Liuqing

State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract　To constrain the geological events occurring in the junction zone between the southern margin of the North China Block and the North Qinling Orogenic Belt during the Late Mesozoic, this study characterizes Late

收稿日期:2026-05-17　　修回日期:2026-06-19

基金项目:国家自然科学基金(41872218,41572179,41372204)

第一作者:王超,男,从事地质学研究,512675546@qq.com。

通信作者:李玮,男,教授,博士生导师,从事构造地质学研究,liwei@nwu.edu.cn。

Mesozoic granitic plutons exposed in the Lishan area via petrology, zircon U-Pb geochronology, Lu-Hf isotopic geochemistry, and other analytical approaches. Field geological mapping reveals that the Lishan granitic batholith consists of the Jiulingtou, Majiao, and Yejihu plutons, which intrude the Taihua Complex. Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) zircon U-Pb isotopic dating constrains the emplacement age of the Lishan batholith to the Late Jurassic (152 ~ 148 Ma). Zircon U-Pb ages of the Jiulingtou pluton range from 151 to 148 Ma. Whole-rock geochemical data indicate high SiO_2 silica contents (76.43% ~ 77.51%), weakly peraluminous signatures (A/CNK = 1.02 ~ 1.09), and high-K calc-alkaline affinities. This pluton yields differentiation indices of 95.1 ~ 95.8 and Eu anomalies of 0.57 ~ 1.01 (average = 0.79), classifying it as a typical highly fractionated I-type granite. Combined zircon and monazite U-Pb isotopic dating yields crystallization ages of (148 ± 1) Ma to (152 ± 1) Ma for the Majiao and Yejihu plutons. These two plutons display uniform SiO_2 concentrations (68.5% ~ 77.1%), strong peraluminous features (A/CNK = 1.08 ~ 1.38, with normative corundum up to 3.90 wt. %), and δ(Eu) values of 0.84 ~ 1.06 (average = 0.92), consistent with archetypal S-type granites. Trace element patterns of the Lishan granites document typical upper crustal signatures, characterized by enrichment in Rb, Th, U, Nb, Ta, K, and Pb, alongside depletion of Sr, P, and Ti. Zircon Lu-Hf isotopes exhibit markedly enriched signatures with $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ranging −27.4 ~ −14.7, coupled with ancient two-stage Hf model ages of 2.93 ~ 2.13 Ga. These ages match well with the metamorphic basement ages of the Taihua Complex (2.85 ~ 2.14 Ga), demonstrating that the magmas were derived from Archean-Paleoproterozoic ancient continental crustal materials. Integrating regional tectonic framework and coeval magmatism, we infer that the parental magmas were generated via reworking of crustal lithologies including gneisses and metasediments from the Taihua Complex, recording a tectono-magmatic response to intracontinental crustal reworking within the Qinling Orogenic Belt.

Keywords Lishan pluton; U-Pb geochronology; Late Mesozoic; North China Block; crustal reworking

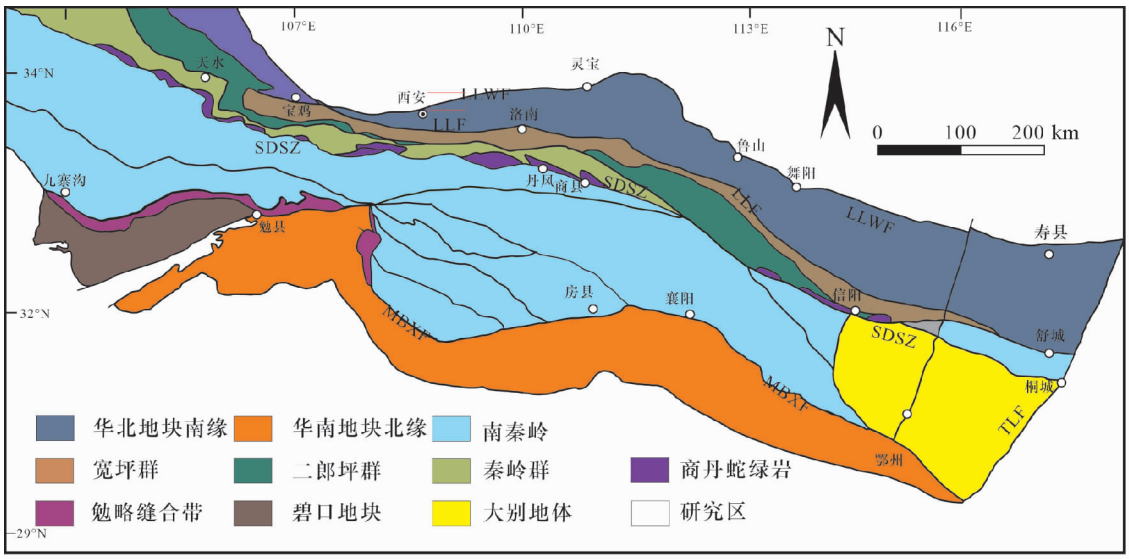
秦岭造山带作为中国中央造山系的核心组成单元〔见图 1(a)、(b)〕,以近东西向横贯中国大陆中部,延伸逾 2 500 km,经历了多旋回构造演化过程[1-2]。晚中生代(170 ~ 80 Ma)是该造山带构造 - 岩浆活动的重要转型期,广泛发育的同构造期花岗岩类(包括华南及秦岭东部),为揭示陆壳物质循环与构造动力学耦合机制提供了关键载体[3-7]。其中,岩体源区属性、侵位机制及变形改造特征的解析,是重建造山带演化过程的重要突破口。

前人对秦岭造山带中生代花岗岩的研究已建立较为系统的理论框架[8-17]。①岩石成因分类研究,建立 S 型(沉积岩源区)、I 型(火成岩源区)和少量 A 型(非造山环境)的花岗岩组合[4],其中华北地块南缘及北秦岭以新生的下地壳熔融为主,南秦岭则显示古老地壳物质的特征。②高精度年代学揭示 3 期岩浆活动,包括印支期(250 ~ 200 Ma)发育碰撞相关的 S-I 型花岗岩,燕山早期发育(170 ~ 140 Ma)形成于俯冲 - 碰撞后转换背景的 I 型花岗岩,燕山晚期(130 ~ 80 Ma)则出现伸展背景下的 A/I 型花岗岩[5-6,9,12]。③动力学机制方面的主要成果为,晚三叠世—中晚侏罗世,岩浆活动与华北—扬子地块碰撞后应力松弛引发的减压熔融相关[9,11],而晚侏罗世—晚白垩世,A 型花岗岩及基性岩墙群则响应岩石圈拆沉减薄事件,可能与古太平洋板块西向俯冲引发的弧后伸展存在成因联系[11-13]。

本研究聚焦骊山关键构造单元——位于华北地块南缘与北秦岭构造带的构造拼贴带(见图 1),地处鄂尔多斯地块东南缘与渭河断陷盆地的过渡部位。其特殊的构造位置体现在:①作为秦岭造山带的北部边界,完整记录了中生代华北地块—秦岭造山带多期拼合的过程;②叠加古特提斯洋闭合、陆内造山及新生代活化等多期构造事件;③保存了华北克拉通破坏与造山带演化的相互作用证据,是研究陆块拼贴、克拉通破坏耦合机制的理想窗口。尽管前人对该区太华群的变质基底及断裂系统已有深入研究[18-23],但侵入其中的晚中生代花岗岩仍存在 3 个关键问题:①精确成岩时代及期次划分;②源区物质组成与熔融机制;③构造背景的动态演化过程。

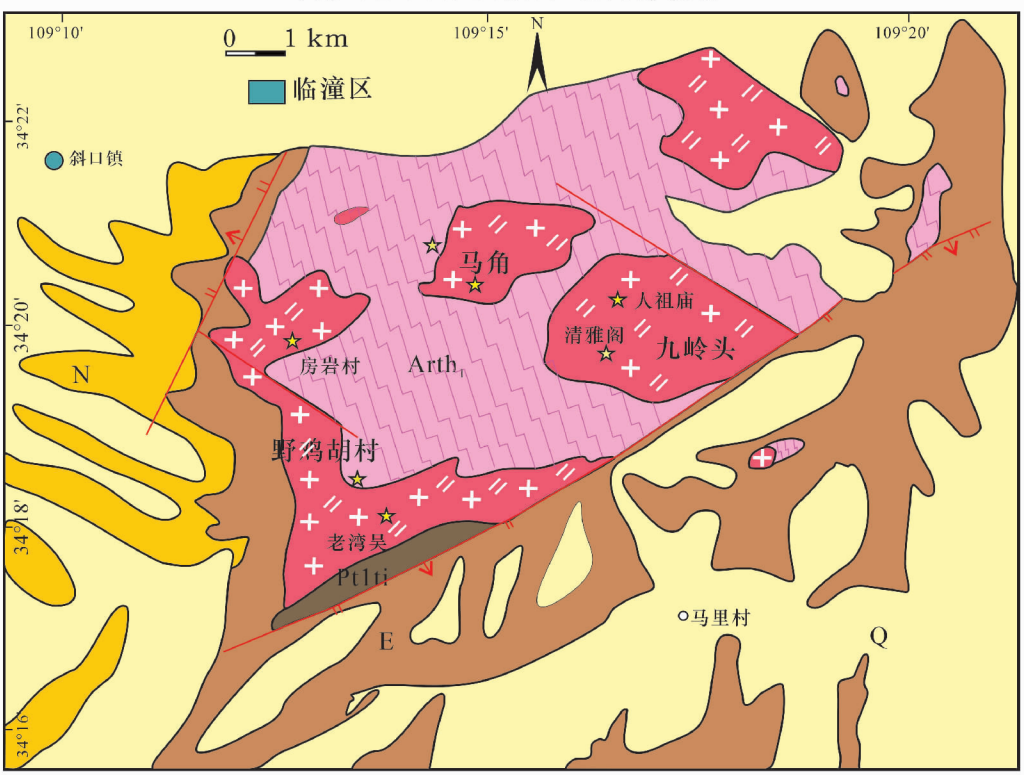
本研究选取骊山地区新识别的晚中生代花岗

岩体,开展系统岩石学研究:①锆石与独居石 LA-ICP-MS U-Pb 定年建立岩浆演化时序;②全岩主－微量元素分析约束岩浆过程;③锆石 Lu-Hf 同位素示踪源区属性。通过上述研究:厘定岩体的侵位时代与区域岩浆活动期次的对应关系;揭示壳幔相互作用的程度及古老、新生地壳物质的贡献比例;建立岩浆类型－构造环境－动力学机制的成因链条。研究成果将完善秦岭造山带—华北地块过渡带岩浆响应的时空格架,为克拉通破坏与造山带活化耦合机制研究提供关键约束。



注：LLWF 灵宝－鲁山－舞阳断裂;LLF 洛南－栾川断裂MB；XF 勉略构造带；SDSZ 商丹构造带；TLF 郯庐断裂

(a)秦岭造山带构造纲要图（据文献[2]修改）



(b)骊山地区花岗质岩体分布图

图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

1 区域地质背景

秦岭造山带作为中国中央造山系的核心构造单元,其空间结构具有清晰的构造分区性(见图 1)[24-25]。以灵宝—鲁山—舞阳断裂、洛南—栾川断裂带、商丹构造带、勉略缝合带断裂为界,自北向南依次划分为:华北地块南缘、北秦岭地体、南秦岭地体及华南地块北缘。该造山带东接大别—苏鲁超高压变质带,西南邻接碧口地体,其复杂的岩浆 - 变质记录系统保存了古亚洲洋、特提斯洋多阶段闭合及陆块拼合的构造信息,岩浆活动的时空迁移规律为造山带演化提供很好的证据。

秦岭造山带花岗岩的时空分布呈现阶段性演化特征,与区域构造体制转换密切耦合。新元古代,岩浆岩记录了宽坪洋闭合后的地块汇聚 - 裂解事件,发育强烈构造变形及 TTG 岩套侵位(979 ~711 Ma)[26],标志着 Rodinia 超大陆聚合 - 裂解过程的岩浆记录;早古生代(507 ~400 Ma),商丹洋持续俯冲导致北秦岭增生楔形成,伴随俯冲型花岗岩侵位,最终洋盆闭合诱发同碰撞花岗岩(450 ~ 420 Ma)侵位[26];早中生代(250 ~ 185 Ma),勉略洋闭合触发印支期陆 - 陆碰撞,诱发大规模深熔型 S 型花岗岩形成(230 ~ 200 Ma)[25,27],指示陆壳加厚背景下的部分熔融;晚中生代(160 ~100 Ma),岩浆活动集中于华北地块南缘及北秦岭,A/I型花岗岩组合的成因机制存在构造模型分歧,是古太平洋板块西向俯冲引发的弧后伸展[11],还是陆内后碰撞岩石圈拆沉导致的伸展[28],反映克拉通破坏与造山带活化的动力学争议。

华北地块南缘作为秦岭造山带的后陆逆冲褶皱带[24,28],其核心地质单元太华群构成了骊山花岗岩的围岩系统与潜在源区[29-30],该变质基底具有 3 个特征。①在空间展布方面,沿华北地块南缘呈 NW—SE 向延伸约 450 km。②在组成与时代方面,太华群可分为上下两个亚群,下亚群(新太古代 2.85 ~ 2.50 Ga)以 TTG 片麻岩为主体[31-32],夹斜长角闪岩、麻粒岩透镜体,反映初始陆壳垂向增生[31-32];上亚群(古元古代 ~2.3 Ga)以石墨片麻岩、条带状铁建造(BIF)、大理岩等变质沉积岩为主,指示克拉通化后的稳定沉积环境[33-34]。③太华群的演化过程。太华群经历了新太古代陆壳增生(2.90 ~ 2.73 Ga)、TTG 侵位(2.85 ~2.50 Ga)和麻粒岩相变质(约 2.43 Ga)过程,以及古元古代盖层沉积(2.3 ~2.1 Ga)阶段、角闪岩相变质(约 1.85 Ga)阶段[35-37],完整记录了华北地块早期形成 - 演化的历史。

研究区位于秦岭造山带—华北地块构造叠接带,出露新太古代太华群结晶基底、古元古代铁洞沟组及晚中生代花岗岩体群(九岭头、马角、野鸡胡岩体等),上覆新生代未变质的沉积盖层。晚中生代花岗岩(160 ~100 Ma)侵位时代与华北地块南缘卷入秦岭陆内造山作用的时间窗口高度吻合[9],其空间定位受控于太华群的基底断裂系统。骊山地区的晚中生代花岗岩为揭示晚中生代华北地块南缘的活化机制(如岩石圈减薄、地壳再熔融)与秦岭陆内的造山动力学耦合过程提供了关键约束。

2 样品特征

骊山晚中生代花岗岩体呈多个小岩珠侵入到太华群片麻岩中〔见图 2(a) ~(c)〕,岩性主体为细、中粒黑云母二长花岗岩和中粒黑云母花岗闪长岩,可见钾长石斑晶(见图 2)。

2.1 九岭头岩体

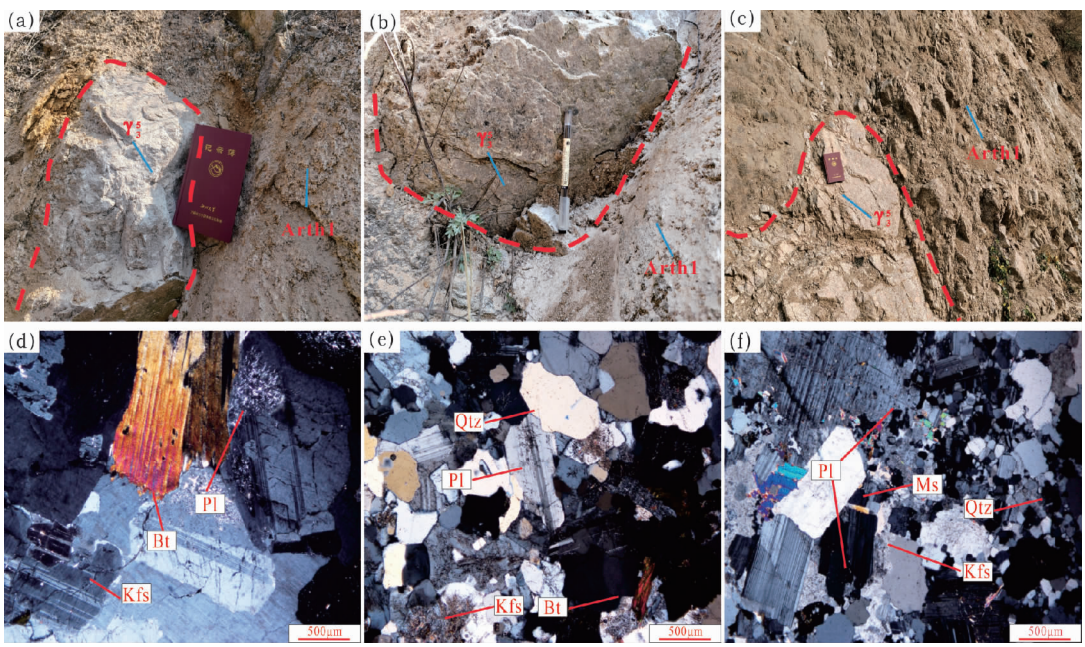
样品 LS20 为细粒黑云母二长花岗岩(粒度 0.5 ~1 mm),新鲜面呈粉红色,块状构造,可见钾长石斑晶,主要矿物组成为石英(质量分数 40%)、钾长石(质量分数 40%,具弱高岭土化)、斜长石(质量分数 15%,聚片双晶)、黑云母(质量分数 3%),副矿物以锆石 - 榍石组合为主。样品 LS21 为中细粒黑云母二长花岗岩(粒度 0.4 ~2 mm),新鲜面呈粉红色,块状构造,钾长石斑晶分布不均,主要组成矿物为石英(质量分数 40%)、钾长石(质量分数 35%)、斜长石(质量分数 15%)、黑云母(质量分数 5% ~8%),副矿物为锆石、磷灰石、榍石组合,发育蠕英结构〔见图 2(a)〕,指示岩浆 - 围岩高温相互作用。

2.2 马角岩体

样品 LS22 为中粒黑云母花岗闪长岩(粒度 1 ~2 mm),新鲜面为粉红色,块状构造,主要矿物组成为石英(质量分数 45%)、钾长石(质量分数 25%)、斜长石(质量分数 20%)、黑云母(质量分数 5%),含独居石(质量分数 3%),副矿物为锆石、磷灰石、榍石;反映富稀土元素熔体特征〔见图 2(b)〕。

2.3　野鸡胡岩体

样品 LS24 为中粒黑云母二长花岗岩(粒度 1 ~ 1.5 mm),新鲜面为肉红色,块状构造,主要矿物为石英(质量分数 40%)、钾长石(质量分数 25%)、斜长石(质量分数 25%)、黑云母(质量分数 5% ~ 10%),可见闪长质包体和后期石英脉侵入。样品 LS25 为中粒黑云母二长花岗岩(粒度 1 ~ 2 mm),新鲜面呈肉红色,块状构造。组成矿物为石英(质量分数 45%)、钾长石(质量分数 25%)、斜长石(质量分数 20%)、黑云母(质量分数 5% ~ 10%),副矿物为锆石、磷灰石、榍石,可见钾长石 - 石英斑晶〔见图 2(f)〕,揭示多期流体活动事件。



(a)、(b)、(c)为九岭头、马角、野鸡胡岩体的野外接触关系;(d)、(e)、(f)分别为九岭头、野鸡胡、马角岩体镜下特征

注:Qtz 石英;Pl 斜长石;Kfs 钾长石;Bt 黑云母;Ms 白云母。

图 2　骊山花岗岩体野外及镜下特征

Fig. 2　Field and microscopic characteristics of the Lishan granite pluton

3　分析方法

3.1　锆石与独居石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素分析

锆石与独居石分选由北京锆石领航科技有限公司完成,流程包括:岩石样品破碎、筛分后,采用重液法分选目标矿物;挑选无裂隙、无包体的晶体颗粒,制靶于环氧树脂并抛光至颗粒半暴露;锆石阴极发光(CL)与独居石背散射(BSE)成像(FEI Quanta 400 FEG SEM & Gatan Mono CL3 +),确定激光剥蚀位置。

3.1.1　LA-ICP-MS U-Pb 定年

采用 Agilent 7900a ICP-MS 联用 GeoLas 200 M 激光剥蚀系统(193 nm,光斑 24 μm,能量 90 MJ,频率 6 Hz);用锆石 91500(U-Pb 外部标准)和 NIST610(元素浓度标准)进行标样校正,每 6 个分析点插入标样;利用 Glitter 软件和 Isoplot 4.0 程序进行数据处理和年龄计算[38],采用锆石 U-Pb 年龄测定的方法校正普通铅[39]。详细的分析过程参考文献[40]。

3.1.2　LA-MC-ICP-MS Lu-Hf 同位素分析

Lu-Hf 同位素分析采用 NuPlasma II MC-ICP-MS 联用 RESOLution M-50 激光剥蚀系统(光斑 43 μm,能量密度 6 J/cm^2,频率 5 Hz);采用 $^{176}Lu/^{175}Lu = 0.026\ 56$、$^{176}Yb/^{173}Yb = 0.786\ 96$ 扣除同质异位素干扰;Hf 和 Lu 同位素比值及 Yb 同位素比值分别采用 $^{179}Hf/^{177}Hf = 0.732\ 5$、$^{173}Yb/^{171}Yb = 1.123\ 46$ 进行仪器质量歧视效应校正。在分析过程中,每 8 个样品插入国际标样 91500 与 Mud-tank,数据质量通过 TRA(Time-Resolved Analysis)时间分辨分析模式,每个质量数的积分时间为 0.2 s,背景采集时间为 30 s,样品积分时间为 50 s,吹扫时间为 40 s,详细的分析方法和仪器参

数见文献[41-42]。

3.2 全岩主微量元素分析

本研究共取得 23 个花岗岩样品,所有样品全岩主微量元素实验测试均在大陆演化与早期生命全国重点实验室完成。将新鲜样品粉碎至 74 μm,取 0.7 g 粉末与 $Li_2B_4O_7$-LiF 熔剂(5.2∶0.4)混合熔融制玻璃片;采用 Rigaku RIX 2100 XRF 光谱仪进行主量元素分析。样品粉末与 HF、HNO_3 混合物混合,置于聚四氟乙烯内衬高压溶样弹中密闭消解,在 190 ℃烘箱下放置 48 h 之后,采用 Agilent 7900 ICP-MS 分析其微量元素。实验过程中每分析 10 个样本,随机抽取 1 个样本作为重复样,以检验准确性。

3.3 独居石 U-Pb 定年

独居石的分离和制靶由北京锆石领航科技有限公司完成,在中国地质调查局西安地质调查中心实验室进行测试分析。样品经破碎后采用浮选和磁选方法分选出独居石,在双目镜下挑选出晶形较完整、色泽较好、透明度较高的独居石颗粒,将其制成环氧树脂靶。结合反射光、透射光以及背散射图像,选取无裂隙、无矿物包裹体以及残留核的位置进行分析。分析仪器由 193 nm 准分子激光剥蚀系统(Geo las Pro)和安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)联合组成。激光剥蚀束斑直径 16 μm,频率为 2 Hz,载体为氦气,采用独居石标准物质 44069 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素校正。每个分析数据包括大约 20 ~ 30 s 空白信号和 50 s 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-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICP-MS-Data Cal 完成。年龄谐和曲线的绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Exver 3 完成,详细测试流程参考文献[43]。

4 分析结果

4.1 锆石及独居石 U-Pb 同位素年龄

4.1.1 九岭头岩体

九岭头岩体样品中,锆石呈自形 - 半自形晶,发育清晰的振荡环带〔见图 3(a)、(b)〕,长宽比 3∶1 ~ 1∶1,粒径 50 ~ 200 μm,Th/U 比值为 0.29 ~ 1.21。样品 LS20 获得锆石 U-Pb 加权平均年龄为(148 ± 1)Ma(MSWD = 1.12,n = 26)〔见图 4(a)〕;样品 LS21 获得锆石 U-Pb 加权平均年龄为(151 ± 2)Ma(MSWD = 1.20,n = 22)〔见图 4(b)〕。高 Th/U 比值与岩浆锆石的特征一致,解释为晚侏罗世岩浆结晶年龄。

4.1.2 马角岩体

马角岩体样品中,锆石振荡环带清晰〔见图 3(c)〕,长宽比 3∶1 ~ 1∶1,粒径 50 ~ 150 μm,Th/U = 0.34 ~ 1.10。独居石为自形晶,表面光洁〔见图 3(f)〕,粒径 50 ~ 120 μm。经过分析测试和数据处理,获得独居石 U-Pb 加权平均年龄为〔(152 ± 1)Ma(MSWD = 0.98,n = 26)见图 4(c)〕;锆石 U-Pb 加权平均年龄为〔(148 ± 1)Ma(MSWD = 0.64,n = 28)见图 4(d)〕。锆石与独居石年龄高度吻合(约 150 Ma),限定岩体侵位于晚侏罗世。

4.1.3 野鸡胡岩体

野鸡胡岩体样品(LS24、LS25)中锆石振荡环带发育〔见图 3(d)、(e)〕,长宽比 3∶1 ~ 2∶1,粒径 80 ~ 220 μm,Th/U = 0.24 ~ 1.10。两件样品锆石 U-Pb 加权平均年龄均为(148 ± 1)Ma〔〔LS24:MSWD = 0.46,n = 20;LS25:MSWD = 0.85,n = 28)〕〔图 4(e)、(f)〕。年龄一致性反映岩体快速侵位,与区域晚中生代岩浆事件同步。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

对骊山花岗岩样品(LS21、LS22、LS24、LS25)各选取 18 颗锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析(见表 1),结果显示,所有样品具有高度一致的古老地壳来源特征。九岭头岩体样品(LS21)$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 26.26 ~ - 14.66,$^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.282 044 ~ 0.282 276,二阶段模式年龄 2 129 ~ 2 857 Ma。马角岩体样品(LS22)$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 27.39 ~ - 18.58,$^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.281 909 ~ 0.282 160,二阶段模式年龄为 2 374 ~ 2 928 Ma。野鸡胡岩体样品(LS24)的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 26.68 ~ - 17.55,$^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.281 929 - 0.282 193,二阶段模式年龄为 2 310 ~ 2 884 Ma。样品(LS25)的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 - 26.78 ~ - 18.18,$^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.281 926 ~ 0.282 169,二阶段模式年龄为 2 352 ~ 2 890 Ma。

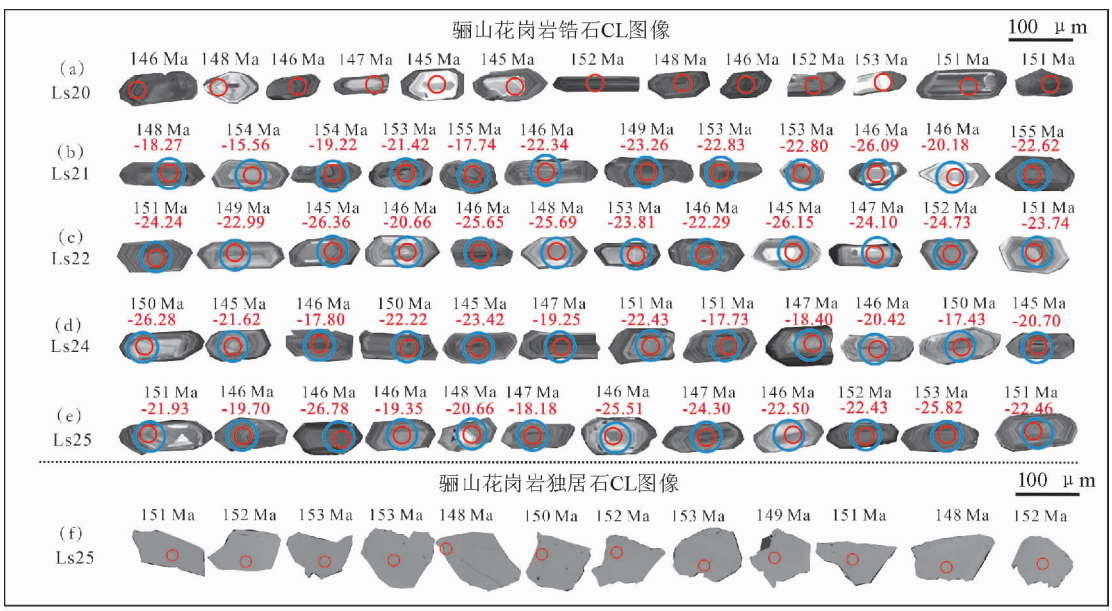
4.3 全岩主量和微量元素特征

4.3.1 主量元素特征

晚中生代骊山花岗岩标准矿物 CIPW 计算结果见表 2,全岩主微量元素结果见表 3。

九岭头岩体采集 8 个样品,其 SiO_2 质量分数为 71.76% ~ 77.51%、Na_2O 质量分数为 1.90%

~4.09%、K_2O 质量分数为 2.23% ~6.10%、Na_2O+K_2O 质量分数为 6.32% ~8.35%。在侵入岩 TAS、侵入岩 Q-A-P、A/NK-A/CNK 和硅钾图解中,九岭头花岗岩样品分别落入花岗岩、二长花岗岩、弱过铝质和高钾钙碱系列区域[44-47]〔见图 5〕。所选样品的分异指数较高,为 95.05 ~95.77,$Fe_2O_3^T$ 质量分数为 0.63% ~1.95%,MgO 质量分数为 0.03% ~0.71%,Al_2O_3 质量分数为 12.21% ~14.44%。九岭头花岗岩的 CaO 质量分数为 0.13% ~2.14%,TiO_2 质量分数为 0.06% ~0.24%,P_2O_5 质量分数为 0.02% ~0.07%;铝饱和指数 A/CNK 值为 1.02 ~1.09,A/NK 值为 1.12 ~1.21,刚玉质量分数为 0.25% ~1.03%,$FeO^T+MgO+TiO_2$ 质量分数为 0.49% ~0.72%,$Mg^{\#}$ = 8 ~21(见表 2)。



注:红圈为锆石分析点,篮圈为 Lu-Hf 分析点,黑色数值为年龄,红色数字为 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值。

图 3　骊山花岗岩锆石 - 独居石 CL 图像

Fig. 3　The zircon-monazite CL image of the Lishan granite

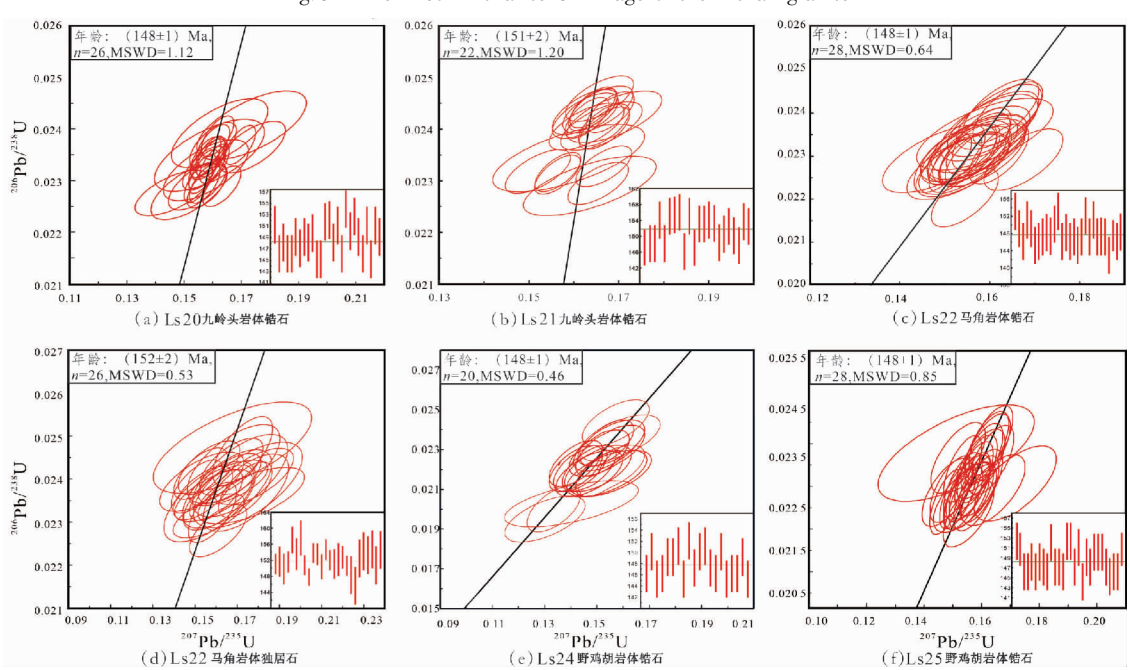


图 4　骊山花岗岩锆石 - 独居石 U-Pb 年龄协和图和加权平均年龄

Fig. 4　Zircon and monazite U-Pb concordia diagrams and weighted mean ages of the Lishan granite

表 1 骊山花岗岩体 Lu-Hf 同位素分析结果

Tab. 1 Lu-Hf isotope analysis results of the Lishan granite pluton

岩体	样品号/参数	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	年龄/Ma	I_{Hf}	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM}	T_{DMc}	T_{CHUR}	$f_{Lu/Hf}$
九岭头岩体(黑云母二长花岗岩)	LS21-01	0.053 62	0.001 88	0.282 219	151	0.282 214	-19.55	-16.43	1 491	2 242	937	-0.94
	LS21-02	0.045 29	0.001 69	0.282 167	151	0.282 162	-21.41	-18.27	1 558	2 358	1 019	-0.95
	LS21-03	0.077 38	0.002 55	0.282 240	151	0.282 233	-18.82	-15.76	1 489	2 201	922	-0.92
	LS21-04	0.034 06	0.001 20	0.282 139	151	0.282 135	-22.40	-19.22	1 577	2 418	1 050	-0.96
	LS21-05	0.038 78	0.001 44	0.282 077	151	0.282 073	-24.57	-21.42	1 673	2 555	1 159	-0.96
	LS21-06	0.059 14	0.001 87	0.282 182	151	0.282 177	-20.86	-17.74	1 543	2 324	999	-0.94
	LS21-07	0.045 71	0.001 55	0.282 052	151	0.282 047	-25.47	-22.34	1 714	2 613	1 205	-0.95
	LS21-08	0.038 56	0.001 28	0.282 054	151	0.282 050	-25.40	-22.23	1 699	2 607	1 192	-0.96
	LS21-09	0.057 25	0.002 10	0.282 027	151	0.282 021	-26.36	-23.26	1 775	2 671	1 269	-0.94
	LS21-10	0.036 13	0.001 36	0.282 037	151	0.282 033	-26.00	-22.83	1 727	2 645	1 223	-0.96
	LS21-11	0.064 60	0.002 15	0.281 942	151	0.281 936	-29.34	-26.26	1 898	2 857	1 413	-0.94
	LS21-12	0.041 37	0.001 55	0.282 038	151	0.282 034	-25.96	-22.80	1 734	2 644	1 228	-0.95
	LS21-13	0.056 15	0.001 96	0.281 947	151	0.281 941	-29.19	-26.09	1 882	2 847	1 397	-0.94
	LS21-14	0.122 70	0.004 19	0.282 276	151	0.282 264	-17.55	-14.66	1 504	2 129	908	-0.87
	LS21-15	0.081 86	0.002 72	0.282 112	151	0.282 104	-23.35	-20.32	1 682	2 486	1 148	-0.92
	LS21-16	0.039 38	0.001 25	0.282 112	151	0.282 108	-23.35	-20.18	1 617	2 479	1 096	-0.96
	LS21-17	0.049 34	0.001 55	0.282 044	151	0.282 039	-25.76	-22.62	1 725	2 630	1 219	-0.95
	LS21-18	0.049 89	0.001 53	0.282 113	151	0.282 109	-23.29	-20.14	1 627	2 477	1 103	-0.95
马角岩体(黑云母花岗闪长岩)	LS22-01	0.011 06	0.000 28	0.282 051	148	0.282 050	-25.49	-22.29	1 659	2 609	1 160	-0.99
	LS22-02	0.037 19	0.001 25	0.282 105	148	0.282 102	-23.58	-20.45	1 626	2 494	1 107	-0.96
	LS22-03	0.037 19	0.001 26	0.282 098	148	0.282 094	-23.85	-20.73	1 637	2 511	1 119	-0.96
	LS22-04	0.070 51	0.002 10	0.282 001	148	0.281 995	-27.28	-24.24	1 812	2 729	1 312	-0.94
	LS22-05	0.033 42	0.001 14	0.282 090	148	0.282 086	-24.14	-21.02	1 643	2 528	1 128	-0.97
	LS22-06	0.041 41	0.001 25	0.281 938	148	0.281 935	-29.49	-26.36	1 859	2 865	1 380	-0.96
	LS22-07	0.042 33	0.001 46	0.282 100	148	0.282 096	-23.77	-20.66	1 642	2 507	1 122	-0.96
	LS22-08	0.038 27	0.001 19	0.281 958	148	0.281 955	-28.78	-25.65	1 828	2 820	1 345	-0.96
	LS22-09	0.041 50	0.001 31	0.281 957	148	0.281 954	-28.81	-25.69	1 835	2 822	1 351	-0.96
	LS22-10	0.046 87	0.001 33	0.282 010	148	0.282 007	-26.94	-23.81	1 762	2 705	1 265	-0.96
	LS22-11	0.041 03	0.001 41	0.282 054	148	0.282 050	-25.40	-22.29	1 705	2 609	1 197	-0.96
	LS22-12	0.042 11	0.001 40	0.281 945	148	0.281 941	-29.24	-26.15	1 857	2 850	1 375	-0.96
	LS22-13	0.041 61	0.001 38	0.281 985	148	0.281 981	-27.84	-24.73	1 800	2 762	1 309	-0.96
	LS22-14	0.036 03	0.001 14	0.281 909	148	0.281 906	-30.53	-27.39	1 894	2 928	1 423	-0.97
	LS22-15	0.040 44	0.001 24	0.282 013	148	0.282 009	-26.85	-23.74	1 754	2 699	1 257	-0.96
	LS22-16	0.049 26	0.001 85	0.282 160	148	0.282 155	-21.63	-18.58	1 573	2 374	1 035	-0.94
	LS22-17	0.039 43	0.001 44	0.282 043	148	0.282 039	-25.77	-22.68	1 721	2 633	1 215	-0.96
	LS22-18	0.045 67	0.001 60	0.282 003	148	0.281 999	-27.19	-24.10	1 785	2 723	1 288	-0.95

续表 1

岩体	样品号/参数	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	年龄/Ma	I_{Hf}	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM}	T_{DMc}	T_{CHUR}	$f_{Lu/Hf}$
野鸡胡岩体(黑云母二长花岗岩)	LS24-01	0.039 45	0.001 38	0.282 081	148	0.282 077	-24.44	-21.34	1 666	2 549	1 151	-0.96
	LS24-02	0.042 96	0.001 29	0.281 929	148	0.281 926	-29.80	-26.68	1 873	2 884	1 396	-0.96
	LS24-03	0.035 89	0.001 21	0.282 073	148	0.282 069	-24.73	-21.62	1 670	2 567	1 159	-0.96
	LS24-04	0.040 09	0.001 32	0.282 181	148	0.282 177	-20.92	-17.80	1 523	2 327	985	-0.96
	LS24-05	0.116 95	0.003 52	0.282 193	148	0.282 184	-20.47	-17.55	1 598	2 310	1 034	-0.89
	LS24-06	0.040 75	0.001 25	0.282 055	148	0.282 052	-25.34	-22.22	1 695	2 604	1 188	-0.96
	LS24-07	0.041 86	0.001 32	0.282 022	148	0.282 018	-26.53	-23.42	1 745	2 679	1 246	-0.96
	LS24-08	0.039 89	0.001 26	0.282 140	148	0.282 136	-22.37	-19.25	1 578	2 418	1 050	-0.96
	LS24-09	0.052 28	0.001 71	0.282 051	148	0.282 046	-25.50	-22.43	1 723	2 618	1 213	-0.95
	LS24-10	0.049 78	0.001 45	0.282 183	148	0.282 179	-20.84	-17.73	1 525	2 323	985	-0.96
	LS24-11	0.059 67	0.001 85	0.282 165	148	0.282 160	-21.47	-18.40	1 567	2 365	1 027	-0.94
	LS24-12	0.031 52	0.001 05	0.282 105	148	0.282 103	-23.57	-20.42	1 617	2 493	1 099	-0.97
	LS24-13	0.036 20	0.001 31	0.282 183	148	0.282 179	-20.84	-17.73	1 520	2 323	981	-0.96
	LS24-14	0.040 48	0.001 39	0.282 099	148	0.282 095	-23.81	-20.70	1 641	2 510	1 122	-0.96
	LS24-15	0.044 97	0.001 41	0.282 112	148	0.282 108	-23.36	-20.24	1 624	2 481	1 102	-0.96
	LS24-16	0.052 28	0.001 66	0.282 132	148	0.282 127	-22.64	-19.57	1 606	2 437	1 076	-0.95
	LS24-17	0.040 49	0.001 36	0.282 126	148	0.282 122	-22.86	-19.74	1 602	2 450	1 077	-0.96
	LS24-18	0.052 88	0.001 45	0.282 053	148	0.282 049	-25.44	-22.33	1 708	2 612	1 200	-0.96
	LS25-01	0.028 31	0.001 01	0.282 082	148	0.282 079	-24.42	-21.26	1 648	2 544	1 137	-0.97
	LS25-02	0.039 09	0.001 41	0.282 064	148	0.282 060	-25.06	-21.93	1 691	2 587	1 181	-0.96
	LS25-03	0.038 59	0.001 41	0.282 127	148	0.282 123	-22.80	-19.70	1 602	2 446	1 075	-0.96
	LS25-04	0.034 39	0.001 11	0.281 926	148	0.281 923	-29.92	-26.78	1 869	2 890	1 394	-0.97
	LS25-05	0.061 78	0.001 96	0.282 139	148	0.282 133	-22.40	-19.35	1 609	2 423	1 075	-0.94
	LS25-06	0.050 93	0.001 54	0.282 101	148	0.282 096	-23.74	-20.66	1 645	2 506	1 124	-0.95
	LS25-07	0.038 97	0.001 32	0.282 169	148	0.282 166	-21.31	-18.18	1 539	2 352	1 003	-0.96
	LS25-08	0.042 40	0.001 49	0.281 963	148	0.281 959	-28.61	-25.51	1 836	2 810	1 349	-0.95
	LS25-09	0.046 45	0.001 45	0.281 997	148	0.281 993	-27.40	-24.30	1 786	2 734	1 292	-0.96
	LS25-10	0.038 76	0.001 39	0.282 047	148	0.282 044	-25.63	-22.50	1 713	2 623	1 207	-0.96
	LS25-11	0.044 46	0.001 73	0.282 051	148	0.282 046	-25.50	-22.43	1 723	2 616	1 214	-0.95
	LS25-12	0.043 94	0.001 42	0.281 953	148	0.281 950	-28.95	-25.82	1 846	2 832	1 362	-0.96
	LS25-13	0.033 48	0.001 02	0.282 042	148	0.282 039	-25.83	-22.68	1 704	2 633	1 202	-0.97
	LS25-14	0.034 38	0.001 36	0.282 049	148	0.282 045	-25.57	-22.46	1 709	2 619	1 202	-0.96
	LS25-15	0.036 57	0.001 30	0.282 088	148	0.282 084	-24.19	-21.08	1 652	2 532	1 136	-0.96
	LS25-16	0.044 62	0.001 64	0.282 106	148	0.282 101	-23.56	-20.48	1 642	2 495	1 119	-0.95
	LS25-17	0.035 24	0.001 32	0.282 141	148	0.282 137	-22.33	-19.21	1 579	2 416	1 050	-0.96
	LS25-18	0.037 13	0.001 25	0.282 124	148	0.282 121	-22.91	-19.78	1 599	2 451	1 075	-0.96

马角岩体采集 5 个样品,SiO_2 质量分数为 68.49% ~ 69.87%,Na_2O 质量分数为 3.75% ~ 4.35%,K_2O 质量分数为 2.80% ~ 3.38%,$Na_2O + K_2O$ 质量分数为 7.08% ~ 7.57%。在侵入岩 TAS、Q-A-P、A/NK-A/CNK 和硅钾图解中,马角花岗岩样品分别落入花岗闪长岩、强过铝质、高钾钙碱 - 钙碱系列系列区域(见图 5)。马角花岗岩具有高的分异指数(80.44 ~ 82.42),$Fe_2O_3^T$ 质量分数为 2.14% ~ 6.02%,MgO 质量分数为 0.54% ~ 0.64%,Al_2O_3 质量分数为 14.13% ~ 16.14%,CaO 质量分数为 1.65% ~ 2.60%,TiO_2 质量分数为 0.24% ~ 0.32%,P_2O_5 质量分数为 0.10% ~ 0.14%。铝饱和指数 A/CNK 值为 1.08 ~ 1.18,A/NK 值为 1.45 ~ 1.56,刚玉质量分数 1.19% ~ 2.43%,$FeO^T + MgO + TiO_2$ 质量分数为 2.80% ~ 6.28%,$Mg^{\#} = 15 \sim 37$。

野鸡胡岩体采集 10 个样品,SiO_2 质量分数为 71.67% ~ 77.14%,Na_2O 质量分数为 2.57% ~ 3.34%,K_2O 质量分数为 4.62% ~ 5.87%,$Na_2O + K_2O$ 质量分数为 7.38% ~ 8.78%,Al_2O_3 质量分数为 12.61% ~ 14.89%。在侵入岩 TAS、Q-A-P、A/NK-A/CNK 和硅钾图解中,野鸡胡花岗岩样品分别落入花岗岩、二长花岗岩、强过铝质高钾钙碱系列区域(见图 5)。分异指数为 90.61 ~ 94.42,$Fe_2O_3^T$ 质量分数为 0.91% ~ 1.85%,MgO 质量分数为 0.15% ~ 0.24%。此外,野鸡胡花岗岩具有低的 CaO 质量分数(0.16% ~ 0.94%),TiO_2 质量分数为 0.12% ~ 0.27%,P_2O_5 质量分数为 0.05% ~ 0.13%。铝饱和指数 A/CNK 值为 1.14 ~ 1.38,A/NK 值为 1.28 ~ 1.42,刚玉质量分数为 1.79% ~ 3.90%,$FeO^T + MgO + TiO_2$ 质量分数为 1.22% ~ 2.30%,$Mg^{\#} = 20 \sim 30$。

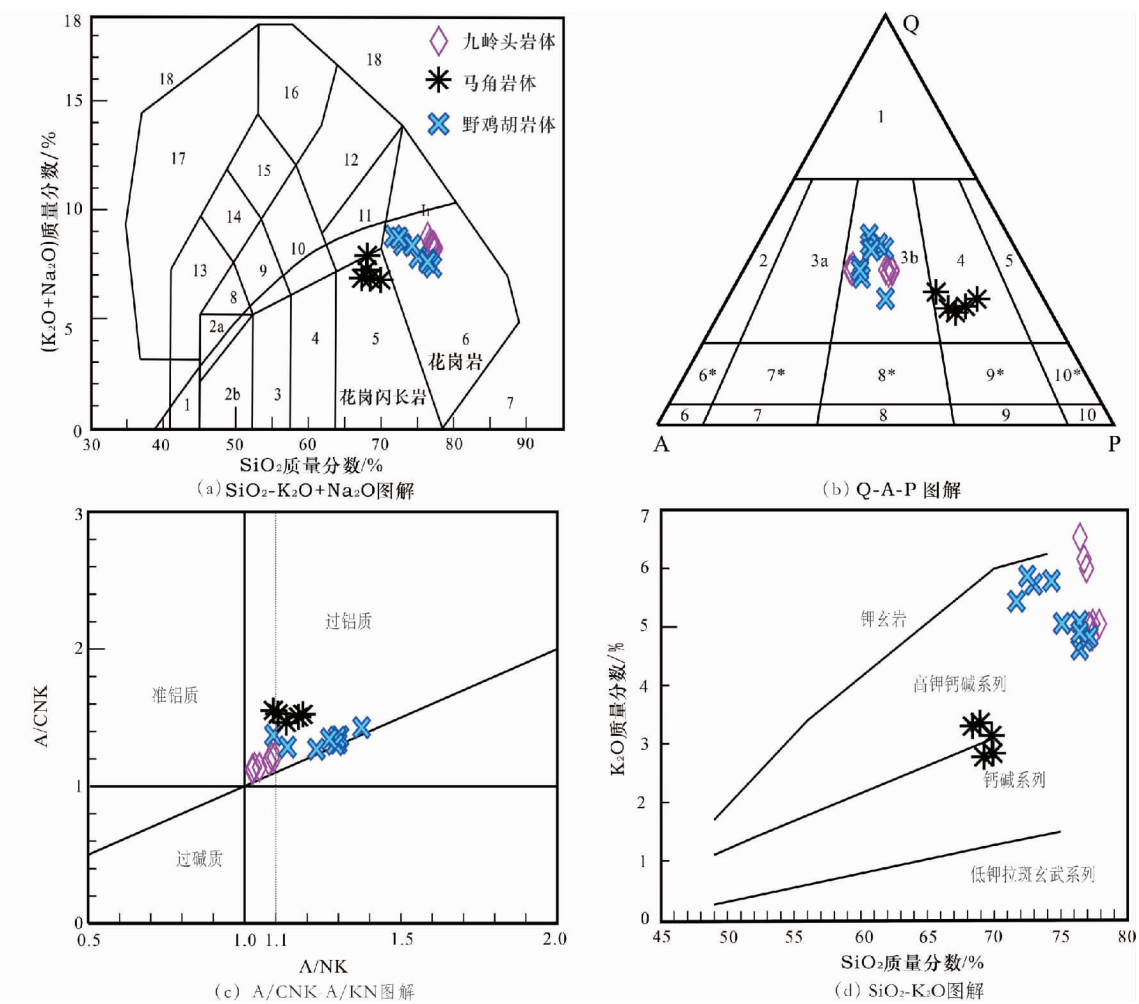


图 5 骊山花岗岩图解

Fig. 5 The diagram of Lishan Granite

表 2　骊山花岗岩 CIPW 计算结果

Tab. 2　CIPW results of Lishan granite

岩体	参数\样品号	石英	钙长石	钠长石	钾长石	刚玉	分异指数(DI)	A/NK	A/CNK	AR	A/MF	C/MF	$Mg^{\#}$
九岭头(黑云母二长花岗岩)	LS20-01	37.95	3.26	28.52	28.78	0.44	95.24	1.15	1.04	3.11	23.72	2.37	15
	LS20-02	38.26	2.92	27.28	30.07	0.43	95.61	1.14	1.04	2.99	23.87	2.17	16
	LS20-03	37.41	2.97	28.64	29.71	0.25	95.77	1.12	1.02	3.18	24.8	2.28	13
	LS20-04	37.31	2.97	28.77	29.58	0.33	95.66	1.13	1.03	3.17	24.27	2.22	16
	LS20-05	38.45	2.97	27.43	29.75	0.42	95.64	1.14	1.04	3.02	27.33	2.52	8
	LS21-01	38.97	3.24	20.32	35.78	1.03	95.07	1.21	1.09	4.43	39.48	3.76	12
	LS21-02	38.56	3.29	19.74	36.76	0.98	95.05	1.21	1.08	4.51	35.11	3.39	20
	LS21-03	37.34	3.24	18.95	38.94	0.78	95.24	1.18	1.07	4.82	31.2	2.96	21
马角(黑云母花岗闪长岩)	LS22-01	27.85	11.01	36.95	17.08	1.53	81.88	1.54	1.11	2.3	5.48	1.59	32
	LS22-02	26.15	8.54	36.47	19.79	2.49	82.42	1.52	1.18	2.36	5.48	1.58	32
	LS22-03	29.23	7.65	31.78	20.27	1.65	81.28	1.45	1.13	2.63	3.2	0.68	15
	LS22-04	27.65	11.33	36.03	18.63	1.65	82.31	1.56	1.11	2.32	5.93	1.62	37
	LS22-05	26.69	12.14	37.08	16.67	1.23	80.44	1.55	1.08	2.27	4.81	1.44	28
野鸡胡(黑云母二长花岗岩)	LS24-01	35.13	0.95	22.97	34.43	3.54	92.54	1.36	1.32	2.13	9.84	0.45	20
	LS24-02	39.62	0.75	23.5	30.31	3.94	93.43	1.42	1.38	2.23	14.51	0.52	29
	LS24-03	29.28	3.94	28.69	32.64	1.82	90.61	1.28	1.14	2.51	7.07	0.83	30
	LS24-04	36.74	1.47	22.06	34.72	3.06	93.52	1.34	1.27	2.1	14.26	0.76	22
	LS24-05	33.08	1.2	24.32	35.24	3.5	92.64	1.35	1.3	2.17	11.2	0.56	22
	LS25-01	40.13	1.36	26.37	27.63	2.34	94.13	1.28	1.22	2.75	10.87	0.54	29
	LS25-02	42.12	0.46	23.74	28.55	2.91	94.41	1.31	1.29	2.5	10.6	0.26	30
	LS25-03	43.53	0.49	21.74	28.93	3.05	94.2	1.34	1.31	2.32	10.43	0.29	30
	LS25-04	41.51	0.52	22.4	30.51	2.87	94.42	1.31	1.28	2.34	10.65	0.26	30
	LS25-05	41.81	0.41	23.1	29.45	3.02	94.36	1.32	1.3	2.41	10.72	0.24	30

注:CIPW 参数使用 Le Maitre R W(1976)方法按侵入岩调整氧化铁;氧化物在去 H_2O 等以后重换算为 100%,标准矿物为质量分数。

4.3.2　微量元素特征

九岭头岩体稀土元素具较强分异特征,轻稀土元素较重稀土元素明显富集,$\Sigma REE = (21.2 \sim 145.0) \times 10^{-6}$, $LREE = (18.3 \sim 138.0) \times 10^{-6}$, $HREE = (3.0 \sim 7.9) \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 6.2 \sim 14.1$, $Sr = (47.3 - 142.0) \times 10^{-6}$, $Rb = (215 \sim 331) \times 10^{-6}$, $Ba = (59.8 \sim 232.0) \times 10^{-6}$, $Pb = (32 \sim 64) \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 5.8 \sim 10.2$, $Zr/Hf = 19.0 \sim 20.9$, $Rb/Sr = 1.7 \sim 7.0$, $Sr/Y = 7.0 \sim 20.6$, $\delta(Eu) = 0.57 \sim 1.01$(平均 0.79), $\delta(Ce) = 0.58 \sim 1.17$(平均 0.99),显示 Eu 中等负异常,稀土元素配分曲线为不明显 U 型,富集 Rb、Th、U、Nb、Ta、K、Pb 等元素,亏损 Sr、P、Ti 等元素〔见图 6(a)〕。

马角岩体稀土元素具强分异特征,轻稀土元素较重稀土元素分异明显,$\Sigma REE = (89.1 \sim 164.0) \times 10^{-6}$, $LREE = (84.3 \sim 156.0) \times 10^{-6}$, $HREE = (4.7 \sim 8.5) \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 14.6 \sim 22.3$, $Sr = (449 \sim 613) \times 10^{-6}$, $Rb = (142 \sim 166) \times 10^{-6}$, $Ba = (317 \sim 458) \times 10^{-6}$, $Pb = (25.8 \sim 29.5) \times 10^{-6}$, $\Sigma REE = (89.1 \sim 164.0) \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 17.39 \sim 29.37$, $Zr/Hf = 35.8 \sim 38.8$, $Rb/Sr = 0.2 \sim 0.4$, $Sr/Y = 51.0 \sim 60.5$, $\delta(Eu) = 0.87 \sim 1.00$(平均 0.93), $\delta(Ce) = 1.00 \sim 1.05$(平均 1.03),指示 Eu 具不明显负异常,稀土元素配分曲线右倾,富集 Rb、Th、U、Nb、Ta、K、Pb 等元素,亏损 Sr、P、Ti 等元素〔见图 6(b)〕。

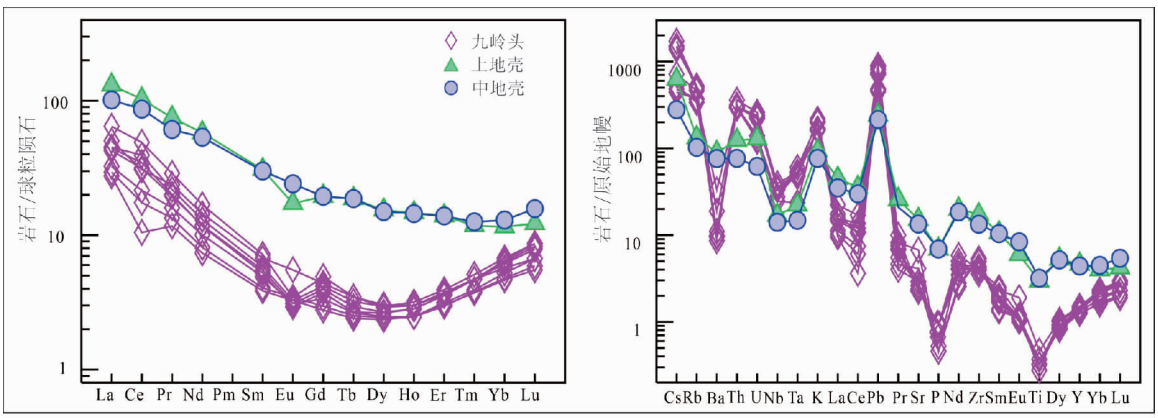
表 3 骊山花岗岩全岩主微量元素分析结果

Tab. 3 Whole-rock major and trace element analysis results of the Lishan granite

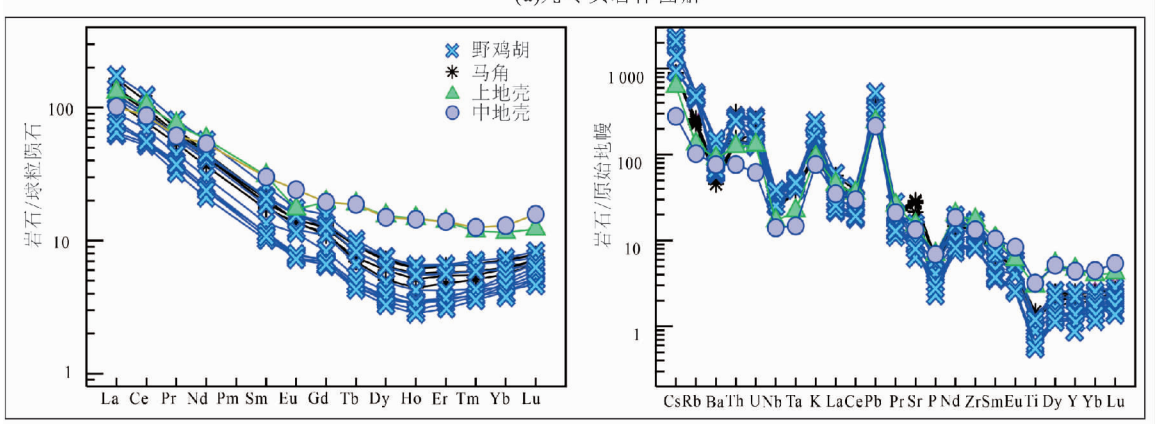
样品号	黑云母二长花岗岩								黑云母花岗闪长岩					黑云母二长								
	LS20-1	LS20-2	LS20-3	LS20-4	LS20-5	LS21-1	LS21-2	LS21-3	LS22-1	LS22-2	LS22-3	LS22-4	LS22-5	LS24-1	LS24-2	LS24-3	LS24-4	LS24-5	LS25-1	LS25-2	LS25-3	LS25-4	LS25-5
SiO_2	77.35	77.40	77.25	77.06	77.51	76.92	76.74	76.43	69.87	68.49	68.98	69.87	69.50	72.97	75.04	71.67	74.30	72.48	76.42	76.75	77.14	76.40	76.42
TiO_2	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.10	0.25	0.25	0.32	0.24	0.28	0.27	0.21	0.23	0.19	0.26	0.12	0.13	0.13	0.14	0.12
Al_2O_3	12.38	12.22	12.26	12.32	12.21	12.61	12.63	12.67	15.71	16.14	14.13	16.00	15.82	14.42	14.14	14.60	14.04	14.89	12.87	12.76	12.61	12.82	12.86
TFe_2O_3	0.66	0.64	0.65	0.63	0.66	0.43	0.41	0.44	2.59	2.64	6.02	2.14	3.28	1.67	0.91	1.85	1.08	1.45	1.11	1.11	1.13	1.10	1.10
MnO	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
MgO	0.06	0.06	0.05	0.06	0.03	0.03	0.05	0.06	0.61	0.62	0.54	0.63	0.64	0.21	0.19	0.40	0.15	0.20	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24
CaO	0.68	0.61	0.62	0.62	0.62	0.66	0.67	0.66	2.50	2.56	1.65	2.41	2.60	0.36	0.28	0.94	0.41	0.41	0.35	0.17	0.19	0.17	0.16
Na_2O	3.35	3.20	3.36	3.37	3.22	2.38	2.31	2.22	4.32	4.26	3.70	4.20	4.35	2.67	2.74	3.34	2.57	2.83	3.08	2.77	2.54	2.61	2.69
K_2O	4.84	5.05	4.99	4.96	5.00	6.00	6.16	6.53	2.86	3.31	3.38	3.11	2.80	5.73	5.06	5.44	5.79	5.87	4.62	4.77	4.84	5.09	4.91
P_2O_5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.12	0.14	0.10	0.12	0.13	0.13	0.10	0.12	0.09	0.13	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06
LOI	0.33	0.39	0.42	0.38	0.51	0.62	0.68	0.71	0.71	1.23	0.84	0.78	0.43	1.37	1.33	0.98	1.16	1.34	0.92	1.12	0.99	1.03	1.05
TOTAL	99.76	99.68	99.71	99.52	99.87	99.75	99.74	99.84	99.59	99.69	99.73	99.55	99.89	99.81	99.99	99.59	99.78	99.87	99.81	99.92	99.91	99.69	99.65
Li	12.7	12.8	13.5	12.9	12.5	11.2	12.2	10.9	36.2	37.5	27.6	37.6	36.8	11.6	23.4	24.1	11.2	11.2	25.9	21.7	22.5	23.3	21.4
Be	5.6	5.5	5.5	5.1	4.7	4.3	4.4	3.4	4.0	4.0	3.1	4.0	3.9	3.3	2.8	4.1	2.8	3.2	4.8	5.0	4.4	4.2	5.3
Sc	1.6	1.0	1.3	1.2	1.1	0.6	0.5	1.0	3.2	3.5	3.1	3.1	3.5	2.7	2.2	2.6	1.8	2.1	2.2	1.5	1.6	2.0	1.6
V	5.4	5.4	5.5	4.6	5.1	3.2	4.3	5.1	22.8	24.6	45.3	18.6	28.9	24.0	16.6	21.7	15.3	21.4	12.4	13.1	13.4	12.0	13.1
Cr	0.6	0.6	0.6	0.6	1.1	1.3	0.6	6.1	1.5	1.4	3.8	1.7	1.5	1.7	1.4	1.3	1.3	1.4	1.0	1.4	2.0	1.4	1.2
Co	95.2	113.4	144.3	64.3	117.2	66.9	152.3	105.8	69.9	50.1	98.3	61.7	79.1	61.8	62.9	54.8	100.9	92.3	104.9	90.7	114.1	49.5	80.9
Ni	2.9	3.1	3.8	2.3	3.7	2.2	4.1	2.9	3.2	2.9	4.9	3.3	3.7	2.7	2.3	2.4	3.4	3.5	3.3	4.1	4.1	2.5	3.7
Cu	2.0	2.5	3.4	3.2	3.4	6.6	9.9	12.6	1.4	1.6	2.2	1.6	1.6	1.8	1.2	17.8	1.3	1.7	3.6	3.5	3.1	4.0	3.7
Zn	20.0	22.9	25.3	24.8	26.3	5.1	5.4	10.3	25.9	27.2	37.0	24.8	27.6	36.0	28.2	39.5	28.1	31.3	15.9	14.5	13.5	14.4	15.1
Ga	16.7	17.4	18.3	17.2	18.0	14.4	14.5	16.6	20.9	21.7	22.2	20.3	21.6	18.4	17.7	19.6	15.8	17.7	17.8	15.3	15.5	16.9	15.4
Ge	2.4	2.3	2.1	2.1	0.5	1.9	1.9	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	2.6	2.2	2.4	2.2	2.4	1.9	1.9	2.0	1.8	2.0
Rb	293.5	328.5	331.0	311.9	325.0	215.0	234.0	235.5	141.8	166.0	159.6	152.3	142.7	327.9	305.8	277.3	312.0	329.9	276.9	294.4	294.7	302.7	299.9
Sr	55.1	47.3	50.3	48.3	47.9	61.2	86.9	141.7	581.0	612.5	449.0	571.8	591.0	195.7	132.1	330.3	189.2	204.1	293.9	167.0	167.3	183.5	167.2
Y	6.1	6.5	6.3	6.2	6.8	5.7	5.8	6.9	9.6	11.5	8.8	10.8	10.3	11.5	7.4	11.7	6.4	9.8	6.7	5.6	6.3	6.3	5.5
Zr	47.4	45.2	47.4	43.7	48.7	59.8	55.3	39.7	147.4	154.8	172.0	153.9	148.7	189.4	130.5	163.0	129.8	180.2	101.8	93.2	96.1	90.0	91.7
Nb	25.2	24.5	27.9	23.7	24.1	19.6	17.6	19.8	18.3	18.4	16.5	19.7	19.1	27.2	20.9	23.0	18.1	24.9	24.0	24.9	26.3	29.3	23.5
Cs	5.6	10.9	13.5	11.9	11.5	4.1	3.8	3.5	6.7	6.7	7.1	7.0	6.7	14.4	11.8	18.6	15.9	16.5	7.4	7.4	7.3	7.4	7.4
Ba	59.8	68.1	67.8	68.5	66.5	76.8	131.3	232.0	361.8	367.5	457.8	319.1	317.2	1012.6	534.5	993.1	911.4	1052.4	459.5	414.8	443.1	549.2	465.1
La	7.7	15.3	10.5	10.1	10.7	6.5	7.0	11.9	26.1	33.0	39.0	29.6	31.8	41.2	29.0	27.5	21.7	29.4	14.7	18.6	18.6	15.4	17.5
Ce	13.2	30.0	21.2	19.3	24.1	6.4	10.7	18.8	47.3	60.4	67.8	54.6	57.4	75.3	54.8	52.1	41.7	54.5	31.6	34.5	34.6	33.1	33.9
Pr	1.5	2.7	1.9	1.9	2.1	1.1	1.3	2.3	5.1	6.1	6.6	5.7	5.8	7.6	5.5	5.6	4.3	5.9	3.1	3.7	3.7	3.5	3.5
Nd	4.7	7.9	5.5	5.5	6.1	3.4	3.8	6.7	17.0	21.2	21.4	19.8	19.7	26.4	18.8	20.2	14.0	20.9	9.8	11.8	11.7	11.1	11.1
Sm	0.7	1.1	0.8	0.8	0.9	0.6	0.6	1.0	2.6	3.2	2.7	3.1	2.9	3.9	2.8	3.3	2.1	3.2	1.6	1.7	1.7	1.8	1.6
Eu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0	0.7	0.9	0.7	0.9	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Gd	0.7	1.0	0.8	0.8	0.9	0.6	0.6	0.9	2.3	2.8	2.4	2.6	2.6	3.2	2.2	2.8	1.7	2.6	1.3	1.4	1.5	1.5	1.4
Tb	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Dy	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	0.6	0.8	1.5	1.8	1.3	1.8	1.6	1.9	1.2	1.9	1.1	1.6	0.9	0.9	0.9	1.0	0.8
Ho	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Er	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	0.8	1.1	1.0	1.1	0.7	1.1	0.6	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5
Tm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Yb	0.9	1.1	1.1	1.0	1.1	0.8	0.8	1.0	1.0	1.2	1.0	1.2	1.1	1.2	0.8	1.3	0.7	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
Hf	2.5	2.3	2.4	2.3	2.4	3.0	2.8	1.9	3.9	4.0	4.8	4.1	3.9	5.1	3.6	4.5	3.5	4.9	3.5	3.3	3.4	3.2	3.3
Ta	2.1	2.0	2.2	1.9	1.9	2.5	1.0	2.1	1.6	1.5	1.5	1.7	1.6	2.0	1.6	1.8	1.6	2.1	1.8	1.9	2.1	2.0	1.9
Pb	50.3	62.3	64.0	57.7	53.0	34.3	33.8	32.0	25.8	29.5	27.5	27.7	26.2	25.0	18.3	37.4	23.9	24.2	24.0	21.0	18.0	21.2	21.4
Th	30.5	25.2	25.3	24.6	25.5	26.7	24.8	25.2	11.5	13.1	26.1	11.8	12.1	23.6	12.3	23.6	12.2	22.3	21.7	20.8	21.8	21.7	21.1
U	5.4	4.8	5.0	5.0	4.6	2.5	2.6	2.9	3.0	3.5	5.4	3.9	2.9	5.8	2.6	5.4	2.8	5.3	3.9	3.2	2.7	3.0	2.9
ΣREE	21.2	26.5	44.9	106.0	133.0	145.0	122.0	126.0	164.0	117.0	118.0	89.1	122.0	219.7	95.4	66.6	68.1	120.8	31.8	12.9	27.3	18.2	30.6
ΣLREE	18.3	23.5	41.0	99.0	125.0	138.0	114.0	119.0	156.0	112.0	110.0	84.3	115.0	207.6	92.0	62.6	64.9	116.0	28.8	10.2	21.9	15.8	28.7
ΣHREE	3.0	3.0	3.8	6.6	7.9	6.2	7.8	7.2	8.5	5.7	8.1	4.7	7.1	12.1	3.4	4.0	3.2	4.8	3.0	2.7	5.4	2.4	1.9
LREE/HREE	6.2	7.9	10.7	15.0	15.7	22.3	14.6	16.5	18.4	19.7	13.5	17.9	16.1	17.2	27.1	15.7	20.3	24.2	9.6	3.8	4.1	6.6	15.1

野鸡胡岩体稀土元素具强分异特征,轻稀土元素较重稀土元素明显富集,ΣREE = (12.9 ~ 219.7) × 10^{-6}, LREE = (10.2 ~ 207.6) × 10^{-6}, HREE = (1.9 ~ 12.1) × 10^{-6}, LREE/HREE = 13.53 ~ 19.69, Sr = (132 ~ 330) × 10^{-6}, Rb = (277 ~ 328) × 10^{-6}, Ba = (415 ~ 1 052) × 10^{-6}, Pb = (18.0 ~ 37.4) × 10^{-6}, $(La/Yb)_N$ = 11.3 ~ 27.3, Zr/Hf = 27.8 ~ 37.1, Rb/Sr = 0.8 ~ 2.3,

Sr/Y = 17.0 ~ 43.9,δ(Eu) = 0.84 ~ 1.06(平均 0.91),δ(Ce) = 1.02 ~ 1.11(平均 1.06),指示 Eu 具不明显负异常,稀土元素配分曲线右倾。富集 Rb、Th、U、Nb、Ta、K、Pb 等元素,亏损 Sr、P、Ti 等元素〔见图 6(b)〕。



(a)九岭头岩体图解



(b)马角、野鸡胡岩体图解

注:中、上地壳数据来自文献[48]

图 6　骊山花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图、原始地幔标准化蛛网图(据参考文献[49]修改)

Fig. 6　Chondrite-normalized REE distribution pattern diagram and primitive mantle-normalized spider diagram of the Lishan granite

5　讨论

5.1　岩体时代与区域岩浆事件耦合性

骊山花岗岩锆石 U-Pb 年龄(151 ~ 148 Ma)与独居石年龄(152 Ma)高度一致,限定其侵位于晚侏罗世(燕山早期),与华北地块南缘西部同期岩体(如老牛山、华山岩体)的形成时代(135 ~ 154 Ma)相一致[50-51]。区域岩浆活动呈现西早东晚的空间分异(160 ~ 125 Ma 西部岩体,125 ~ 100 Ma 东部岩体),反映晚中生代构造 - 岩浆事件自西向东迁移的动力学特征[11-12]。此时代框架与古太平洋板块俯冲引发的东亚陆缘构造体制转换期(165 ~ 140 Ma)高度耦合[52],指示骊山岩体可能是记录秦岭造山带陆内物质在俯冲碰撞初始阶段再造的岩浆产物。

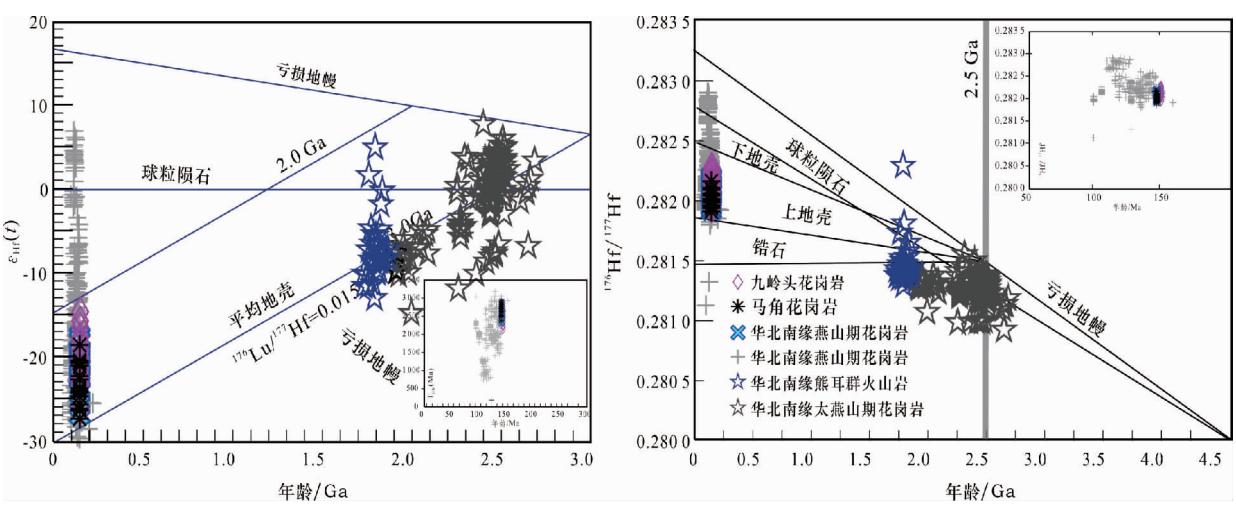
5.2　岩石成因与源区属性:太华群重熔的多元证据链

花岗岩 Lu-Hf 同位素分析显示,$\varepsilon_{Hf}(t)$ = −27.39 ~ −14.66,二阶段模式年龄(2.93 ~ 2.13 Ga)与太华群基底(2.85 ~ 2.10 Ga)类似[34,36],具有与熊耳群(1.8 ~ 1.6 Ga)完全不同的年龄特征〔见图 7(a)、(b)〕;且二阶段模式年龄主要集中在 2.9 ~ 2.6 Ga 和 2.6 ~ 2.3 Ga,$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值范围与太华群片麻岩和变沉积岩的成岩年龄相对应,二阶段模式年龄(T_{DM2})集中于 2.92 ~ 2.13 Ga,与太华群基底年龄(2.85 ~ 2.14 Ga)高度耦合[31-34],进一步印证源区为新太古代—古元古代太华群地壳物质再造。同时,花岗岩与太华群具有相似的 REE 配分曲线(LREE 富集、右倾型),

九岭头岩体、马角岩体和野鸡胡岩体的稀土元素配分曲线上扬,指示为重稀土富集,其原因可能是结晶过程中缺少石榴子石、角闪石等矿物导致重稀土未被吸收消耗;另外,Ba、P、Ti 的显著亏损指示花岗岩结晶过程中经历了显著的磷灰石、钾长石、钛铁矿等矿物的分异过程,从而形成重稀土残留,蛛网图形态(富 K、Pb,亏 Ba、Ti)指示源区与太华群有继承关系〔见图 6〕。在 Age-$\varepsilon_{Hf}(t)$ 和 Age-$^{176}Hf/^{177}Hf$ 图解中,骊山地区 3 个花岗岩体的演化模式与太华群相对应,骊山晚中生代花岗岩与太华群 Hf 同位素特征一致,确证其岩浆源自太华群变沉积岩和部分 TTG 片麻岩的深熔〔见图 7〕。其高的 Rb/Sr 比值(0.2 ~ 7.0)和 La/Yb_N 比值(5.1 ~ 29.4)特征,与中 - 下地壳太华群源区物质重熔再造特征一致[53]。

骊山地区 3 个花岗岩体的矿物组合中,九岭头岩体 A/CNK 值为 1.02 ~ 1.09,小于 1.1,标准化矿物 CIPW 计算其刚玉质量分数为 0.25% ~ 0.98%(一个样品为 1.03%),小于 1%;马角岩体和野鸡胡岩体样品 A/CNK 值为 1.11 ~ 1.38(一个样品为 1.08),大于 1.1,其刚玉质量分数为 1.23% ~ 3.94%(见表 2)。在 $(K_2O + Na_2O)/CaO$-Zr + Nb + Ce + Y 图解指示,九岭头岩体具有较高的分异特性,而马角岩体和野鸡胡岩体的分异程度较低〔见图 8(a)〕;在 Rb-Y 和 SiO_2-Y 岩体演化趋势图解中,九岭头岩体花岗岩指示与 Y-Rb 和 SiO_2-Y 成正相关,指示为 I 型花岗岩趋势,而马角岩体和野鸡胡岩体花岗岩 Y-Rb 和 SiO_2-Y 成负相关,指示为 S 型花岗岩趋势〔见图 8(b)、(c)〕。在 SiO_2-MgO、SiO_2-P_2O_5、SiO_2-TiO_2 图解中,九岭头岩体花岗岩的 MgO、P_2O_5、TiO_2 质量分数均较马角岩体和野鸡胡岩体花岗岩低〔见图 8(d) ~ (f)〕。所有分析样品中均无角闪石等幔源矿物[53-55],而野鸡胡岩体花岗岩含有特征矿物白云母。九岭头岩体花岗岩铕表现为中等负异常(0.57 ~ 0.99),岩浆来源于太华群岩浆岩;马角岩体和野鸡胡岩体花岗岩具有铕弱负异常(0.77 ~ 1.08),样品主量元素含量和变沉积岩部分熔融的实验熔体匹配[56-57],指示马角岩体和野鸡胡岩体岩浆来源于太华群变沉积岩。

综上所述:九岭头岩体花岗岩 A/CNK 值为 1.02 ~ 1.09,小于 1.1,标准化矿物 CIPW 计算其刚玉质量分数为小于 1%;马角岩体和野鸡胡岩体花岗岩样品 A/CNK 值为 1.11 ~ 1.38,大于 1.1,其刚玉质量分数大于 1%。结合 A/CNK 值、刚玉含量、图解及趋势综合判断,九岭头岩体为 I 型花岗岩,马角岩体和野鸡胡岩体为 S 型花岗岩。

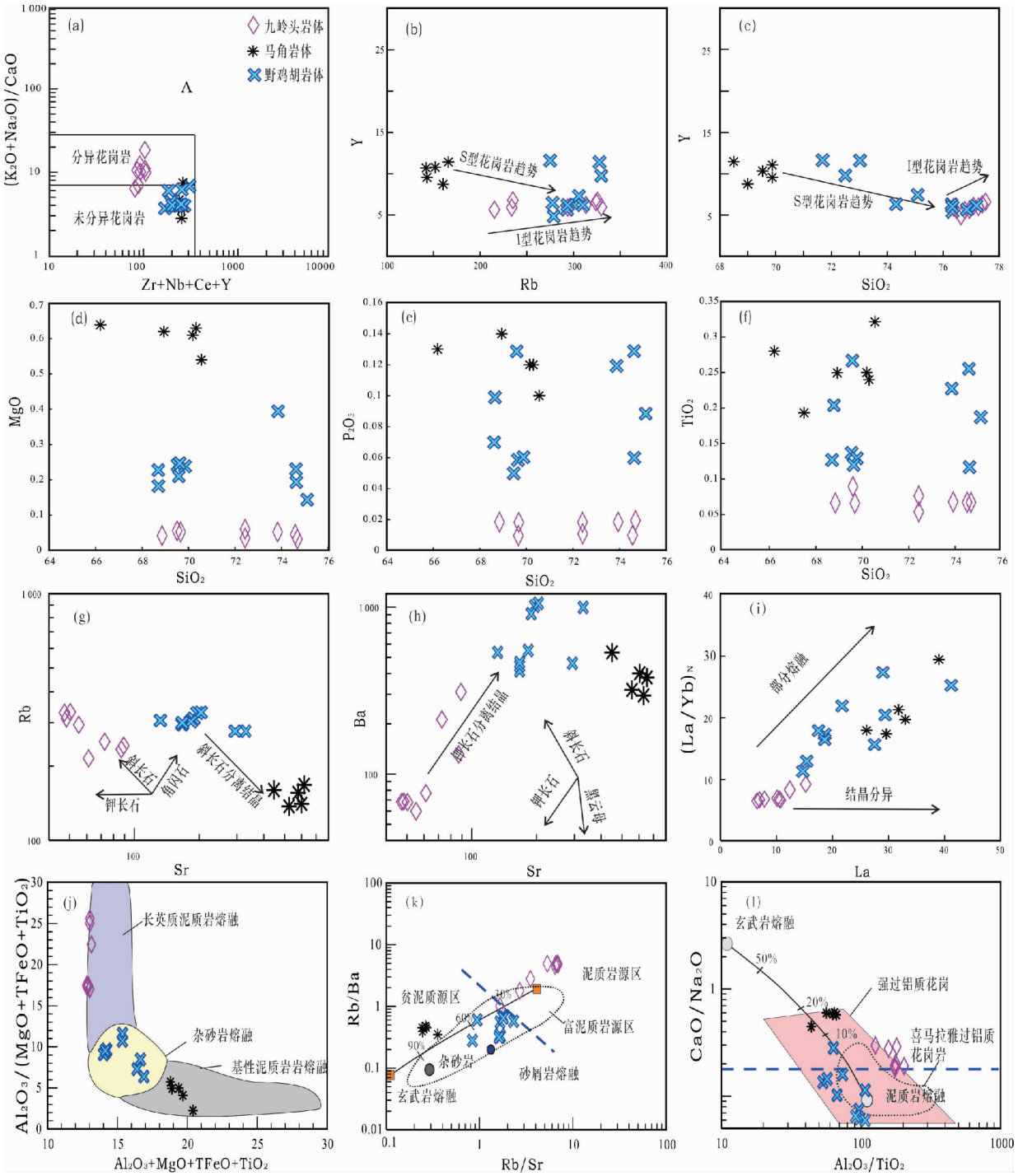


(a)骊山花岗岩年龄-$\varepsilon_{Hf}(t)$图解 (b)年龄-$^{176}Hf/^{177}Hf$ 图解

注:燕山期花岗岩、熊耳群火山岩、太华群岩体数据来源于文献[8,58 - 70]。

图 7 骊山花岗岩锆石 Hf 同位素图解

Fig. 7 Zircon Hf isotopic diagrams of the Lishan granite



注:(a)($K_2O + Na_2O$)/CaO-Zr + Nb + Ce + Y 图解;(b)Rb-Y 图解;(c)SiO_2 与 Y 图解;(d)SiO_2-MgO 图解;(e)SiO_2-P_2O_5 图解;(f)SiO_2-TiO_2 图解;(g)Sr-Rb 图解;(h)Sr-Ba 图解;(i)La 与$(La/Yb)_N$ 图解;(j)(Al_2O_3 + MgO + TFeO + TiO_2)与 Al_2O_3/(MgO + TFeO + TiO_2)图解;(k)Rb/Sr-Rb/Ba 图解;(i)Al_2O_3/TiO_2-CaO/Na_2O 图解。

图 8　骊山岩体源区物质成分识别图解

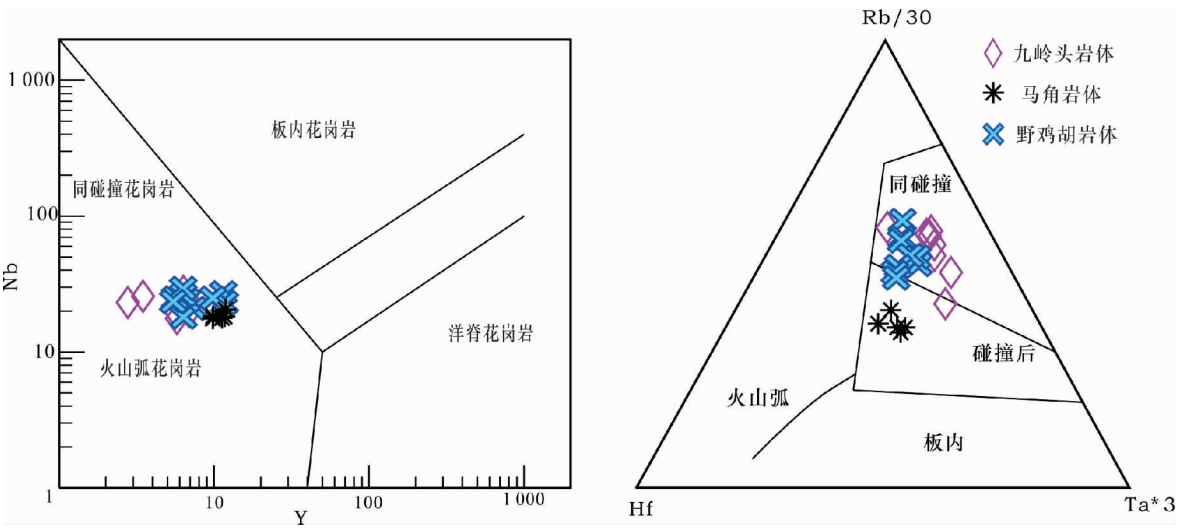
Fig. 8　Source composition discrimination diagram of the Lishan Pluton

Sr-Rb 图解和 Sr-Ba 图解反映出骊山地区 3 个花岗岩体经历不同程度的斜长石、钾长石分离结晶〔见图 8(g)、(h)〕,揭示早期斜长石→晚期钾长石的分离结晶序列;在 La-$(La/Yb)_N$ 图解中,指示九岭头岩体经历了明显的分离结晶过程,而马角岩体和野鸡胡岩体特征则受部分熔融过程控制〔见图 8(f)〕。明显富集的 Lu-Hf 同位素特征($\varepsilon_{Hf}(t)$ = −27.39 ~ −14.66),指示该岩体的

组分里不含幔源物质，是古老地壳物质重熔的产物。前人推断，在岩体形成过程中可能是由幔源玄武质底侵提供热源[13]，触发太华群 TTG 片麻岩和变沉积岩的重熔，而太华群中不均一的地壳物质重熔形成不同类型的花岗岩。在(Al_2O_3 + MgO + ^{T}FeO + TiO_2)-Al_2O_3/(MgO + FeO^{T} + TiO_2)、Rb/Sr-Rb/Ba 和 Al_2O_3/TiO_2-CaO/Na_2O 图解中，显示出花岗岩源区包括变泥质岩、变杂砂岩和变基性岩源区〔见图 8(j) ~ (l)〕[54,56,71-73]。

5.3 骊山岩体构造 - 岩浆成因背景及动力学指示

在地球化学 Y-Nb 图解和 Hf-Ta*3-Rb/30 图解中(见图 9)[72]，九岭头、马角和野鸡胡岩体均落入同碰撞区域，指示为碰撞环境，与秦岭晚中生代陆内俯冲动力学背景一致[28]；约 150 Ma，华北地块南缘处于秦岭陆内造山过程中的同碰撞应力场(双向俯冲[74])，导致地壳增厚与岩石圈拆沉，进而引起地壳减薄(见图 10)。岩石圈拆沉诱发软流圈上涌，底侵基性岩浆加热下地壳，驱动太华群片麻岩和变沉积岩发生分离结晶和部分熔融，在该陆内造山峰期(163 ~ 136 Ma)[52]，形成骊山花岗岩体。骊山岩体(约 150 Ma)与东部年轻岩体(约 120 Ma)的时空分带，反映早期的岩浆活动主要受陆内造山作用的影响，而晚期的主导因素则为古太平洋俯冲板块后撤引发的构造体制转换。早期(>140 Ma)为挤压主导，岩浆活动集中于西部，受陆内俯冲作用控制[75]，晚期(<140 Ma)以板块后撤引发的拉伸为主导，岩浆东迁，伴随幔源物质注入[76]。



(a) Y-Nb 图解　　(b) Hf-Ta*3-Rb/30 图解(据文献[77]修改)

图 9　骊山岩体构造环境判别图解

Fig. 9　Tectonic discrimination diagram for the Lishan pluton

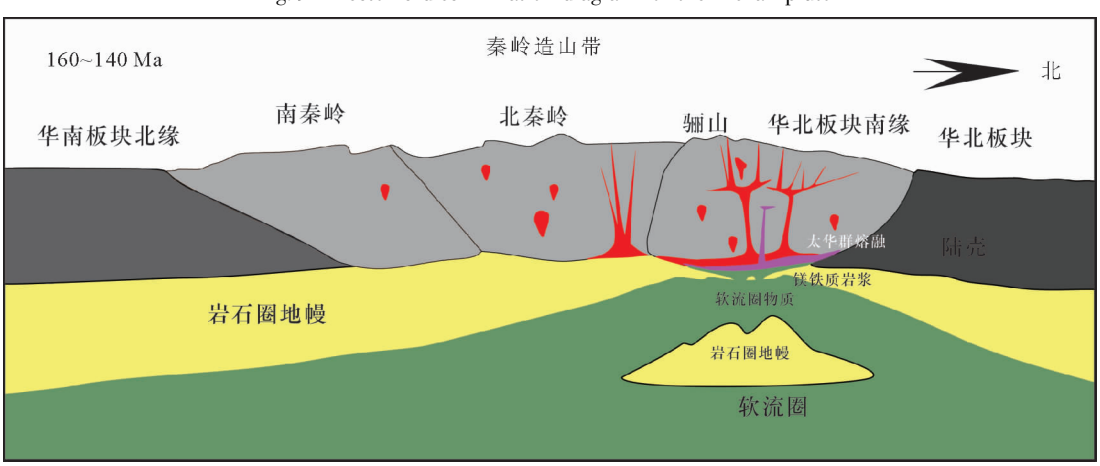


图 10　华北地块南缘晚中生代构造演化模式图(据文献[78]修改)

Fig. 10　Late Mesozoic tectonic evolutionary model diagram of the southern margin of the North China Block

6　结论

1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[(151 ±2) ~ (148 ±1) Ma]与独居石 U-Pb 年龄[(152 ±1) Ma]共同限定骊山花岗岩侵位于晚侏罗世(152 ~ 148 Ma),属燕山早期俯冲碰撞背景下岩浆活动的产物。

2)骊山地区 3 个花岗岩体显示高硅(SiO_2 质量分数为 68.49% ~77.51%)、富碱($Na_2O + K_2O$ 质量分数为 6.32% ~8.78%)、富铝(Al_2O_3 质量分数为 12.21% ~16.14%),$Mg^{\#}$ = 8 ~37,具有不均一的弱负异常 Eu 异常(Eu/Eu* = 0.57 ~ 1.16),均属过铝质高钾钙碱性系列岩石。微量元素结果显示富集 Rb、Th、U、Nb、Ta、K、Pb 等元素,亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素。锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = -27.4 ~ -14.7,二阶段模式年龄(T_{DM2} = 2.93 ~ 2.13 Ga)与太华群片麻岩和变沉积岩的年龄一致,确证其源区为太华群片麻岩和变沉积岩,无显著幔源物质参与。

3)骊山岩体形成于秦岭造山带陆内造山调整的动力学背景,俯冲碰撞导致地壳加厚,从而引起高密度的岩石地幔下沉,深部岩石圈拆沉诱发软流圈上涌,底侵基性岩浆热驱动太华群片麻岩和变沉积岩发生物质再造。岩浆沿造山断裂带上升侵位,标志着华北地块南缘晚中生代陆内造山峰期(约 150 Ma)。

参考文献

[1] Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China Blocks: Controversy and reconciliation[J]. Geology, 1999, 27(2): 123-126.

[2] Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling Orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. Lithos, 2011, 122(1/2):39-56.

[3] 王德滋,周金城. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 2-10.
Wang D Z, Zhou J C. Review and prospect of granite research in China[J]. Acta Petrology, 1999, 15(2): 2-10.

[4] 王德滋,舒良树. 花岗岩构造岩浆组合[J]. 高校地质学报, 2007,13(3): 362-370.
Wang D Z, Shu L S. Granite tectonic-magmatic assemblages[J]. Journal of Geological Education, 2007, 13(3): 362-370.

[5] 林伟,李金雁. 欧亚大陆东部白垩纪两期伸展穹隆构造及其动力学机制探讨[J]. 岩石学报, 2021,37(8): 2303-2323.
Lin W, Li J Y. Cretaceous two stage extensional tectonic in eastern Eurasia continent and its geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(8): 2303-2323.

[6] 王涛,王晓霞,郑亚东,等. 花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议[J]. 地质科学, 2007,42(1): 91-113.
Wang T, Wang X X, Zheng Y D, et al. Research on granite structure and tectonic dynamics of granite[J]. Geological Science, 2007, 42(1): 91-113.

[7] 徐夕生,贺振宇. 花岗岩研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012,31(3): 205-209.
Xu X S, He Z Y. Progress in granite research[J]. Bulletin of Mineral Geochemistry, 2012,31(3): 205-209.

[8] 郭波,朱赖民,李犇,等. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. 岩石学报, 2009,25(2): 265-281.
Guo B, Zhu L M, Li B, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009,25(2): 265-281.

[9] 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 X X, Wang T, Qi Q J, 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.

[10] Li L, Sun W Z, Meng X F, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the granitoids of Xiaoshan Mountain Area on the southern margin of North China Block and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29: 2635-2652.

[11] Li N, Chen Y J, Santosh M, et al. Late Mesozoic granitoids in the Qinling Orogen, Central China, and tectonic significance[J]. Earth Science Reviews, 2018, 182: 141-173.

[12] 王晓霞,王涛,张成立. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. 中国科学(地球科学), 2015,45(8): 1109-1125.

Wang X X, Wang T, Zhang C L. Granitic magmatism and orogenic belt evolution in Qinling Orogenic Belt [J]. Science in China(Geoscience), 2015,45 (8): 1109-1125.

[13] 高昕宇,赵太平. 华北克拉通南缘晚中生代花岗质岩浆作用与构造演化[J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(11): 1309-1328.
Gao X Y, Zhao T P. Late Mesozoic granitic magmatism and tectonic evolution on the southern margin of the North China Craton[J]. Science in China(Geoscience), 2017,47(11): 1309-1328.

[14] 常云真,黄芮,贾慧敏,等. 河南省崤山地区崤山岩群的建立及其与邻区对比[J]. 世界地质, 2018,37(4): 1077-1084.
Chang Y Z, Huang R, Jia H M, et al. Establishment of Xiaoshan Group and its correlation with adjacent areas in Xiaoshan Area, Henan [J]. World Geology. 2018,37 (4): 1077-1084.

[15] Qi N, Chen Y J, Wang P, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Houhe granite in the Xiaoshan Area, southern North China Craton and their implication for regional metallogenic potential [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(5): 206-221.

[16] 谢亘,喻光明,路英川,等. 华北克拉通南缘小秦岭地区花岗质片麻岩年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2021,35(6): 1702-1712.
Xie G, Yu G M, Lu Y C, et al. Chronology and geochemical characteristics of granitic gneiss in the Xiaoqinling district on the southern margin of the North China Craton and its significance[J]. Modern Geology, 2021,35(6): 1702-1712.

[17] 黄艳娜,黎敦朋,肖爱芳,等. 北秦岭造山带翠华山黑云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地球化学特征[J]. 地质找矿论丛, 2023,8(2): 197-208.
Huang Y N, Li D P, Xiao A F, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Cuihuashan biotite granite in the North Qinling Orogenic Belt[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2023, 8(2): 197-208.

[18] 张尔道. 临潼骊山新地质构造运动[J]. 地质知识, 1957(2): 21-22.
Zhang E D. Neotectonic movements in Lishan, Lintong [J]. Geological Knowledge, 1957(2): 21-22.

[19] 潘侃. 临潼骊山的地质构造[J]. 西安地质学院学报, 1983(1): 41-49.

[20] 张安良,雷姚琪. 长安—临潼断裂的活动与西安地区地震危险性探讨[J]. 内陆地震, 1991(3): 216-225.
Zhang A L, Lei Y Q. Activity of the Chang'an-Lintong Fault and discussion on seismic risk in the Xi'an Region [J]. Inland Earthquake, 1991 (3): 216-225.

[21] 张合臻. 陕西临潼骊山地区的地质构造演化[J]. 陕西地质, 1992(2): 29-38.
Zhang H Z. The geological tectonic evolution of the Lishan Area in Lintong, Shaanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1992(2): 29-38.

[22] 肖秋生. 骊山山前断裂的展布与活动性研究[D]. 西安:防灾科技学院, 2017.

[23] 徐良鑫,卞菊梅,呼楠,等. 骊山山前断裂华清池以西段晚更新世以来的活动性[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 561-575.
Xu L X, Bian J M, Hu N, et al. Activity of the western segment of the Lishan piedmont fault near Huaqingchi since the Late Pleistocene[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 561-575.

[24] 张国伟,孟庆仁,刘少峰,等. 华北地块南部巨型陆内俯冲带与秦岭造山带岩石圈现今三维结构[J]. 高校地质学报, 1997,3(2): 129-143.
Zhang G W, Meng Q R, Liu S F, et al. The present three-dimensional structure of the lithosphere in the Southern North China Block and the Qinling Orogenic Belt[J]. Journal of Geology, 1997,3(2): 129-143.

[25] Dong Y P,Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Gondwana Research, 2016, 29(1): 1-40.

[26] Dong Y P, Zhang X N, Liu X M, et al. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 104: 84-98.

[27] 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 C L, Wang T, Wang X X. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic Belt[J]. Journal of Geology of Higher Education, 2008, 14(3): 304-316.

[28] 张国伟,董云鹏,姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. 陕西地质, 1997,2(15):1-14.
Zhang G W, Dong Y P, Yao A P. Basic composition and structure of the Qinling Orogenic Belt and its tectonic evolution [J]. Geology of Shaanxi, 1997, 2 (15): 1-14.

[29] Diwu C R, Sun Y, Yang Z, et al. Early Paleoproterozoic (2.45 ~ 2.20 Ga) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for

the crustal evolution of the southern North China Craton[J]. Precambrian Research, 2014, 255(2): 627-640.

[30] 第五春荣,刘祥,孙勇. 华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化[J]. 岩石学报,2018,34(4): 999-1018.
Diwu C R, Liu X, Sun Y. The composition and evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(4): 999-1018.

[31] Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoarchean-Early Neoarchean[J]. Chemical Geology, 2009, 261: 140-154.

[32] 卢俊生,王国栋,王浩,等. 河南鲁山太华变质杂岩前寒武纪变质作用[J]. 岩石学报, 2014,30(3): 3062-3074.
Lu J S, Wang G D, Wang H, et al. Metamorphic evolution of the Lushan terrane in the Precambrian Taihua complex, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinic, 2014,30(10): 3062-3074.

[33] Wan Y S, Wilde S A, Liu D Y, et al. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan Area, Henan Province[J]. Gondwana Research, 2006, 9(1/2): 189-197.

[34] Sun Q Y, Zhou Y Y, Wang W, et al. Formation and evolution of the Paleoproterozoic meta-mafic and associated supracrustal rocks from the Lushan-Taihua Complex, southern North China Craton: Insights from zircon U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry[J]. Precambrian Research, 2017, 303: 428-444.

[35] Yang Y Z, Chen F K, Siebei W, et al. Age and composition of Cu-Au related rocks from the lower Yangtze River belt: Constraints on paleo-Pacific slab roll-back beneath eastern China[J]. Lithos, 2014, 202-203: 331-346.

[36] Jia X L, Zhai M G, Xiao W J, et al. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton[J]. Precambrian Research, 2020,337: 105451.

[37] Wang X, Huang X L, Yang F. Geochronology and geochemistry of the Xiaoqinling-Taihua Complex in the southern Trans-North China Orogen: Implications for magmatism during the early Paleoproterozoic global tectono-magmatic shutdown[J]. Lithos, 2021, 402-403: 106248.

[38] Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center special publication, 2003, 39: 91-445.

[39] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.

[40] 柳小明,高山,第五春荣,等. 单颗粒锆石的 20 μm 小斑束原位微区 LA-ICP-MSU-Pb 年龄和微量元素的同时测定[J]. 科学通报, 2007,52(2): 228-235.
Liu X M, Gao S, Diwu C R, et al. Simultaneous determination of trace elements and LA-ICP-MSU-Pb ages in single zircon by 20 μm small spot bundle in situ[J]. Science Bulletin, 2007, 52(2): 228-235.

[41] Bao Z A, Chen L, Zong C L, et al. Development of pressed sulfide powder tablets for in situ sulfur and lead isotope measurement using LA-MC-ICP-MS[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2017, 421: 255-262.

[42] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. Chemical Geology, 2008, 247(1/2): 100-118.

[43] 汪双双,韩延兵,李艳广,等. 利用 LA-ICP-MS 在 16 μm 和 10 μm 激光束斑条件下测定独居石 U-Th-Pb 年龄[J]. 岩矿测试, 2016, 35(4): 349-357.
Wang S S, Han Y B, Li Y G, et al. Determination of U-Th-Pb ages of monazite by LA-ICP-MS under 16 μm and 10 μm laser spot conditions[J]. Rock and Mineral Testing, 2016,35(4): 349-357.

[44] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.

[45] Maitre R L. The chemical variability of some common igneous rocks[J]. Journal of Petrology, 1976,17(4): 589-637.

[46] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 1989,101(1): 635-643.

[47] Peccerillo A, Taylor R S. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.

[48] Rudnick L R, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. Treatise Geochem, 2003, 3: 1-64.

[49] Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle

composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (M). Magmatism in the Ocean Basins. London: Special Publications, 1989: 313-345.

[50] 丁丽雪,马昌前,李建威,等. 华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体:LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 2010, 39(5): 401-413.
Ding L X, Ma C Q, Li J W, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. Geochemistry, 2010, 39 (5): 401-413.

[51] 张兴康,叶会寿,李正远,等. 小秦岭华山复式岩基大夫峪岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. 矿床地质, 2015, 34(2): 235-260.
Zhang X K, Ye H S, Li Z Y, et al. Zircon U-Pb age, Hf isotope and geochemical characteristics of Dafuyu pluton in Huashan complex batholith, Xiaoqinling[J]. Geology of Deposits, 2015,34(2): 235-260.

[52] 毛景文,谢桂青,张作衡,等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005,21(1): 169-188.

[53] 洪大卫. 花岗岩研究的最新进展及发展趋势[J]. 地学前缘,1994,1(1/2): 79-86.
Hong D W. Recent advances and development trends in granite research [J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(1/2): 79-86.

[54] 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007,23(2): 185-220.
Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. Lu-Hf isotope system and its petrological application[J]. Acta Petrology, 2007, 23(2): 185-220.

[55] 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 2007, 23 (11): 2683-2698.
Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3)[J]. Acta Lithologica, 2007, 23 (11): 2683-2698.

[56] Chappell B W. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999,46(3): 535-551.

[57] Stevens G, Villaros A, Moyen J F. Selective peritectic garnet entrainment as the origin of geochemical diversity in S-type granites[J]. Geology, 2007,35: 9-12.

[58] 时毓,于津海,徐夕生,等. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 3095-3108.
Shi Y, Yu J H, Xu X S, et al. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons of Taihua Group in Xiaoqinling Area, Shaanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 3095-3108.

[59] 向君峰,赵海杰,李永峰,等. 华北地台南缘张士英岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 871-887.
Xiang J F, Zhao H J, Li Y F, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Zhangshiying intrusive complex in the southern margin of the North China Platform and its geological significance [J]. Acta Petrology, 2010,26(3): 871-887.

[60] 高昕宇,赵太平,高剑峰,等. 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学特征[J]. 地球化学, 2012, 41(4): 303-325.
Gao X Y, Zhao T P, Gao J F,et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, Hf isotopes and element geochemistry of Early Cretaceous adakite granites in Xiaoqinling Area, southern margin of North China Block[J]. Geochemistry,2012, 41 (4): 303-325.

[61] 齐秋菊,王晓霞,柯昌辉,等. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义:锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 279-301.
Qi Q J, Wang X X, Ke C H, et al. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of North China Block and their implications: New evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (1): 279-301.

[62] 肖娥,胡建,张遵忠,等. 东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2012, 28 (12): 4031-4046.
Xiao E, Hu J, Zhang Z Z, et al. Petrogeochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic compositions of the Haoping and Jinshanmiao granites from the Huashan complex batholith in eastern Qinling Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 4031-4046.

[63] 时毓,于津海,杨启军,等. 小秦岭地区太华群锆石 U-Pb 年龄及华北克拉通南缘地壳演化[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 218-229.
Shi Y, Yu J H, Yang Q J, et al. Zircon U-Pb ages of

the Taihua Group in the Xiaoqinling Area and crustal evolution of the southern margin of the North China Craton[J]. Journal of Geoscience and Environment, 2014,36(1): 218-229.

[64] 肖建辉,武广,孟宪锋,等. 豫西崤山东部中河岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Lu-Hf 同位素特征[J]. 矿床地质, 2018, 37(2): 290-310.
Xiao J H, Wu G, Meng X F, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and Lu-Hf isotope characteristics of zircon from the Zhonghe instrusion in the eastern Xiaoshan, Henan[J]. Geology of Deposits, 2018,37(2): 290-310.

[65] 张昕,吴才来,陈红杰,等. 华北板块南缘伏牛山花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(5): 1517-1538.
Zhang X, Wu C L, Chen H J, et al. Ziron LA-MC-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes analysis of granites from Funiu Mountain pluton in southern margin of the North China plate[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(5): 1517-1538.

[66] Jia X L, Zhai M G, Xiao W J, et al. Late Neoarchean to early Paleoproterozoic tectonic evolution of the southern North China Craton: Evidence from geochemistry, zircon geochronology and Hf isotopes of felsic gneisses from the Taihua complex[J]. Precambrian Research, 2019, 326: 222-239.

[67] Wang X, Huang X L, Yang F. Revisiting the Lushan-Taihua Complex: New perspectives on the Late Mesoarchean-Early Neoarchean crustal evolution of the southern North China Craton[J]. Precambrian Research, 2019, 325: 132-149.

[68] Dong M M, Wang C M, Santosh M, et al. Geochronology and petrogenesis of the Neoarchean-Paleoproterozoic Taihua Complex, NE China: Implications for the evolution of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2020, 346: 105792.

[69] Li Z X, Zhang S B, Zheng Y F, et al. Crustal thickening and continental formation in the Neoarchean: Geochemical records by granitoids from the Taihua Complex in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2021, 367: 106446.

[70] 李山坡,李肖龙,潘小娜,等. 豫西外方山太山庙花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 矿产勘查, 2022,13(1): 1055-1066.
Li S P, Li X L, Pan X N, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and geological significance of the Taishanmiao granite in the Waifang Mountain, Western Henan[J]. Mineral Exploration, 2022,13(1): 1055-1066.

[71] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.

[72] Collins W, Beams S, White A, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.

[73] Liang L, Li W, Dong Y P, et al. Late Palaeozoic tectonic transformation of the North Qinling Orogenic Belt: Insight from the geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes of Carboniferous magmatic rocks[J]. Geological Journal, 2024, 59(4): 1280-1297.

[74] Patino D A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. Geological Society, 1999, 168: 55-75.

[75] 张国伟. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[76] 林伟,王军,刘飞,等. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1791-1810.
Lin W, Wang J, Liu F, et al. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013,29(5): 1791-1810.

[77] Pearce J A, Harris N, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology,1984, 25(4): 956-983.

[78] Yang F, Xue F, Santosh M, et al. Late Mesozoic magmatism in the East Qinling Orogen, China and its tectonic implications[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(5): 1803-1821.

(编　辑　雷雁林)