第43卷 第2期 岩 石 矿 物 学 杂 志 Vol. 43, No. 2: 304~329
2024年3月 ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA Mar., 2024

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2024.0206

西秦岭商丹缝合带寒武纪斜长花岗岩的成因机制

——对原特提斯洋俯冲起始的启示

郭 祺[1,2],张建新[1],毛小红[1],武亚威[1,2]

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 大洋斜长花岗岩是指分布在蛇绿岩或现今洋壳中的少量长英质侵入体,可形成在洋中脊及俯冲带等多种构造环境,虽然其在洋壳和蛇绿岩中所在体积很小,但对探究大洋岩石圈演化、俯冲起始及洋-陆转化机制具有重要意义。本文对北秦岭造山带西段商丹缝合带内新识别出的斜长花岗岩开展了岩石学、地球化学和锆石U-Pb年代学的综合研究。全岩地球化学结果指示花岗闪长岩具有高的SiO_2、Al_2O_3含量以及较低的K_2O、TiO_2含量,属于低钾亚碱性、准铝质到弱过铝质的岩石。微量元素相对富Sr、贫Nb、Ta和Ti,具有平坦的稀土元素配分模式,是弧前环境中由俯冲板片在浅部层次部分熔融成因的大洋斜长花岗岩。3个斜长花岗岩样品分别记录了526±4 Ma、515±4 Ma和517±6 Ma的锆石U-Pb年龄,结合前人同时代的玻安岩、高镁安山岩的报道,西秦岭商丹缝合带保留有与伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)俯冲带相似的弧前岩石组合,这些弧前的玻安岩、高镁安山岩和斜长花岗岩表明商丹洋在早寒武世发生了洋壳的初始俯冲。结合区域地质资料,认为中央造山带可能在寒武纪发生了与IBM俯冲带规模相当的俯冲起始。

关键词: 西秦岭; 商丹缝合带; 斜长花岗岩; 部分熔融; 俯冲起始

中图分类号: P588.12+1; P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2024)02-0304-26

Petrogenesis of Cambrian plagiogranites in the Shangdan suture zone of the West Qinling: Insights to subduction initiation of the Proto-Tethys

GUO Qi[1,2], ZHANG Jian-xin[1], MAO Xiao-hong[1] and WU Ya-wei[1,2]

(1. Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Oceanic plagioganites refers to felsic intrusions which can be generated in different tectonic setting including midocean ridge and subduction zone. Plagiogranite is volumetrically minor component of oceanic crust and ophiolites, but it is crucial to probe the evolution of oceanic lithosphere, subduction initiation and mechanism of oceanic-continental transformation. In this paper, we carried out an integrated study of petrology, geochemistry and zircon U-Pb chronology for the newly identified plagiogranite in the Tianshui area of the western part of the Shangdan suture zone. The whole rock geochemistry indicate that the plagiogranite have high content of SiO_2 and Al_2O_3 and low content of K_2O and TiO_2, and show characteristics of low potassium subalkaline, metaluminous to weak peraluminous. In terms of trace element composition, they are relatively enriched in Sr and depleted in Nb, Ta

收稿日期: 2023-12-08; **接受日期:** 2024-01-29; **编辑:** 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072237, U2344214); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221649); 中国地质科学院基本科研业务费项目(JKYZD202310)

作者简介: 郭 祺(1992-), 男, 博士生, 构造地质学专业, E-mail:qiguo716@stu.pku.edu.cn; 通讯作者: 张建新(1966-), 男, 研究员, 主要从事造山带的变质变形研究, E-mail: zjx66@yeah.net。

and Ti, and show a characteristic of REE trends is relatively flat. Generally, it has geochemical affinities to oceanic plagiogranite which formed via partial melting of subducted oceanic crust slabs in shallow level and developed in the forearc area. Zircon U-Pb datings of plagiogranite samples yield age of 526±4 Ma, 515±4 Ma and 517±6 Ma, respectively. Combined with previous studies data, we suggest that the Shangdan suture zone of the West Qinling records similar forearc magmatic rock associations as that of the Izu-Bonin-Mariana (IBM) subduction zone. The boninites, High-Mg andesites and plagiogranites generated almost simultaneously in forearc setting, reflecting the initial subduction of the Shangdan ocean at Early Cambrian. Combining the present study with regional geological data reveals that the northern Central China Orogenic system experienced a simultaneous subduction initiation of Proto-Tethys at Cambrian, similar to the scale in the IBM subduction zone.

Key words: West Qinling; Shangdan suture zone; plagiogranite; partial melting; subduction initiation

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42072237, U2344214); China Geological Survey Project (DD20221649); Fundamental Research Funds from the Chinese Academy of Geological Sciences (JKYZD202310)

俯冲带的形成与演化不仅是板块构造研究中的关键科学问题,更是地球系统中物质循环的重要方式,这一过程会对地球深部的物理化学性质产生巨大的影响(Hacker *et al.*, 2003a, 2003b; Stern, 2004; Stern *et al.*, 2012; Stern and Gerya, 2018)。因此,了解新的俯冲带如何形成,对认识地球表层系统和深部过程以及恢复地球板块构造演化史都具有重要的意义(Stern and Gerya, 2018)。近年来关于板块俯冲起始的研究认为俯冲起始的方式可以分为自发和诱发两种形式,前者指相邻板块之间存在巨大的密度差,密度较大的板块沿着先前存在的软弱带下插到密度较小的板块之下自发产生俯冲作用,后者的形成机制是指在外力作用下产生的俯冲起始(Stern, 2004; Stern and Gerya, 2018; Zhu *et al.*, 2023)。而俯冲起始发生的时限一般指当大洋岩石圈首次下潜至上地幔(Gurnis *et al.*, 2004),因此早期弧前的伸展和岩石学记录(例如伊豆-小笠原-马里亚纳系统中的弧前玄武岩、玻安岩、高镁安山岩)成为判断俯冲起始的重要证据(Stern *et al.*, 2012; Haase *et al.*, 2016; Zhou and Wada, 2021; Zhang *et al.*, 2022)。此外,随着有关大洋斜长花岗岩(包括形成于洋壳中的石英闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩)研究的进展,除玄武质岩浆的结晶分异外,洋壳在含水条件下的部分熔融也可形成此类岩石,这为探究洋壳的初始俯冲提供了新的契机(Rollinson, 2009)。

秦岭造山带横亘于我国华北和扬子板块之间,不仅地处我国中央造山带东西衔接的关键构造位置,同时也是亚洲大陆重要的造山带之一(张国伟等, 1995; Dong and Santosh, 2016; Liu *et al.*, 2016)。自新元古代以来秦岭造山带经历了多阶段的构造热事件并伴随有多期花岗质岩浆作用,而古生代花岗岩在北秦岭造山带中占据了首要地位,是恢复北秦岭造山带古生代早期构造演化的主要研究对象。众多前人研究结果显示,秦岭造山带中的古生代花岗岩大致可以分为 500、460~420 和 420~400 Ma 这 3 期(Wang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Liu *et al.*, 2016)。第 1 期主要分布在北秦岭造山带的东段,岩石类型以 I 型花岗岩为主,S 型花岗岩次之。I 型花岗岩的地球化学特征指示其形成于和岛弧相关的构造环境中(Xue *et al.*, 1996; 陆松年等, 2003),而北秦岭造山带内与超高压变质作用及几乎同期的 S 型花岗岩的成因目前还存在争议(Wang *et al.*, 2009),主要观点是形成于大陆碰撞(Zhang *et al.*, 2013)和弧陆碰撞过程中(Wu and Zheng, 2013)。第 2 期主要以 I 型花岗岩为主,遍布整个北秦岭造山带中,形成时间与秦岭造山带内广泛发育的麻粒岩相变质作用相近,岩石成因为下地壳的部分熔融(陈隽璐等, 2007; Wang *et al.*, 2009, 2015)。第 3 期主要发育于北秦岭造山带中段,以 I 型花岗岩为主,形成于碰撞造山后相对弱的挤压或弱伸展环境,时间上与区域角闪岩相变质作用相近(Wang *et al.*, 2009, 2015)。尽管已有众多学者围绕该造山带开展了大量岩石学方面的研究,但古生代早期北秦岭造山带的构造演化和岩石成因目前仍然缺乏认识。有学者认为在早寒武世(约 524 Ma)商丹洋开始了初始的俯冲,由洋壳的俯冲在北秦岭造山带中形成

了一系列弧前环境中的岩浆岩(裴先治等, 2004; 李源等, 2012; Li *et al.*, 2015)。但还有部分学者认为在该时期(约 521 Ma)秦岭微陆块在早期洋壳的拖曳下发生了大陆板块的俯冲,并在之后的发展过程中形成了北秦岭造山带中的超高压变质岩(Dong *et al.*, 2021)。

近年来,我们通过专题地质调查,在北秦岭造山带西段天水地区识别出少量斜长花岗岩,分布在西秦岭商丹缝合带内,初步研究显示其具有大洋斜长花岗岩性质,时代为寒武纪。本文以这些新发现的斜长花岗岩为研究对象,开展了相应的年代学和地球化学研究,结合前人研究成果讨论了该岩石的成因及构造意义,为北秦岭造山带早古生代早期的演化提供了新的证据。

1 地质背景及样品野外关系

秦岭造山带东接苏鲁-大别造山带,西接祁连造山带,是华北板块与扬子板块及两者之间离散的微陆块经多期俯冲、碰撞而形成的复合型造山带。一般认为秦岭造山带夹持于北部的灵宝-栾山-无恙断裂和南部的勉略-巴山-祥光断裂之间,而造山带内早古生代的商丹缝合带将其划分为南、北秦岭造山带,同时以宝成铁路为界又将其划分为东、西秦岭造山带(张国伟等, 1995; Meng and Zhang, 1999; 陆松年等, 2006; Dong *et al.*, 2011b; Dong and Santosh, 2016)(图 1a、1b)。

北秦岭造山带是典型的早古生代造山带,夹于洛南-栾川断裂带和商丹缝合带之间(图 1b)。通过北秦岭造山带东段的研究,可将北秦岭造山带细分为 4 个岩石构造单元,自北向南分别为宽坪群(宽坪杂岩)、二郎坪群(二郎坪杂岩)、秦岭群(秦岭杂岩)和丹凤群(丹凤蛇绿混杂岩)(Dong and Santosh 2016; Liu *et al.*, 2016)。研究区位于北秦岭造山带西段的天水地区,在前人的研究基础上,该区域也被划分为 3 个岩石构造单元,自北向南分别为清水-张家川弧后杂岩带、秦岭弧变质-岩浆杂岩带和李子园俯冲杂岩带,分别对应于造山带东段的宽坪杂岩与二郎坪杂岩的集合体、秦岭杂岩和丹凤蛇绿混杂岩(Mao *et al.*, 2017; 毛小红等, 2018)(图 1c)。

清水-张家川弧后杂岩带南部以新阳-元龙韧性剪切带为界与秦岭弧变质-岩浆杂岩带相接,北部被第四纪沉积物所覆盖(图 1c),主要由葫芦河群、红土堡组、陈家河群以及前寒武纪结晶基底(陇山群)组成,在北部边缘还出露有古生代和三叠纪的中性及长英质侵入体。葫芦河群主体形成于奥陶纪至志留纪,主要由一套低级变质的碎屑地层组成(裴先治等, 2012)。形成于晚寒武世至早志留世的红土堡组主要由中基性火山熔岩、火山岩及少量硅酸盐岩组成,并普遍经历低绿片岩相变质作用(付长垒等, 2019)。陈家河群主要形成于奥陶纪,由安山质或英安质的火山岩、流纹岩、火山凝灰岩、砂岩、陆生碎屑岩组成,也普遍经历了低绿片岩相的变质(胡波, 2005; 何世平等, 2007)。陈家河群中火山岩的地球化学特征指示其形成于和弧相关的构造环境中,类似于东秦岭形成于弧后盆地中的二郎坪群(何世平等, 2007; 李王晔, 2008)。

秦岭弧变质-岩浆杂岩带出露在新阳-元龙韧性剪切带和李子园俯冲杂岩带之间,主要由深变质的秦岭杂岩、草滩沟群和深成侵入体组成(图 1c)。秦岭杂岩主要由原岩年龄为 950~850 Ma 之间的正片麻岩和副片麻岩组成,伴有强烈的混合岩化作用,并普遍经历了晚志留世的中低压麻粒岩相变质作用(陆松年等, 2005; 裴先治等, 2007; 毛小红等, 2018; 郭祺等, 2022; Guo *et al.*, 2023)。草滩沟群主要由火山碎屑岩和火山熔岩组成,前人研究结果显示草滩沟群中的火山岩形成于和俯冲相关的构造环境中(闫全人等, 2007)。深成侵入体主要为 438±3 Ma 的党川花岗岩体和 435±2 Ma 的百花基性岩浆杂岩,前者具 C 型埃达克岩地球化学特征,被认为形成于加厚下地壳的部分熔融,后者则具有与弧相关的地球化学特征(Zhang *et al.*, 2006; Pei *et al.*, 2007; 王婧等, 2008)。

李子园俯冲杂岩带夹于秦岭杂岩和泥盆纪的大草滩群之间,向西延伸至武山-关子镇一带,主要由一套中浅变质的沉积-火山岩系组成,普遍经历了绿片岩相至低角闪岩相变质作用(图 1c)。据前人研究结果将原先的李子园群细分为李子园群、流水沟变质中基性杂岩体和关子镇蛇绿岩 3 个岩石构造单元。李子园群以一套不同物源的变质碎屑岩夹碳酸盐岩为主,局部发育变质中基性火山岩,地球化学特征指示这些变火山岩形成于岛弧或者弧前构造环境中(裴先治等, 2004, 2006)。流水沟中基性杂岩体主要为变质的辉长岩和闪长岩,地球化学特征揭示其形成于岛弧构造环境。关子镇蛇绿岩以发育一套变基性火山岩为特征,并具 N-MORB 的地球化学特征,

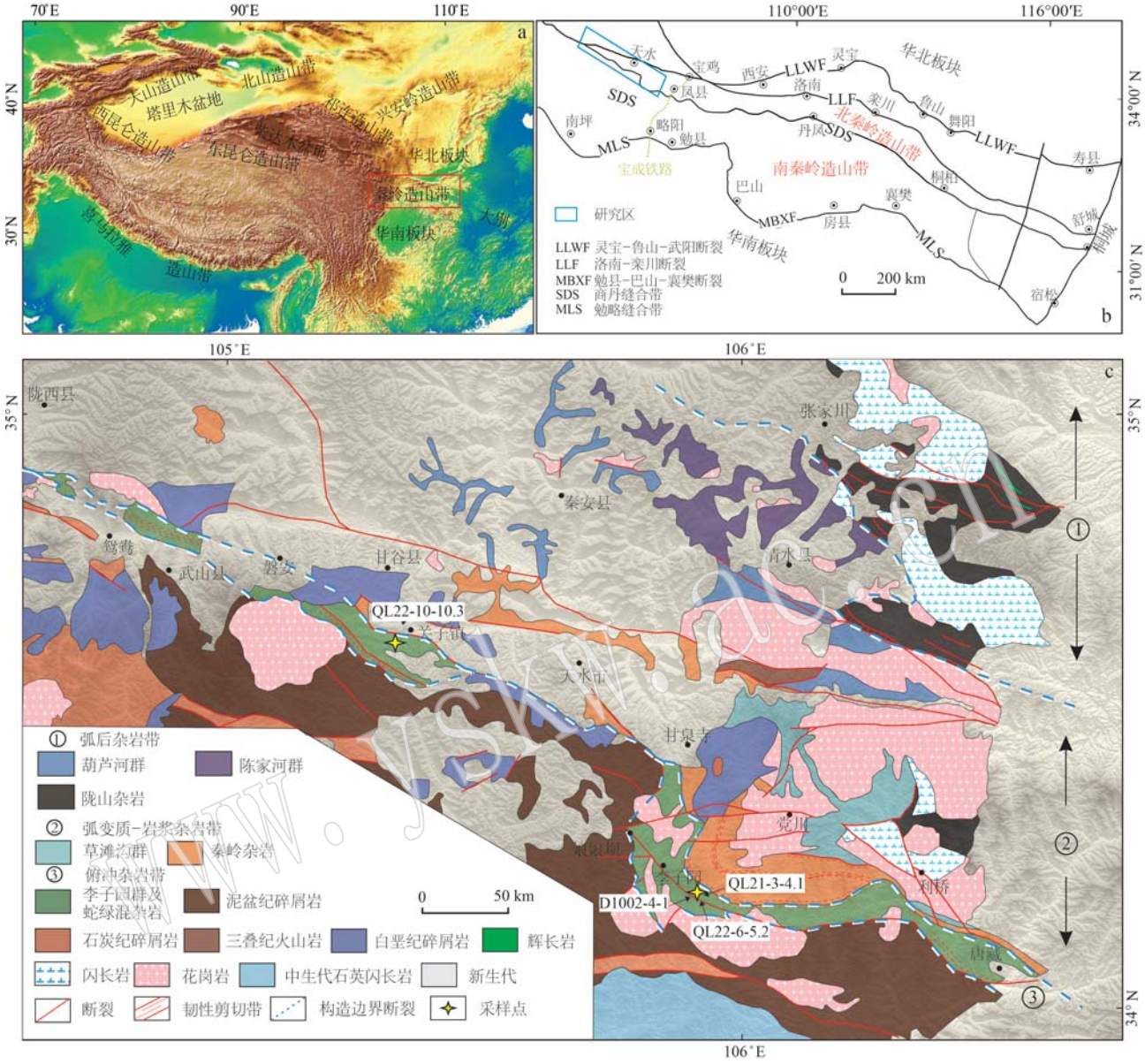

图 1　秦岭造山带大地构造位置(a，据 Guo *et al.*，2023 修改)、秦岭造山带构造简图(b，据 Dong *et al.*，2011a 修改)和北秦岭造山带西段天水地区地质简图(c，据陕西省地质局，1969❶修改)

Fig. 1　Simplified tectonic location of the Qinling Orogen(a, modified after Guo *et al.* 2023), simplified tectonic map of the Qinling orogen showing the location of the study area (b, modified after Dong *et al.*, 2011a) and simplified geological map of the Tianshui area in the western of the North Qingling Orogen (c, modified after Geological Bureau of Shaanxi Province, 1969❶)

代表了洋中脊的蛇绿岩，据此推断关子镇蛇绿岩是商丹缝合带的西向延伸(裴先治等，2004；李王晔等，2007；董云鹏等，2008；张志国等，2011；李源等，2012；Li *et al.*，2015)。本文对上述 3 个岩石构造单元不做详细区分，统称为李子园俯冲杂岩。

本文样品均采集于李子园俯冲杂岩带内，样品 QL21-3-4.1、QL22-6-5.2 和 D1002-4-1 采集于李子园镇地区(图 1c)，围岩均为变基性火山岩，整体经历了绿片岩相变质作用和韧性变形作用的改造；南侧主要为绿帘阳起片岩，北侧与秦岭弧变质-岩浆杂岩带以韧性剪切带相接触。QL22-10-10.3 采集于关子镇地区(图1c)，样品具有明显的面理构造，野外剖

❶ 陕西省地质局. 1969. 1∶20 万天水幅地质图.

面上与强变形的变辉长岩共生,但在露头上没有观察到两者之间的详细野外关系;南北两侧分别与变基性火山岩和深变质的秦岭杂岩以断层相接触。

2 分析方法

全岩主量、微量地球化学成分分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,主量元素分析使用 XRF 方法获得,测试相对标准偏差(RSD)<2%,微量元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS 分析获得。

锆石 U-Pb 定年工作在北京锆年领航科技有限公司使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP MS)完成。将从样品中分离出的锆石固定在环氧树脂靶上用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约 0.3 μm),以去除样品表面可能的污染。束斑直径 30 μm,剥蚀频率 6 Hz,能量密度 5 J/cm^2,数据处理采用 Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010),锆石 GJ-1 作为校正标样,91500 作为监测标样,每隔 10 个样品点分析 2 个 GJ-1、2 个 91500、2 个 Plesovice 和 1 个 NIST610。通常采集 25 s 的气体空白、45 s 的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正(Paton *et al.*, 2010)。以 NIST610 作为外标,^{91}Zr 作为内标计算微量元素含量。

锆石的 Hf 同位素分析在北京锆年领航科技有限公司使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP MS)完成,激光剥蚀系统为 Resolution SE 193nm(ASI, 澳大利亚),分析系统为 NEPTUNE plus(Thermofisher, 美国)。激光剥蚀物质以高纯氦气为载气,激光剥蚀斑束直径为 40 μm,能量密度为 7~8 J/cm^2,频率为 10 Hz,标样为 Plesovice,实验过程详见 Wu 等(2006)。

3 岩相学

样品采集于西秦岭天水地区的李子园镇和关子镇,两个地区样品均为细粒至中粒的斜长花岗岩,所有样品均具有相似的矿物组成。露头可见岩石普遍遭受后期韧性变形作用的改造,暗色矿物呈定向排列发育弱的片麻理构造(图2a、2c),显微镜下可见

图 2 天水地区斜长花岗岩野外露头照片(a、c)和显微照片(b、d)

Fig. 2 The outcrop photos (a and c) and photomicrographs (b and d) of the plagiogranites in Tianshui area

Kfs—钾长石; Amp—角闪石; Pl—斜长石; Qz—石英; Spn—榍石

Kfs—K-feldspar; Amp—amphibole; Pl—plagioclase; Qz—quartz; Spn—sphene

石英的亚颗粒以及矿物的细粒化，正交镜下可见石英的波状消光，单偏光下可见部分长石表面被蚀变（图 2b、2d），主要由石英（35%～40%）、斜长石（45%～50%）、角闪石（5%～10%）组成；含微量钾长石（≤5%），副矿物有锆石、榍石、磷灰石及不透明矿物（图 2）。矿物缩写依照 Whitney 和 Evans（2009）。

4　结果

4.1　锆石 U-Pb 定年

样品中所有锆石具有相似的形貌学特征，锆石粒径 80～200 μm，多为 150 μm 左右，晶形呈自形至半自形的粒状、短柱状或长柱状，多数颗粒长短轴比在 3∶1 左右。关子镇地区的样品中（QL22-10-10.3）部分锆石颗粒发育明显的核边结构，核部通常发育韵律环带，具有岩浆锆石的特征，边部多无结晶环带发育，可见明显的晶棱圆化现象和热液溶蚀的特征，指示其受晚期热液的改造（图 3b）。李子园地区的样品（QL21-3-4.1、QL22-6-5.2）中锆石可见明显的韵律环带，显示岩浆结晶成因，部分锆石也可见明显的核边结构，核部发育不规则的扇形环带，可能为结晶过程中锆石不同晶面的生长速率差异所导致（图 3d、3f）。

本文对 3 个样品开展了锆石 U-Pb 年代学研究，测试结果（表 1）显示部分测试点的年龄分布较为分散，为获得可靠的年龄，在分析过程中剔除不谐和（图中黑色圈）的数据点，并通过年龄分布直方图将与整体年龄偏差较大的数据（图中蓝色圈）剔除，选择落在谐和线上的数据点（图中红色圈）计算加权平均年龄（图 3）。

所有 U-Pb 测年的锆石具有相似的稀土元素配分特征，表现为轻稀土元素亏损、重稀土元素相对富集，Ce 正异常和明显的 Eu 负异常（表 2）。样品 QL22-10-10.3 中锆石的 Th/U 值为 0.29～0.92，谐和线上测试点的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 545～494 Ma 之间，剔除 3 个与整体年龄偏差较大的数据点，其余数据点$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 535～495 Ma 区间，加权平均年龄为 517±6 Ma（图 3a）。样品 QL22-6-5.2 中锆石的 Th/U 值为 0.28～0.93，落在谐和线上的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 535～500 Ma 之间，加权平均年龄为 515±4 Ma（图 3c）。样品 QL21-3-4.1 中锆石的 Th/U 值为 0.32～0.62，落在谐和线上的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 545～512 Ma 之间，加权平均年龄为 526±4 Ma（图 3e）。

4.2　锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素测试数据见表 3。所有样品均具有相似的亏损的 Hf 同位素成分，样品 QL21-3-4.1 的 $\varepsilon Hf(t)$ 值为分布在 9.72～14.56，加权平均为 12.80±0.39。QL22-6-5.2 的锆石 $\varepsilon Hf(t)$ 值为 9.94～14.58，加权平均为 12.11±0.42。QL22-10-10.3 的锆石 $\varepsilon Hf(t)$ 值为 9.06～13.95（1 个数据点为 7.32），加权平均为 12.05±0.62（图 4）。

4.3　全岩地球化学

主微量元素分析结果（表 4）显示文中所有的样品均具有相似的地球化学特征，具有较高的 SiO_2（65.78%～69.72%）、Na_2O（2.58%～5.02%）、Al_2O_3（13.58%～16.53%）和 CaO（3.61%～5.60%）含量，较低的 K_2O（0.28%～1.45%）、TiO_2（0.27%～0.33%）、MgO（1.37%～3.22%）和 P_2O_5（0.04%～0.12%）含量。在 TAS 图解中样品均落入亚碱性的花岗闪长岩区域（图 5a），铝饱和指数（A/CNK）为 0.86～1.04（图 5b），岩浆类型属低钾系列（图 5c）。Na_2O/K_2O 的值为 3.05～9.24，除两个样品的 $Mg^{\#}$ 值较低为 31 和 47，其余样品 $Mg^{\#}$ 值的变化范围为 58～66，是准铝质至弱过铝质的钙性花岗岩（图 5d）。在球粒陨石标准化稀土元素配分图中样品均表现为相对富集轻稀土元素，重稀土元素平坦，除 1 个样品具有 δEu 的正异常外（δEu=1.30），其余所有样品均具有轻微的 δEu 负异常（δEu = 0.69～0.89），$(La/Yb)_N$ 值为 2.13～5.08，稀土元素分馏不明显，稀土元素总量较低（22.79×10^{-6}～87.80×10^{-6}）（图 6a）。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中花岗闪长岩样品显示富集大离子亲石元素（LILE）亏损高场强元素（HFSE）的特征，具有 Nb、Ta 和 Ti 的明显负异常（图 6b），同时样品含有较低的 Sr（148.73×10^{-6}～327.90×10^{-6}）和较高的 Y（8.91×10^{-6}～20.01×10^{-6}）含量，Sr/Y 值较低（7.82～21.18），具有较低的 Rb 含量（6.10×10^{-6}～18.69×10^{-6}）和 Rb/Sr 值（0.02～0.21）以及低的 Cr（7.98×10^{-6}～41.98×10^{-6}）和 Ni（3.95×10^{-6}～6.66×10^{-6}）含量。

5　讨论

5.1　岩石成因

本文的斜长花岗岩样品均显示出与 MORB 相似的低 K_2O 和 TiO_2 含量，较低的稀土元素总量和平缓

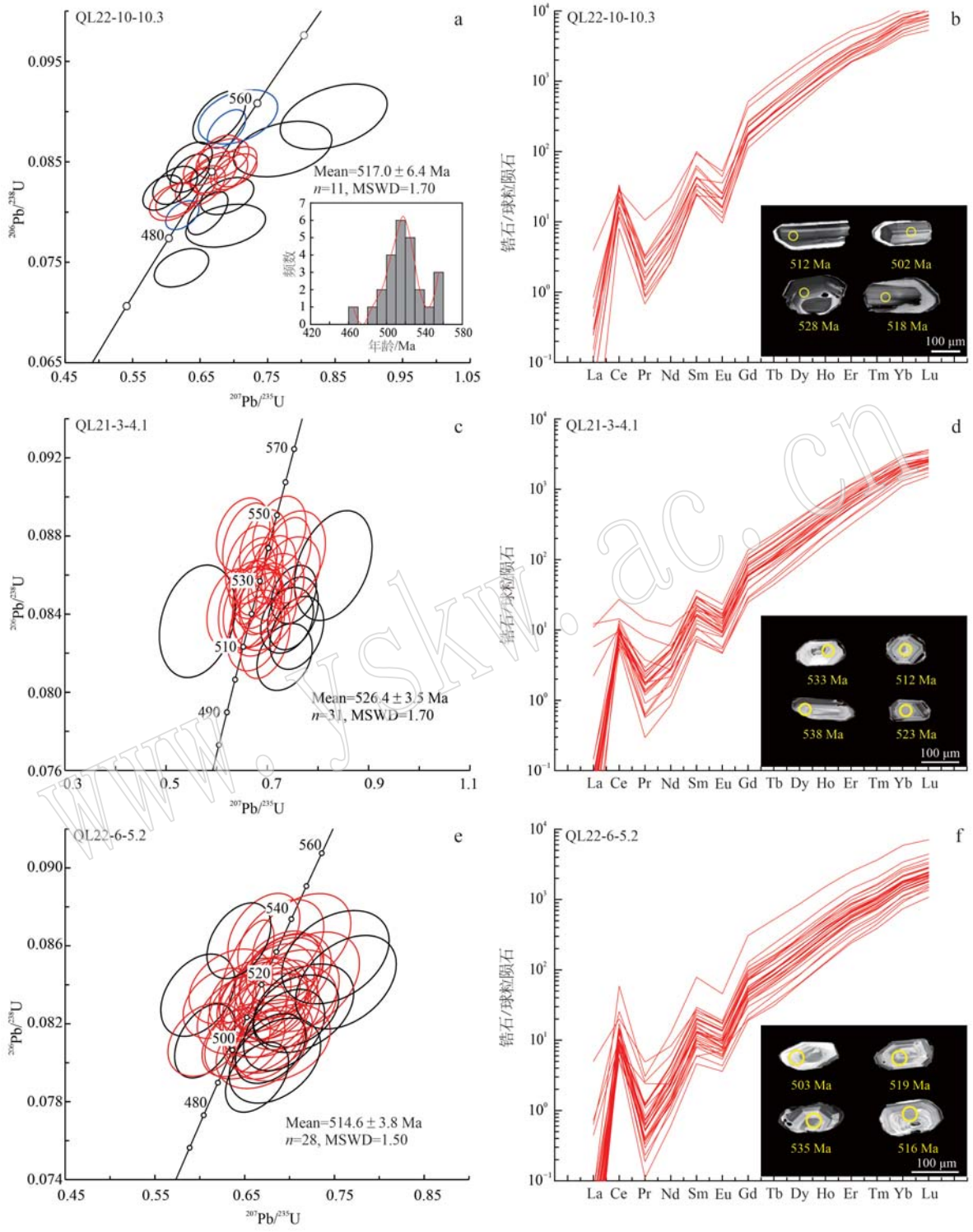

图 3 斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、c、e)和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线及代表性锆石阴极发光图像(b、d、f)(球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 U-Pb concordia diagram (a, c, e), chondrite normalized REE patterns and cathodoluminescence images (b, d, f) for zircons from plagiogranites (chondrite normalization uses values from Sun and McDonough, 1989)

的稀土元素配分模式,然而相比之下未见轻稀土元素亏损,并具有 δEu 负异常和微量元素蛛网图中富集大离子亲石元素、亏损高场强元素以及 Nb、Ta 负异常的现象。上述特征均与不成熟的岛弧岩浆相似

表 1　斜长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试结果

Table 1　LA-ICP-MS U-Pb dating data of zircons in plagiogranites

测试点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						r	同位素年龄/Ma						Conc./%
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	
样品 QL22-10-10.3																		
1	56	127	259	0.49	0.06	0.003	0.62	0.027	0.07	0.001	0.40	463	8	491	17	620	98	94
2	71	151	265	0.57	0.06	0.002	0.68	0.026	0.09	0.001	0.41	528	8	529	16	539	80	99
3	108	225	461	0.49	0.06	0.002	0.70	0.021	0.08	0.001	0.43	521	6	541	12	633	61	96
4	14	19	65	0.29	0.07	0.004	0.77	0.048	0.09	0.002	0.34	533	11	581	28	872	141	91
5	72	147	285	0.52	0.06	0.002	0.69	0.026	0.08	0.001	0.39	506	7	533	16	657	86	94
6	116	282	306	0.92	0.06	0.003	0.68	0.028	0.08	0.001	0.41	519	9	525	17	594	103	98
7	127	260	579	0.45	0.06	0.002	0.64	0.021	0.08	0.001	0.44	512	7	505	13	487	77	98
8	118	246	472	0.52	0.06	0.002	0.67	0.022	0.08	0.001	0.44	518	7	521	14	600	72	99
9	14	26	85	0.31	0.06	0.004	0.69	0.039	0.08	0.001	0.32	488	8	532	23	743	120	91
10	300	697	1015	0.69	0.06	0.002	0.66	0.020	0.08	0.001	0.59	495	8	516	12	609	65	96
11	167	346	507	0.68	0.06	0.002	0.69	0.019	0.09	0.001	0.52	545	7	532	11	472	61	97
12	59	105	325	0.32	0.05	0.002	0.63	0.022	0.08	0.001	0.45	525	8	499	14	383	80	94
13	186	383	742	0.52	0.06	0.002	0.62	0.016	0.08	0.001	0.46	494	6	492	10	476	94	99
14	65	132	293	0.45	0.06	0.002	0.63	0.019	0.08	0.001	0.49	519	7	499	12	420	74	96
15	102	225	390	0.58	0.06	0.002	0.70	0.023	0.08	0.001	0.52	522	8	539	13	613	69	96
16	86	173	421	0.41	0.06	0.002	0.65	0.022	0.08	0.001	0.47	512	8	511	14	509	77	99
17	87	170	351	0.49	0.06	0.002	0.66	0.023	0.08	0.001	0.43	523	7	514	14	476	78	98
18	64	123	271	0.45	0.06	0.004	0.71	0.039	0.09	0.002	0.36	552	10	543	23	554	110	98
19	103	236	370	0.64	0.06	0.002	0.62	0.021	0.08	0.001	0.41	503	7	487	13	413	71	96
20	54	100	287	0.35	0.06	0.002	0.68	0.026	0.09	0.002	0.52	552	10	526	16	456	117	95
21	51	105	247	0.43	0.05	0.002	0.61	0.022	0.08	0.001	0.42	512	7	486	14	361	80	94
22	34	66	189	0.35	0.06	0.002	0.61	0.024	0.08	0.001	0.39	502	7	484	15	433	93	96
23	60	109	375	0.29	0.05	0.002	0.59	0.019	0.08	0.001	0.43	508	7	474	12	328	108	93
24	116	243	393	0.62	0.06	0.002	0.68	0.020	0.09	0.001	0.47	531	7	526	12	522	67	98
25	15	25	53	0.47	0.07	0.005	0.85	0.052	0.09	0.002	0.39	552	13	624	29	969	134	87
样品 QL21-3-4.1																		
1	32	37	115	0.32	0.06	0.003	0.75	0.038	0.09	0.001	0.27	533	7	566	22	717	115	93
2	14	17	49	0.35	0.07	0.005	0.83	0.051	0.09	0.002	0.35	535	11	614	28	970	130	86
3	42	54	121	0.44	0.06	0.003	0.68	0.036	0.08	0.001	0.26	517	7	527	22	565	110	98
4	52	68	119	0.57	0.06	0.003	0.67	0.035	0.08	0.001	0.29	514	7	524	21	572	117	98
5	49	68	147	0.47	0.07	0.003	0.73	0.036	0.08	0.001	0.28	507	7	559	21	776	71	90
6	46	56	127	0.44	0.06	0.003	0.67	0.038	0.08	0.001	0.29	522	8	521	23	532	131	99
7	65	80	205	0.39	0.06	0.003	0.75	0.029	0.09	0.001	0.30	526	6	570	17	746	83	92
8	51	68	135	0.51	0.06	0.003	0.70	0.034	0.08	0.001	0.29	525	7	537	20	613	109	97
9	51	67	136	0.49	0.06	0.003	0.70	0.032	0.08	0.001	0.35	512	8	536	19	628	98	95

续表 1-1

Continued Table 1-1

测试点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						r	同位素年龄/Ma						Conc./%
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	
10	58	80	133	0.60	0.07	0.003	0.75	0.033	0.08	0.001	0.33	520	7	569	19	783	96	91
11	51	63	134	0.47	0.07	0.003	0.76	0.035	0.08	0.001	0.32	514	7	573	20	811	92	89
12	43	59	112	0.52	0.06	0.003	0.74	0.034	0.08	0.001	0.28	518	7	562	20	761	102	91
13	46	57	172	0.33	0.06	0.002	0.68	0.026	0.09	0.001	0.36	530	7	525	16	502	89	99
14	22	27	79	0.34	0.06	0.004	0.75	0.045	0.09	0.002	0.30	537	9	567	26	706	139	94
15	75	100	177	0.56	0.06	0.003	0.68	0.031	0.09	0.001	0.30	526	7	526	19	520	100	99
16	41	56	110	0.52	0.05	0.003	0.63	0.033	0.08	0.001	0.30	522	8	496	20	383	81	94
17	44	60	122	0.49	0.06	0.003	0.72	0.035	0.09	0.001	0.29	545	7	553	21	591	110	98
18	36	48	101	0.48	0.06	0.004	0.70	0.041	0.08	0.001	0.26	521	8	536	25	620	133	97
19	49	60	152	0.39	0.06	0.003	0.71	0.030	0.09	0.001	0.32	533	7	545	18	613	94	97
20	64	86	139	0.62	0.06	0.002	0.69	0.028	0.08	0.001	0.34	524	7	531	17	567	95	98
21	35	46	92	0.50	0.05	0.004	0.56	0.049	0.08	0.002	0.26	518	11	453	32	143	200	86
22	103	126	212	0.60	0.06	0.002	0.74	0.030	0.09	0.001	0.34	538	7	563	18	654	87	95
23	49	66	121	0.55	0.06	0.003	0.68	0.034	0.08	0.001	0.32	522	8	528	21	576	117	98
24	42	54	121	0.45	0.06	0.003	0.72	0.036	0.09	0.001	0.26	528	7	549	22	632	114	96
25	51	66	117	0.56	0.06	0.003	0.67	0.034	0.09	0.001	0.30	535	8	520	20	465	115	97
26	48	61	106	0.58	0.06	0.003	0.68	0.035	0.09	0.001	0.31	531	8	525	21	498	110	98
27	46	59	136	0.44	0.06	0.003	0.69	0.031	0.09	0.001	0.33	540	8	534	19	524	100	98
28	31	43	88	0.48	0.06	0.003	0.66	0.038	0.08	0.002	0.31	523	9	515	23	480	122	98
29	44	52	125	0.42	0.05	0.003	0.66	0.033	0.09	0.001	0.31	541	8	516	20	409	112	95
30	32	39	94	0.42	0.05	0.003	0.65	0.035	0.09	0.001	0.26	544	7	510	21	350	116	93
31	131	173	385	0.45	0.06	0.002	0.66	0.021	0.08	0.001	0.36	526	6	517	13	465	105	98
样品 QL22-6-5.2																		
1	26	54	119	0.46	0.06	0.003	0.69	0.031	0.08	0.001	0.37	522	8	533	18	611	98	97
2	53	113	243	0.46	0.06	0.002	0.64	0.025	0.08	0.001	0.37	502	7	503	16	483	83	99
3	36	74	172	0.43	0.05	0.002	0.60	0.027	0.08	0.001	0.37	517	8	476	17	298	104	91
4	46	103	193	0.54	0.06	0.002	0.67	0.026	0.09	0.001	0.40	535	8	522	16	476	88	97
5	17	33	80	0.42	0.07	0.007	0.79	0.075	0.08	0.002	0.29	500	13	590	43	998	207	83
6	26	54	127	0.43	0.06	0.003	0.67	0.033	0.08	0.001	0.35	515	9	520	20	567	111	99
7	44	95	180	0.53	0.06	0.002	0.66	0.026	0.08	0.001	0.36	516	7	516	16	520	91	99
8	37	71	170	0.42	0.05	0.002	0.62	0.027	0.08	0.001	0.33	514	7	491	17	383	96	95
9	28	57	136	0.42	0.06	0.003	0.63	0.031	0.08	0.001	0.31	519	8	499	19	456	105	95
10	20	35	89	0.40	0.06	0.003	0.71	0.036	0.09	0.002	0.36	533	9	547	21	628	105	97
11	24	37	93	0.39	0.06	0.005	0.76	0.061	0.09	0.002	0.30	575	13	571	35	554	173	99
12	28	50	132	0.38	0.06	0.003	0.70	0.034	0.08	0.001	0.35	523	8	536	20	611	103	97

续表 1-2

Continued Table 1-2

测试点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						r	同位素年龄/Ma						Conc./%
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	
13	20	35	94	0.37	0.06	0.003	0.68	0.036	0.08	0.001	0.33	511	8	527	22	591	115	96
14	28	53	126	0.42	0.06	0.003	0.68	0.031	0.08	0.001	0.38	519	9	527	19	583	104	98
15	32	70	135	0.52	0.06	0.003	0.66	0.033	0.08	0.001	0.31	516	8	515	20	600	118	99
16	10	17	61	0.28	0.07	0.004	0.77	0.046	0.08	0.002	0.33	498	9	580	26	954	151	84
17	18	31	105	0.30	0.06	0.003	0.69	0.032	0.09	0.001	0.37	533	9	533	19	583	102	99
18	58	118	260	0.45	0.05	0.002	0.61	0.022	0.08	0.001	0.42	503	7	481	14	376	81	95
19	20	33	98	0.34	0.06	0.003	0.65	0.033	0.08	0.001	0.32	511	8	507	20	528	119	99
20	51	110	206	0.53	0.06	0.003	0.70	0.028	0.08	0.001	0.34	525	7	536	17	617	94	97
21	26	53	124	0.42	0.06	0.003	0.69	0.032	0.08	0.002	0.39	523	9	531	19	587	100	98
22	37	80	151	0.53	0.06	0.003	0.68	0.027	0.08	0.001	0.39	502	7	525	16	733	95	95
23	19	34	90	0.38	0.06	0.003	0.70	0.039	0.08	0.002	0.34	517	9	537	23	733	119	96
24	82	187	305	0.61	0.06	0.002	0.64	0.021	0.08	0.001	0.42	513	7	503	13	465	105	98
25	24	52	102	0.51	0.06	0.004	0.72	0.037	0.08	0.001	0.35	513	9	548	22	746	112	93
26	221	539	616	0.87	0.06	0.002	0.65	0.020	0.08	0.002	0.66	524	10	510	12	476	76	97
27	29	61	145	0.42	0.05	0.003	0.61	0.028	0.08	0.001	0.34	503	7	481	17	409	102	95
28	14	26	79	0.33	0.06	0.003	0.72	0.039	0.08	0.002	0.37	521	10	550	23	698	117	94
29	27	50	124	0.41	0.06	0.003	0.67	0.032	0.08	0.001	0.32	514	7	523	19	587	114	98
30	23	46	111	0.42	0.06	0.003	0.69	0.035	0.08	0.001	0.31	502	8	534	21	683	106	93
31	29	60	112	0.54	0.06	0.003	0.67	0.033	0.08	0.001	0.33	500	8	520	20	613	111	96
32	17	31	81	0.38	0.07	0.004	0.75	0.039	0.09	0.002	0.35	528	9	569	23	791	114	92
33	34	81	123	0.66	0.06	0.003	0.65	0.029	0.08	0.001	0.35	503	8	509	18	550	106	98
34	19	38	104	0.36	0.06	0.003	0.68	0.034	0.08	0.001	0.37	497	9	529	20	702	108	93
35	108	249	267	0.93	0.05	0.002	0.64	0.023	0.09	0.001	0.41	533	8	505	15	376	81	94
36	22	48	100	0.48	0.07	0.004	0.76	0.037	0.08	0.002	0.39	521	9	576	21	876	112	89
37	43	84	214	0.39	0.06	0.002	0.68	0.026	0.08	0.001	0.38	500	7	526	16	632	80	95
38	28	54	147	0.37	0.06	0.003	0.68	0.032	0.08	0.001	0.33	504	7	525	19	656	75	95
39	26	52	109	0.47	0.06	0.003	0.69	0.029	0.08	0.001	0.38	515	8	531	18	656	96	96
40	26	47	132	0.36	0.06	0.003	0.71	0.031	0.08	0.001	0.34	512	7	543	19	694	95	94
41	24	44	123	0.36	0.06	0.003	0.67	0.030	0.08	0.001	0.36	505	8	522	18	628	102	96
42	24	46	121	0.38	0.06	0.003	0.69	0.030	0.08	0.001	0.39	506	8	535	18	672	88	94
43	18	32	86	0.37	0.06	0.003	0.70	0.036	0.08	0.001	0.33	513	8	538	21	661	111	95
44	55	105	290	0.36	0.06	0.002	0.66	0.023	0.08	0.001	0.43	492	7	517	14	639	79	94
45	21	41	96	0.42	0.06	0.003	0.67	0.033	0.08	0.001	0.35	511	8	523	20	611	109	97

表 2 斜长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 稀土元素分析结果 $w_B/10^{-6}$

Table 2 LA-ICP-MS rare earth elements of zircons in palgiogranites

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
样品 QL22-10-10.3														
1	0.08	11.68	0.19	3.51	7.31	1.13	50.67	18.48	241.95	100.18	498.11	109.82	1 151.75	227.70
2	0.09	13.32	0.20	3.03	6.32	1.58	43.73	16.45	214.89	89.56	450.40	104.17	1 123.67	232.78
3	0.03	13.01	0.23	3.71	6.81	1.15	44.18	16.74	221.82	96.79	509.69	119.60	1 349.48	282.44
4	0.01	2.49	0.01	0.45	1.89	0.33	14.63	5.88	85.16	37.21	184.80	40.45	414.67	83.99
5	0.02	10.46	0.15	3.10	7.16	1.26	52.81	19.75	266.04	108.41	541.92	119.39	1 254.04	248.11
6	0.08	27.22	0.10	1.56	4.58	1.62	45.17	17.55	250.21	110.19	564.85	127.89	1 402.09	293.06
7	0.08	18.28	0.28	5.02	11.19	1.83	66.67	24.51	326.55	137.09	681.61	159.82	1 675.81	343.37
8	0.18	19.54	0.39	6.13	12.26	1.89	69.55	24.73	326.64	133.75	676.55	152.55	1 647.12	327.30
9	0.01	3.49	0.03	0.66	2.24	0.38	15.62	5.98	82.16	35.41	^{177}.75	41.51	440.00	90.77
10	0.11	43.72	0.17	2.56	6.64	1.37	47.78	18.88	275.95	128.65	712.01	178.65	2 204.67	479.93
11	0.26	16.05	0.36	4.59	8.54	1.53	46.81	16.55	222.51	91.96	490.18	116.05	1 261.05	257.56
12	0.06	6.80	0.07	0.96	1.46	0.35	9.38	3.67	58.35	29.73	187.56	52.66	687.15	159.25
13	0.05	25.32	0.11	1.98	6.81	1.18	58.63	22.35	304.18	125.61	639.49	140.93	1 509.44	288.42
14	0.01	10.18	0.19	3.26	8.05	1.25	55.36	20.72	270.12	112.26	554.49	123.42	1 293.29	250.91
15	1.22	23.03	1.28	13.22	18.26	3.85	109.31	38.79	485.18	193.34	903.77	191.42	1 868.89	355.00
16	0.01	11.42	0.13	2.72	4.77	0.84	29.02	11.17	152.78	69.04	389.96	96.83	1 113.69	235.67
17	0.01	13.08	0.18	3.56	8.48	1.20	57.76	21.42	276.86	114.81	579.64	127.07	1 347.64	261.68
18	0.08	9.40	0.15	2.49	5.61	0.99	36.91	13.51	^{177}.14	75.98	400.20	91.56	1 000.05	207.08
19	0.08	24.23	0.29	4.49	8.01	2.62	47.26	17.15	218.34	96.23	520.44	129.16	1 544.29	353.46
20	0.09	5.79	0.08	0.98	1.37	0.33	8.55	3.43	50.05	25.04	161.27	45.09	602.29	137.01
21	0.01	8.74	0.09	2.19	5.72	0.90	41.24	15.96	206.79	87.48	445.56	98.19	1 054.00	200.46
22	0.01	6.50	0.08	1.61	4.93	0.71	35.58	13.77	182.92	76.82	392.33	87.17	916.56	176.88
23	0.06	11.13	0.10	1.15	1.88	0.42	13.69	6.15	96.27	49.37	294.66	76.72	934.83	201.58
24	0.14	22.69	0.40	7.45	19.45	3.22	132.71	47.83	599.28	234.77	1 098.34	225.82	2 208.18	403.50
25	0.00	6.30	0.02	0.31	1.09	0.29	9.99	4.18	62.25	28.72	158.25	38.45	432.56	94.82
样品 QL21-3-4.1														
1	0.02	5.08	0.07	0.69	1.43	0.39	7.26	2.43	33.07	15.68	89.92	25.96	315.66	68.25
2	0.01	3.91	0.05	0.44	1.03	0.27	5.89	2.06	27.52	11.64	61.48	16.49	186.48	37.18
3	0.01	7.25	0.14	1.63	3.29	0.81	16.76	5.54	71.54	29.42	151.92	38.55	416.09	82.04
4	0.02	6.99	0.28	3.10	5.71	1.22	26.90	8.69	105.70	42.20	203.07	49.28	507.65	93.98
5	28.06	32.17	5.84	16.23	6.13	1.02	20.79	6.47	81.36	33.65	173.25	43.36	469.69	90.63
6	0.05	5.86	0.16	1.73	3.13	0.70	13.05	3.97	50.10	21.03	113.88	30.53	358.61	75.12
7	0.01	10.18	0.13	1.35	2.80	0.69	14.19	4.95	71.45	32.88	186.02	50.98	569.08	115.91
8	0.02	5.48	0.25	3.12	4.23	1.10	15.63	4.80	57.37	23.85	127.75	34.76	399.67	82.98
9	3.81	11.63	0.98	3.54	3.24	0.71	15.76	5.12	67.21	28.68	151.63	38.76	420.90	83.56
10	0.76	9.07	0.54	4.63	6.66	1.40	30.24	9.37	117.21	45.26	217.96	52.12	528.32	98.65
11	0.01	7.32	0.20	1.98	3.75	0.82	15.84	5.17	65.93	27.80	148.77	39.32	438.75	89.60
12	0.02	6.21	0.23	2.42	4.38	1.12	19.82	6.21	75.77	29.40	148.91	37.43	403.86	78.84
13	0.01	8.27	0.11	0.98	1.99	0.58	9.89	3.48	49.04	22.80	132.55	37.68	451.93	96.09
14	0.01	4.45	0.04	0.52	1.34	0.34	7.61	2.66	36.86	15.94	87.07	23.87	274.83	57.12
15	0.01	9.86	0.31	3.16	5.78	1.41	30.68	9.94	122.44	49.64	247.78	59.63	636.55	120.36
16	0.01	7.21	0.20	2.02	3.99	0.88	19.57	6.18	76.11	31.07	155.73	38.70	418.98	79.27
17	0.01	7.65	0.20	2.32	4.31	0.93	23.15	7.20	91.25	36.59	181.33	44.59	469.55	89.53
18	0.01	6.41	0.16	1.60	3.71	0.76	17.61	5.52	69.58	27.50	140.13	35.57	384.61	75.39
19	0.69	8.87	0.22	1.29	2.11	0.42	9.92	3.50	47.42	20.89	115.58	31.86	364.56	75.82
20	0.02	8.25	0.35	3.93	7.13	1.71	35.38	10.80	128.76	49.96	239.24	56.54	583.57	107.71
21	0.02	6.42	0.16	2.20	3.37	0.79	15.19	4.80	56.60	23.21	117.88	30.57	346.27	66.07
22	0.05	11.05	0.31	3.19	5.92	1.16	26.53	8.31	105.55	42.14	215.37	55.02	587.50	113.74
23	0.03	7.44	0.21	2.27	4.26	0.99	21.26	6.80	84.57	34.19	171.49	42.86	457.55	86.49
24	0.02	7.05	0.17	1.67	3.06	0.68	15.26	5.02	62.98	26.36	138.89	36.79	401.70	79.94
25	0.01	7.86	0.22	2.36	4.93	1.09	21.83	6.94	85.95	33.46	170.51	41.96	445.79	85.24

续表 2-1

Continued Table 2-1

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
26	0.01	7.07	0.26	2.88	5.47	1.26	26.28	8.37	102.75	40.15	192.54	46.01	469.53	87.39
27	0.01	9.09	0.08	1.25	2.70	0.66	15.19	5.22	72.82	31.34	166.28	42.18	461.20	89.57
28	0.01	5.03	0.20	2.30	3.72	1.06	15.34	4.67	55.69	22.65	115.25	30.22	331.43	66.19
29	1.78	7.77	0.46	1.63	1.59	0.35	6.40	2.08	27.23	11.98	66.33	18.90	233.47	50.65
30	0.01	6.10	0.07	1.14	2.42	0.60	12.73	4.27	54.33	22.48	117.42	30.34	325.55	63.33
31	3.41	22.14	1.71	6.76	4.50	0.81	14.94	4.85	63.89	28.51	166.05	47.96	581.67	121.83
样品 QL22-6-5.2														
1	0.14	7.22	0.16	2.20	3.79	0.99	18.37	5.70	70.84	28.79	151.15	34.72	378.26	81.29
2	0.01	13.93	0.06	1.44	3.33	0.85	19.22	6.73	95.19	42.13	229.32	53.58	594.48	127.42
3	0.02	9.67	0.12	2.03	4.29	1.10	22.70	7.29	90.25	39.16	201.36	46.83	508.52	109.52
4	0.01	12.06	0.14	2.68	5.30	1.24	28.49	8.77	108.85	44.93	228.83	51.69	550.39	112.67
5	0.11	6.50	0.14	1.46	2.46	0.64	12.37	4.12	49.62	21.28	108.13	24.36	273.34	58.70
6	0.01	6.08	0.09	1.48	2.43	0.71	11.50	3.57	42.36	18.21	101.19	25.67	296.06	69.07
7	0.01	10.59	0.05	0.85	2.23	0.59	13.76	4.58	61.80	26.55	144.05	33.73	371.72	79.17
8	0.01	9.96	0.10	1.92	4.00	1.02	21.61	7.06	90.05	37.84	205.64	46.56	517.23	106.91
9	0.01	8.38	0.08	1.37	3.08	0.65	14.97	4.78	61.67	26.21	138.45	33.61	369.42	78.47
10	0.01	5.84	0.05	0.74	1.15	0.53	5.15	1.64	20.69	9.11	53.79	14.44	190.67	49.15
11	0.20	6.33	0.13	0.85	1.53	0.31	7.97	2.61	33.01	14.69	76.07	19.24	215.91	47.02
12	0.01	8.11	0.04	0.77	1.91	0.44	10.14	3.38	43.69	19.52	104.54	24.39	279.36	62.13
13	0.01	5.81	0.04	0.72	1.74	0.43	9.21	2.85	35.51	15.17	81.25	19.98	230.94	51.29
14	0.01	7.00	0.09	1.70	3.49	0.80	18.74	5.77	69.45	29.54	148.85	34.27	379.19	81.09
15	0.01	8.03	0.14	2.56	4.87	1.29	24.59	7.44	89.83	37.07	181.48	40.29	438.61	92.15
16	0.01	2.82	0.01	0.25	0.50	0.22	2.09	0.76	9.50	4.54	28.31	8.20	115.28	30.23
17	0.01	5.73	0.03	0.55	1.18	0.32	5.98	2.06	27.40	12.71	73.54	18.53	237.09	54.68
18	0.01	13.33	0.07	1.42	2.96	0.88	16.38	6.00	83.21	39.72	218.94	52.27	630.77	131.92
19	0.01	6.52	0.02	0.65	1.53	0.39	9.07	3.08	39.76	17.80	96.38	23.46	278.52	60.10
20	0.01	11.56	0.06	1.16	2.62	0.59	14.05	4.63	59.82	25.99	137.10	31.89	366.02	74.70
21	0.01	7.00	0.07	1.51	2.90	0.74	14.92	4.66	56.21	24.06	127.69	30.22	355.28	73.84
22	0.02	7.87	0.15	2.66	4.44	1.09	22.81	7.06	85.18	33.92	174.71	40.69	456.62	96.51
23	0.01	4.30	0.07	1.19	1.73	0.54	7.78	2.32	27.66	12.13	64.96	16.41	204.86	45.13
24	0.20	20.67	0.31	3.66	5.74	1.39	33.20	11.18	138.03	57.91	298.76	66.52	715.24	147.00
25	0.52	8.52	0.19	2.02	3.26	0.75	16.04	4.95	59.27	24.66	124.81	28.71	319.54	64.85
26	0.02	47.68	0.37	7.55	15.27	3.36	79.67	24.58	280.56	109.67	524.95	118.10	1232.41	235.49
27	0.01	11.54	0.04	0.83	1.60	0.47	9.65	3.19	40.12	18.27	102.96	25.56	303.22	68.13
28	0.01	4.54	0.01	0.36	0.90	0.27	4.93	1.46	20.26	8.89	50.51	12.52	154.74	36.10
29	0.01	7.80	0.07	1.20	2.55	0.72	15.05	4.84	61.00	26.69	140.93	33.20	381.34	82.13
30	0.01	6.99	0.07	1.51	2.62	0.66	12.72	4.06	50.04	21.88	117.18	28.17	327.69	71.12
31	0.01	7.34	0.08	1.95	3.89	1.02	19.16	5.71	70.57	28.31	141.35	32.10	354.21	74.12
32	0.01	5.94	0.02	0.40	1.01	0.30	6.66	2.16	27.75	11.90	63.18	15.03	175.72	37.11
33	1.55	16.26	0.60	4.94	5.27	1.30	25.46	7.68	91.36	36.13	185.98	40.66	452.43	93.58
34	0.32	7.15	0.12	0.91	1.24	0.31	7.88	2.60	34.44	15.11	84.25	21.31	248.72	57.41
35	0.02	23.13	0.28	5.14	9.99	1.89	48.76	14.05	160.15	59.84	292.85	63.08	646.20	131.57
36	0.01	5.99	0.07	1.58	2.88	0.67	13.92	4.35	54.03	21.42	114.86	26.50	312.01	65.21
37	0.12	10.96	0.16	1.86	2.58	0.79	14.34	4.83	68.71	32.56	186.79	46.55	535.85	119.86
38	0.23	8.40	0.13	1.61	2.52	0.58	12.70	4.08	51.49	21.41	122.39	28.93	332.24	75.05
39	0.01	7.13	0.09	1.97	4.03	0.99	20.00	6.54	79.75	31.94	160.02	36.02	387.41	79.87
40	0.21	8.99	0.10	1.15	2.05	0.52	12.30	3.98	54.55	24.41	136.13	33.07	383.23	86.03
41	0.01	7.33	0.05	0.88	2.10	0.57	12.31	3.93	52.49	22.63	120.73	28.60	326.05	72.62
42	0.01	7.64	0.04	0.85	2.00	0.52	12.05	4.05	53.96	24.44	134.41	31.89	364.38	79.94
43	0.01	5.73	0.05	0.97	1.98	0.51	11.24	3.62	45.34	19.42	102.65	24.04	276.31	59.06
44	0.01	12.80	0.05	1.15	2.15	0.72	12.31	4.29	60.95	29.56	^{177}.38	45.22	560.16	132.83
45	0.01	5.80	0.29	1.42	2.62	0.76	13.22	4.13	51.49	21.81	114.59	26.59	300.22	65.87

表 3 西秦岭天水地区斜长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of plagiogranites in Tianshui area, West Qinling

样品号	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hfi$	$\varepsilon Hf(0)$	$\varepsilon Hf(t)$	2σ	t_{DM}/Ma	t_{DM}^{C}/Ma
Q21-3-4. 1-01	533	0. 044 022	0. 000 020	0. 001 728	0. 000 016	0. 282 815	0. 000 020	0. 282 798	1. 5	12. 66	0. 70	632	688
Q21-3-4. 1-02	535	0. 031 644	0. 000 018	0. 001 304	0. 000 021	0. 282 852	0. 000 018	0. 282 839	2. 8	14. 16	0. 63	572	593
Q21-3-4. 1-03	547	0. 038 364	0. 000 019	0. 001 484	0. 000 019	0. 282 820	0. 000 019	0. 282 804	1. 7	13. 22	0. 68	621	663
Q21-3-4. 1-04	517	0. 033 802	0. 000 018	0. 001 364	0. 000 009	0. 282 796	0. 000 018	0. 282 783	0. 9	11. 80	0. 64	652	731
Q21-3-4. 1-05	514	0. 050 758	0. 000 021	0. 001 956	0. 000 014	0. 282 843	0. 000 021	0. 282 824	2. 5	13. 17	0. 75	595	640
Q21-3-4. 1-06	507	0. 034 233	0. 000 019	0. 001 330	0. 000 055	0. 282 803	0. 000 019	0. 282 790	1. 1	11. 83	0. 67	642	721
Q21-3-4. 1-07	522	0. 045 166	0. 000 018	0. 001 803	0. 000 004	0. 282 835	0. 000 018	0. 282 818	2. 2	13. 13	0. 65	603	649
Q21-3-4. 1-08	526	0. 041 326	0. 000 018	0. 001 726	0. 000 013	0. 282 827	0. 000 018	0. 282 810	1. 9	12. 94	0. 62	614	664
Q21-3-4. 1-09	525	0. 039 509	0. 000 018	0. 001 580	0. 000 010	0. 282 869	0. 000 018	0. 282 853	3. 4	14. 44	0. 64	552	568
Q21-3-4. 1-10	512	0. 039 525	0. 000 018	0. 001 574	0. 000 025	0. 282 846	0. 000 018	0. 282 831	2. 6	13. 38	0. 63	584	626
Q21-3-4. 1-11	520	0. 039 697	0. 000 019	0. 001 492	0. 000 018	0. 282 768	0. 000 019	0. 282 753	−0. 1	10. 81	0. 68	695	796
Q21-3-4. 1-12	514	0. 034 421	0. 000 018	0. 001 391	0. 000 022	0. 282 784	0. 000 018	0. 282 770	0. 4	11. 28	0. 64	671	761
Q21-3-4. 1-13	518	0. 045 912	0. 000 019	0. 001 782	0. 000 022	0. 282 860	0. 000 019	0. 282 842	3. 1	13. 91	0. 66	568	596
Q21-3-4. 1-14	530	0. 046 908	0. 000 019	0. 001 937	0. 000 016	0. 282 816	0. 000 019	0. 282 797	1. 6	12. 59	0. 68	633	690
Q21-3-4. 1-15	537	0. 053 205	0. 000 017	0. 002 040	0. 000 016	0. 282 809	0. 000 017	0. 282 788	1. 3	12. 43	0. 60	646	706
Q21-3-4. 1-16	526	0. 051 422	0. 000 020	0. 001 916	0. 000 014	0. 282 834	0. 000 020	0. 282 815	2. 2	13. 14	0. 71	607	652
Q21-3-4. 1-17	522	0. 036 140	0. 000 022	0. 001 483	0. 000 007	0. 282 837	0. 000 022	0. 282 823	2. 3	13. 31	0. 78	595	638
Q21-3-4. 1-18	545	0. 043 798	0. 000 020	0. 001 681	0. 000 013	0. 282 776	0. 000 020	0. 282 758	0. 1	11. 53	0. 71	688	769
Q21-3-4. 1-19	521	0. 032 623	0. 000 019	0. 001 240	0. 000 023	0. 282 823	0. 000 019	0. 282 810	1. 8	12. 85	0. 68	613	667
Q21-3-4. 1-20	533	0. 045 362	0. 000 018	0. 001 816	0. 000 033	0. 282 732	0. 000 018	0. 282 714	−1. 4	9. 72	0. 65	752	876
Q21-3-4. 1-21	524	0. 056 722	0. 000 020	0. 002 121	0. 000 032	0. 282 832	0. 000 020	0. 282 811	2. 1	12. 94	0. 72	614	663
Q21-3-4. 1-22	518	0. 038 759	0. 000 015	0. 001 475	0. 000 007	0. 282 810	0. 000 015	0. 282 796	1. 4	12. 27	0. 52	634	701
Q21-3-4. 1-23	538	0. 044 926	0. 000 017	0. 001 650	0. 000 015	0. 282 794	0. 000 017	0. 282 777	0. 8	12. 05	0. 59	661	731
Q21-3-4. 1-24	522	0. 040 006	0. 000 018	0. 001 566	0. 000 013	0. 282 840	0. 000 018	0. 282 824	2. 4	13. 36	0. 64	594	635
Q21-3-4. 1-25	528	0. 040 845	0. 000 018	0. 001 628	0. 000 018	0. 282 834	0. 000 018	0. 282 817	2. 2	13. 26	0. 62	603	646
Q21-3-4. 1-26	535	0. 047 601	0. 000 018	0. 001 794	0. 000 021	0. 282 868	0. 000 018	0. 282 850	3. 4	14. 56	0. 65	556	568
Q21-3-4. 1-27	531	0. 041 393	0. 000 018	0. 001 620	0. 000 006	0. 282 819	0. 000 018	0. 282 803	1. 7	12. 81	0. 64	624	677
Q21-3-4. 1-28	540	0. 054 184	0. 000 018	0. 001 993	0. 000 039	0. 282 848	0. 000 018	0. 282 828	2. 7	13. 89	0. 64	588	615
Q21-3-4. 1-29	523	0. 044 856	0. 000 022	0. 001 805	0. 000 016	0. 282 821	0. 000 022	0. 282 803	1. 7	12. 62	0. 79	625	682
Q21-3-4. 1-30	541	0. 040 335	0. 000 016	0. 001 616	0. 000 005	0. 282 851	0. 000 016	0. 282 834	2. 8	14. 15	0. 57	578	600
Q21-3-4. 1-31	544	0. 043 718	0. 000 019	0. 001 664	0. 000 012	0. 282 790	0. 000 019	0. 282 773	0. 6	12. 05	0. 66	666	736
Q21-3-4. 1-32	526	0. 074 511	0. 000 020	0. 002 994	0. 000 061	0. 282 850	0. 000 020	0. 282 820	2. 7	13. 30	0. 70	602	641
QL22-6-5. 2-01	522	0. 029 830	0. 001 390	0. 001 125	0. 000 033	0. 282 838	0. 000 020	0. 282 827	2. 3	13. 46	0. 70	589	628
QL22-6-5. 2-02	502	0. 058 556	0. 000 788	0. 002 321	0. 000 048	0. 282 855	0. 000 020	0. 282 833	2. 9	13. 24	0. 72	583	627

续表 3-1

Continued Table 3-1

样品号	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hfi$	$\varepsilon Hf(0)$	$\varepsilon Hf(t)$	2σ	t_{DM}/Ma	t_{DMC}/Ma
QL22-6-5. 2-03	517	0. 062 645	0. 001 131	0. 002 200	0. 000 020	0. 282 882	0. 000 023	0. 282 861	3. 9	14. 55	0. 80	541	555
QL22-6-5. 2-04	535	0. 068 497	0. 001 372	0. 002 466	0. 000 018	0. 282 771	0. 000 023	0. 282 746	−0. 1	10. 88	0. 80	710	804
QL22-6-5. 2-06	515	0. 048 906	0. 002 652	0. 001 874	0. 000 073	0. 282 845	0. 000 021	0. 282 827	2. 6	13. 31	0. 73	590	632
QL22-6-5. 2-07	516	0. 024 932	0. 000 224	0. 000 977	0. 000 013	0. 282 828	0. 000 019	0. 282 818	2. 0	13. 02	0. 67	601	652
QL22-6-5. 2-08	514	0. 064 085	0. 000 557	0. 002 421	0. 000 023	0. 282 831	0. 000 021	0. 282 808	2. 1	12. 60	0. 75	620	677
QL22-6-5. 2-09	519	0. 046 980	0. 000 465	0. 001 741	0. 000 023	0. 282 844	0. 000 020	0. 282 827	2. 5	13. 40	0. 71	590	630
QL22-6-5. 2-10	533	0. 042 483	0. 000 475	0. 001 938	0. 000 043	0. 282 799	0. 000 021	0. 282 780	1. 0	12. 03	0. 76	659	728
QL22-6-5. 2-12	523	0. 033 135	0. 000 545	0. 001 269	0. 000 006	0. 282 755	0. 000 020	0. 282 743	−0. 6	10. 50	0. 70	709	818
QL22-6-5. 2-13	511	0. 042 954	0. 000 620	0. 001 601	0. 000 025	0. 282 756	0. 000 018	0. 282 740	−0. 6	10. 14	0. 63	715	831
QL22-6-5. 2-14	519	0. 047 685	0. 000 928	0. 001 746	0. 000 009	0. 282 751	0. 000 019	0. 282 734	−0. 7	10. 11	0. 67	724	840
QL22-6-5. 2-15	516	0. 030 934	0. 001 013	0. 001 151	0. 000 018	0. 282 802	0. 000 021	0. 282 791	1. 0	12. 04	0. 73	641	714
QL22-6-5. 2-17	533	0. 035 214	0. 000 466	0. 001 433	0. 000 015	0. 282 802	0. 000 020	0. 282 788	1. 1	12. 32	0. 69	645	710
QL22-6-5. 2-18	503	0. 067 850	0. 002 022	0. 002 516	0. 000 045	0. 282 838	0. 000 020	0. 282 814	2. 3	12. 58	0. 71	612	670
QL22-6-5. 2-19	511	0. 038 784	0. 000 810	0. 001 421	0. 000 012	0. 282 831	0. 000 017	0. 282 817	2. 1	12. 87	0. 61	604	657
QL22-6-5. 2-20	525	0. 051 680	0. 001 055	0. 001 892	0. 000 011	0. 282 799	0. 000 021	0. 282 781	1. 0	11. 88	0. 73	657	732
QL22-6-5. 2-21	523	0. 049 559	0. 000 814	0. 001 763	0. 000 019	0. 282 802	0. 000 022	0. 282 784	1. 0	11. 97	0. 76	651	724
QL22-6-5. 2-22	502	0. 035 558	0. 001 551	0. 001 341	0. 000 054	0. 282 771	0. 000 020	0. 282 758	0. 0	10. 58	0. 73	688	797
QL22-6-5. 2-23	517	0. 026 912	0. 000 660	0. 001 064	0. 000 016	0. 282 785	0. 000 019	0. 282 775	0. 5	11. 50	0. 67	662	749
QL22-6-5. 2-24	513	0. 050 662	0. 000 651	0. 001 901	0. 000 038	0. 282 785	0. 000 021	0. 282 767	0. 5	11. 13	0. 76	678	770
QL22-6-5. 2-25	513	0. 031 752	0. 001 246	0. 001 178	0. 000 029	0. 282 805	0. 000 019	0. 282 794	1. 2	12. 08	0. 68	636	709
QL22-6-5. 2-26	524	0. 136 134	0. 002514	0. 004 803	0. 000 048	0. 282 852	0. 000 021	0. 282 804	2. 8	12. 71	0. 75	631	678
QL22-6-5. 2-27	503	0. 048 508	0. 000 854	0. 001 823	0. 000 013	0. 282 827	0. 000 019	0. 282 810	2. 0	12. 45	0. 68	615	678
QL22-6-5. 2-28	521	0. 033 867	0. 000 699	0. 001 275	0. 000 010	0. 282 842	0. 000 021	0. 282 830	2. 5	13. 54	0. 73	585	622
QL22-6-5. 2-29	514	0. 040 235	0. 000 721	0. 001 528	0. 000 044	0. 282 813	0. 000 019	0. 282 798	1. 4	12. 25	0. 66	631	699
QL22-6-5. 2-30	502	0. 018 092	0. 000 610	0. 000 731	0. 000 019	0. 282 873	0. 000 022	0. 282 867	3. 6	14. 42	0. 76	533	551
QL22-6-5. 2-31	500	0. 036 432	0. 000 739	0. 001 361	0. 000 016	0. 282 794	0. 000 018	0. 282 782	0. 8	11. 37	0. 65	655	745
QL22-6-5. 2-32	528	0. 075 363	0. 000 797	0. 002 833	0. 000 027	0. 282 788	0. 000 019	0. 282 759	0. 5	11. 21	0. 66	692	777
QL22-6-5. 2-33	503	0. 048 438	0. 001 697	0. 001 760	0. 000 049	0. 282 775	0. 000 019	0. 282 759	0. 1	10. 62	0. 66	689	795
QL22-6-5. 2-34	497	0. 047 718	0. 000 392	0. 001 841	0. 000 026	0. 282 761	0. 000 019	0. 282 744	−0. 4	9. 94	0. 67	712	833
QL22-6-5. 2-35	533	0. 049 770	0. 000 800	0. 001 862	0. 000 042	0. 282 827	0. 000 023	0. 282 808	1. 9	13. 05	0. 80	616	663
QL22-6-5. 2-36	521	0. 033 589	0. 002 893	0. 001 203	0. 000 087	0. 282 871	0. 000 024	0. 282 859	3. 5	14. 58	0. 83	543	556
QL22-6-5. 2-37	500	0. 067 387	0. 000 827	0. 002 524	0. 000 018	0. 282 805	0. 000 021	0. 282 782	1. 2	11. 37	0. 75	660	745
QL22-6-5. 2-38	504	0. 054 759	0. 000 250	0. 002 071	0. 000 022	0. 282 772	0. 000 020	0. 282 752	0. 0	10. 42	0. 70	700	808
QL22-6-5. 2-39	515	0. 035 417	0. 000 772	0. 001 359	0. 000 038	0. 282 849	0. 000 021	0. 282 835	2. 7	13. 61	0. 73	577	614
QL22-6-5. 2-40	512	0. 047 427	0. 001 258	0. 001 754	0. 000 026	0. 282 843	0. 000 021	0. 282 826	2. 5	13. 19	0. 75	592	638
QL22-6-5. 2-41	505	0. 031 093	0. 000 537	0. 001 190	0. 000 014	0. 282 800	0. 000 020	0. 282 789	1. 0	11. 72	0. 71	644	726

续表 3-2

Continued Table 3-2

样品号	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hfi$	εHf(0)	εHf(t)	2σ	t_{DM}/Ma	t_{DMC}/Ma
QL22-6-5. 2-42	506	0. 024 830	0. 000 538	0. 000 961	0. 000 007	0. 282 831	0. 000 017	0. 282 822	2. 1	12. 91	0. 60	597	651
QL22-6-5. 2-43	513	0. 031 181	0. 000 173	0. 001 209	0. 000 008	0. 282 800	0. 000 018	0. 282 788	1. 0	11. 88	0. 63	644	722
QL22-6-5. 2-45	511	0. 032 300	0. 000 382	0. 001 316	0. 000 013	0. 282 813	0. 000 021	0. 282 801	1. 5	12. 27	0. 74	627	696
QL22-6-5. 2-46	520	0. 099 169	0. 001 096	0. 003 416	0. 000 033	0. 282 826	0. 000 026	0. 282 793	1. 9	12. 21	0. 92	645	707
QL22-10-10. 3-02	528	0. 150 890	0. 001 268	0. 004 997	0. 000 018	0. 282 861	0. 000 022	0. 282 812	3. 1	13. 04	0. 78	620	660
QL22-10-10. 3-03	521	0. 164 002	0. 003 753	0. 005 522	0. 000 146	0. 282 882	0. 000 024	0. 282 828	3. 9	13. 48	0. 83	596	626
QL22-10-10. 3-04	533	0. 058 217	0. 002 587	0. 001 973	0. 000 114	0. 282 853	0. 000 021	0. 282 834	2. 9	13. 95	0. 73	580	606
QL22-10-10. 3-05	506	0. 117 955	0. 001 684	0. 003 948	0. 000 034	0. 282 795	0. 000 021	0. 282 758	0. 8	10. 64	0. 75	703	796
QL22-10-10. 3-06	519	0. 219 438	0. 003 048	0. 007 559	0. 000 010	0. 282 729	0. 000 024	0. 282 655	−1. 5	7. 32	0. 85	897	1 017
QL22-10-10. 3-07	512	0. 234 891	0. 004 562	0. 007 953	0. 000 045	0. 282 799	0. 000 029	0. 282 723	1. 0	9. 55	1. 03	787	870
QL22-10-10. 3-08	518	0. 227 143	0. 007 826	0. 007 792	0. 000 206	0. 282 857	0. 000 024	0. 282 781	3. 0	11. 75	0. 84	684	735
QL22-10-10. 3-10	495	0. 243 788	0. 007 422	0. 009 110	0. 000 142	0. 282 915	0. 000 033	0. 282 830	5. 1	12. 98	1. 18	609	638
QL22-10-10. 3-11	545	0. 073 124	0. 000 745	0. 002 726	0. 000 055	0. 282 822	0. 000 021	0. 282 794	1. 8	12. 81	0. 73	639	688
QL22-10-10. 3-12	525	0. 079 530	0. 001 656	0. 003 225	0. 000 071	0. 282 791	0. 000 020	0. 282 760	0. 7	11. 15	0. 73	694	779
QL22-10-10. 3-13	494	0. 065 531	0. 002 281	0. 002 378	0. 000 113	0. 282 797	0. 000 021	0. 282 775	0. 9	10. 99	0. 75	670	764
QL22-10-10. 3-14	519	0. 190 227	0. 001 524	0. 006 361	0. 000 046	0. 282 903	0. 000 027	0. 282 841	4. 6	13. 90	0. 94	577	598
QL22-10-10. 3-15	522	0. 263 658	0. 005 033	0. 008 696	0. 000 101	0. 282 899	0. 000 029	0. 282 813	4. 5	12. 98	1. 03	630	659
QL22-10-10. 3-16	512	0. 125 921	0. 001 786	0. 004 587	0. 000 052	0. 282 783	0. 000 019	0. 282 739	0. 4	10. 10	0. 66	735	835
QL22-10-10. 3-17	523	0. 132 716	0. 002 603	0. 004 669	0. 000 132	0. 282 875	0. 000 023	0. 282 829	3. 6	13. 55	0. 83	593	623
QL22-10-10. 3-18	552	0. 142 590	0. 001 889	0. 005 218	0. 000 037	0. 282 827	0. 000 022	0. 282 773	1. 9	12. 22	0. 79	679	731
QL22-10-10. 3-19	503	0. 078 969	0. 008 052	0. 003 058	0. 000 283	0. 282 860	0. 000 023	0. 282 831	3. 1	13. 17	0. 82	589	632
QL22-10-10. 3-20	552	0. 074 929	0. 002 401	0. 003 011	0. 000 070	0. 282 774	0. 000 020	0. 282 742	0. 1	11. 13	0. 72	716	800
QL22-10-10. 3-21	512	0. 124 354	0. 000 802	0. 004 233	0. 000 060	0. 282 839	0. 000 023	0. 282 798	2. 4	12. 22	0. 83	641	700
QL22-10-10. 3-22	502	0. 104 477	0. 001 876	0. 003 699	0. 000 026	0. 282 842	0. 000 021	0. 282 807	2. 5	12. 33	0. 76	626	685
QL22-10-10. 3-23	508	0. 065 397	0. 003 832	0. 002 258	0. 000 101	0. 282 839	0. 000 023	0. 282 817	2. 4	12. 79	0. 82	606	660
QL22-10-10. 3-24	531	0. 276 794	0. 005 531	0. 008 888	0. 000 125	0. 282 786	0. 000 028	0. 282 697	0. 5	9. 06	1. 00	836	916

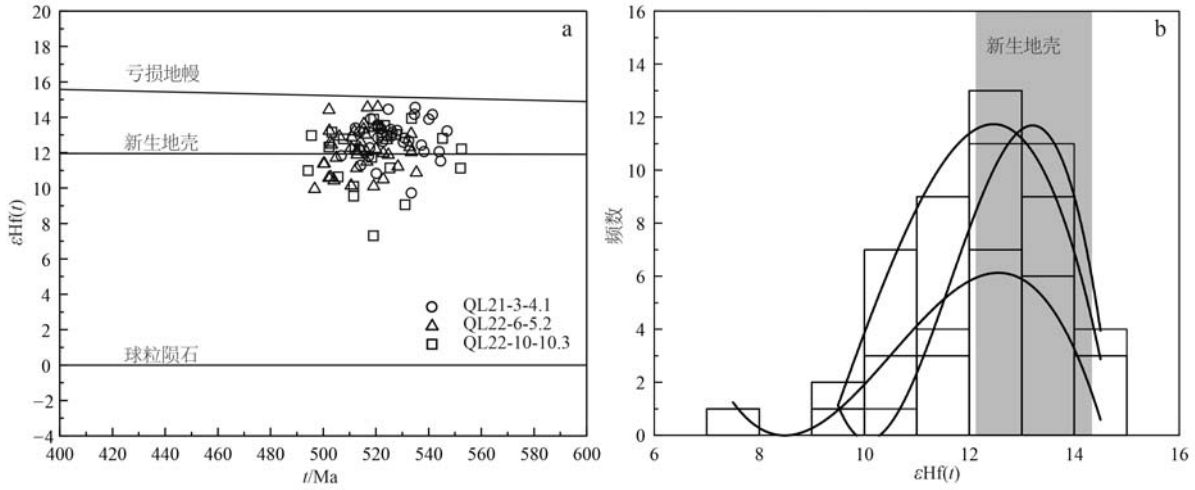

图 4　天水地区斜长花岗岩锆石的 $\varepsilon Hf(t)-t$ 图解(a)和锆石 $\varepsilon Hf(t)$ 值分布柱状图(b)[新生地壳的 $\varepsilon Hf(t)$ 值范围参考 Dhuime 等, 2011]

Fig. 4　Zircon $\varepsilon Hf(t)-t$ diagram (a) and histograms of $\varepsilon Hf(t)$ values (b) for plagiogranite in Tianshui area [the $\varepsilon Hf(t)$ irange for new crust is from Dhuime *et al.*, 2011]

(Ishikawa *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2021)。已有的研究表明辉长岩岩浆在含水条件下的结晶分异和受交代的辉长岩或角闪岩的部分熔融都可形成此类地球化学特征的花岗质岩石(Coleman and Peterman, 1975; Flagler and Spray, 1991; Floyd *et al.*, 1998; Karson *et al.*, 2001; Scarrow *et al.*, 2001; 李武显等, 2003; Grimes *et al.*, 2013; Freund *et al.*, 2014)。受控于元素分配系数的差异,在分离结晶过程中 SiO_2 含量和 La 或 Yb 含量具有明显的正相关性,而在部分熔融过程中则无相关性或呈负相关(Brophy and Pu, 2012)。本文的斜长花岗岩样品具有较低的 La 和 Yb 含量,在 La-SiO_2 图解中 SiO_2 含量和 La 含量具有相关性,显示出部分熔融的趋势,并且此趋势在 Rb-Rb/La 图解中也有体现(图 7a、7b)。将本文的数据同角闪岩、辉长岩、辉绿岩墙和玄武岩在低压条件下(0.5~0.8 GPa)深熔实验的结果相对比(France *et al.*, 2010),辉长岩或角闪岩的部分熔融可能是本次岩浆活动的物质来源(图 8),并且样品的 δEu 负异常和弱 MREE/HREE 分馏趋势也与实验熔体中残留斜长石和角闪石的现象一致,因此,我们推测洋壳辉长岩的深熔作用为西秦岭商丹缝合带斜长花岗岩的成因机制。西秦岭斜长花岗岩的锆石 $\varepsilon Hf(t)$ 的加权平均值在+12.05±0.62 和+12.80±0.39 之间,与产生在现今岛弧的新生地壳的 $\varepsilon Hf(t)$ 值(+12.05±0.62)在误差范围内近一致(Dhuime *et al.*, 2011)(图 4),进一步说明西秦岭斜长花岗岩主要来源于亏损大洋地壳的部分熔融。

通常岛弧岩浆的 Hf 同位素比值小于现今亏损地幔的同位素比值主要是由于少量沉积物的贡献(Dhuime *et al.*, 2011),在岛弧岩浆岩中 U 和 Ba 等不相容元素容易受俯冲流体和沉积物的影响,而 Th 元素反之(Hawkesworth *et al.*, 1997),据此在相关的双变量图解中样品显示出源区受沉积物影响的趋势(图 7c、7d)。近来俯冲沉积物的地球化学和地球物理研究证实部分陆壳物质也会由俯冲隧道转运到地幔中(Scholl and Huene, 2007),而在 Nb/U-Nb 和 Ce/Pb-Ce 图解中大多数样品落在全球俯冲沉积物的平均成分范围内(Su *et al.*, 2017)(图 9a、9b),进一步印证了西秦岭斜长花岗岩的源区具有沉积物的贡献。当然,较高的 $\varepsilon Hf(t)$ 值和较低的 ASI 值(0.80~1.04)揭示沉积物的参与比例非常有限。

除此之外,样品较低的 Sr/Y 值和高的 Y 含量以及平坦的中-重稀土元素配分模式,指示了源区无石榴子石残留的特征,上述特征均反映部分熔融发生在俯冲带较浅部的区域。通常在正常的俯冲背景中,浅部层次的地幔温度通常较低,不足以使俯冲板片发生熔融。然而,在初始俯冲阶段,弧前位置上涌的软流圈地幔和热的俯冲洋壳共同作用则可以在俯冲带较浅部位置使俯冲板片的下部发生部分熔融(Stern and Gerya, 2018; Yang *et al.*, 2021)。因此,我们推测西秦岭商丹缝合带中的斜长花岗岩是在初始俯冲阶段,下洋壳在俯冲带浅部位置部分熔融的

表 4 北秦岭造山带天水地区斜长花岗岩主量元素(w_B/%)和微量元素(w_B/10^{-6})组成

Table 4 Major(w_B/%) and trace (w_B/10^{-6}) elements of Whole-rock of plagiogranite in the Tianshui area

采样位置	106°1′31.23″E,34°11′58.34″N	106°1′31.47″E,34°11′58.66″N			105°23′30.59″E,34°36′46.30″N			106°1′32.11″E,34°11′58.45″N		
样品编号	Q21-3-4.1	QL22-6-5.2	QL22-6-5.2a	QL22-6-5.2b	QL22-6-5.2c	QL22-10-10.3	D1002-4-1.1	D1002-4-1.2	D1002-4-1.4	D1002-4-1.5
SiO_2	68.65	66.32	65.80	69.23	68.19	69.18	69.72	68.49	65.78	66.40
TiO_2	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.27	0.28	0.31	0.29	0.33
Al_2O_3	15.57	16.53	15.11	15.44	15.69	13.58	14.61	15.25	14.93	15.01
Fe_2O_3	0.53	0.87	1.67	0.60	0.76	3.46	1.08	1.00	2.14	1.47
FeO	1.52	1.94	2.64	1.58	1.74	2.30	1.66	1.58	2.84	2.44
MnO	0.14	0.17	0.19	0.13	0.13	0.05	0.11	0.10	0.11	0.15
MgO	2.18	2.31	3.18	2.17	2.32	1.37	2.15	2.16	2.38	3.22
CaO	4.14	4.19	3.68	3.70	3.61	5.43	4.71	4.91	5.60	4.29
Na_2O	4.68	5.02	4.32	4.41	4.56	2.58	4.29	4.48	3.99	4.02
K_2O	1.07	0.76	0.76	1.45	0.98	0.28	0.65	0.62	0.58	0.74
P_2O_5	0.08	0.07	0.12	0.08	0.07	0.04	0.06	0.07	0.08	0.11
LOI	0.89	1.03	1.44	1.00	1.11	0.79	0.75	0.72	0.80	1.37
SUM	99.77	99.50	99.22	100.11	99.47	99.33	100.08	99.68	99.50	99.54
A/CNK	0.95	0.99	1.03	0.99	1.04	0.94	0.90	0.90	0.86	0.99
A/NK	1.76	1.82	1.91	1.75	1.83	2.99	1.88	1.90	2.08	2.03
ASI	0.96	1.00	1.04	1.00	1.04	0.94	0.90	0.90	0.86	1.00
$Mg^{\#}$	66	60	58	65	63	31	59	61	48	60
Li	6.12	7.23	12.00	7.39	9.38	8.63	6.52	6.77	7.58	17.48
Be	0.71	0.84	0.75	0.68	0.70	0.42	0.85	0.88	0.74	0.85
Sc	17.55	16.64	21.85	15.87	15.54	11.06	15.91	17.26	17.17	18.29
V	99.40	82.54	120.45	86.99	84.38	134.89	90.73	96.01	120.98	90.13
Cr	7.98	23.69	17.83	15.77	16.98	41.98	18.60	20.41	20.55	18.66
Co	2.88	5.15	10.20	2.70	4.04	7.05	3.68	3.65	11.59	4.32
Ni	4.46	4.40	6.08	3.95	4.36	6.66	4.32	4.26	5.50	4.57
Cu	1.73	11.23	26.68	3.76	7.31	6.19	3.31	3.50	23.77	11.86
Zn	67.71	74.80	137.98	65.83	75.07	8.76	72.65	66.54	71.17	69.42
Ga	13.46	13.76	14.98	12.82	13.51	12.04	13.68	14.80	16.00	12.86
Rb	14.17	9.71	10.85	18.69	12.75	6.42	8.34	7.68	6.10	10.62
Sr	280.98	148.73	156.54	153.64	205.48	162.70	182.35	196.19	327.90	213.23
Y	17.95	14.59	20.01	13.63	13.71	8.91	16.02	17.02	15.48	16.25
Zr	119.46	104.42	112.95	101.39	105.10	79.32	107.41	120.67	114.41	105.51
Nb	2.53	2.31	2.38	2.26	2.16	0.71	2.16	2.45	2.21	2.50
Sn	2.03	2.13	2.81	1.72	1.54	0.80	2.22	2.18	1.31	1.29
Cs	2.14	1.85	2.84	2.45	1.99	3.56	1.32	1.36	0.88	3.08
Ba	177.17	128.77	116.58	234.67	164.69	75.92	226.15	219.95	136.95	156.40
La	8.73	7.21	9.46	7.30	7.74	3.35	8.66	9.92	15.15	10.34
Ce	26.55	21.47	29.08	22.06	23.20	7.25	27.73	30.31	35.83	26.89
Pr	3.84	3.01	3.95	3.26	3.39	0.95	4.19	4.42	4.44	4.07
Nd	17.13	12.88	16.47	13.98	14.24	4.09	17.91	18.44	17.56	17.76
Sm	3.87	2.88	3.74	3.22	3.39	1.06	3.85	3.93	3.50	3.73
Eu	0.82	0.74	0.83	0.74	0.76	0.50	0.77	0.81	0.81	1.00
Gd	3.09	2.40	3.00	2.51	2.55	1.32	3.02	3.14	2.71	3.15
Tb	0.47	0.39	0.50	0.38	0.40	0.25	0.44	0.46	0.42	0.46
Dy	2.75	2.30	2.99	2.12	2.18	1.35	2.78	2.82	2.60	2.68
Ho	0.64	0.53	0.66	0.48	0.47	0.33	0.57	0.62	0.55	0.58
Er	1.91	1.76	2.19	1.60	1.53	0.95	1.73	1.90	1.64	1.67
Tm	0.32	0.26	0.32	0.24	0.24	0.14	0.29	0.29	0.28	0.28
Yb	2.16	1.95	2.26	1.73	1.76	1.06	2.04	2.11	2.01	2.12
Lu	0.35	0.33	0.37	0.29	0.28	0.18	0.34	0.35	0.33	0.37
Hf	3.07	2.76	3.19	2.68	2.73	1.95	2.85	3.50	3.13	2.98
Ta	0.17	0.18	0.19	0.16	0.15	0.06	0.15	0.17	0.15	0.16
Tl	0.17	0.08	0.09	0.17	0.12	0.03	0.06	0.05	0.05	0.10
Pb	4.51	4.83	4.93	4.28	4.60	1.36	5.80	5.85	6.59	4.76
Th	4.35	3.87	5.21	4.17	4.32	0.60	3.99	4.48	4.17	4.53
U	0.74	0.64	0.90	0.54	0.63	0.33	0.75	0.82	1.09	0.75
Sr/Y	15.65	10.19	7.82	11.27	14.99	18.26	11.38	11.53	21.18	13.13
$(La/Yb)_N$	2.72	2.49	2.82	2.84	2.97	2.13	2.87	3.17	5.08	3.29
Eu/Eu^*	0.73	0.86	0.76	0.80	0.79	1.30	0.69	0.70	0.80	0.89
∑REE	72.63	58.14	75.84	59.91	62.13	22.79	74.32	79.52	87.80	75.10

$Mg^{\#}=Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$(摩尔比); $A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$(摩尔比); $A/CN=Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$(摩尔比); $Eu/Eu^*=(Eu)_N/\sqrt{(Sm)_N*(Gd)_N}$; $ASI=Al_2O_3/((CaO-1.67*P_2O_5)+Na_2O+K_2O)$(摩尔比)。

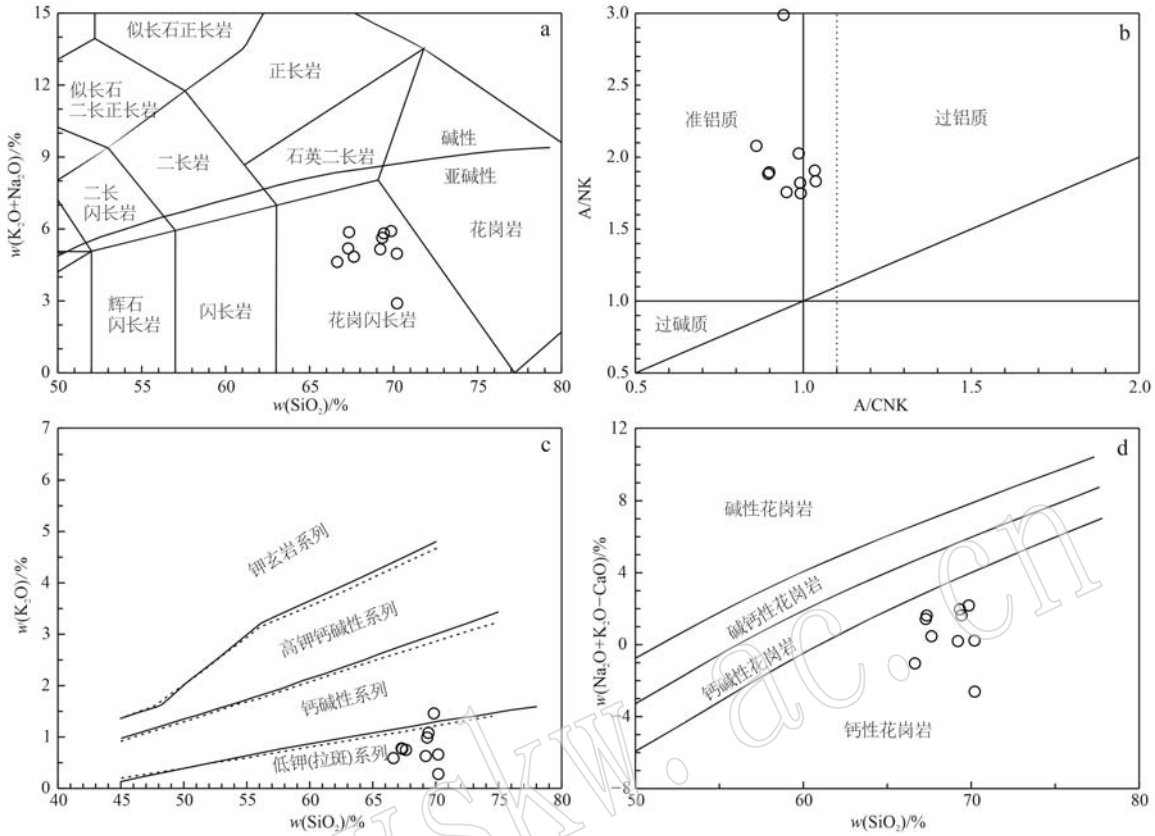

图 5　天水地区斜长花岗岩的全岩地球化学图解

Fig. 5　Whole-rock geochemical diagrams of plagiogranites in Tianshui area

a—侵入岩 TAS 图解(据 Middlemost, 1994)；b—A/NK-A/CNK 图解(据 Maniar and Piccolo, 1989)；c—K_2O-SiO_2 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976；虚线数据来自 Middlemost, 1985)；d—花岗岩 MALi-SiO_2 图解(据 Frost *et al.*, 2001)

a—TAS classification for intrusive rocks(after Middlemost, 1994)；b—A/NK-A/CNK diagram(after Maniar and Piccolo, 1989)；c—K_2O-SiO_2 diagram(after Peccerillo and Taylor, 1976；data of dash lines are from Middlemost, 1985)；d—MALi-SiO_2 diagram for granite (after Frost *et al.*, 2001)

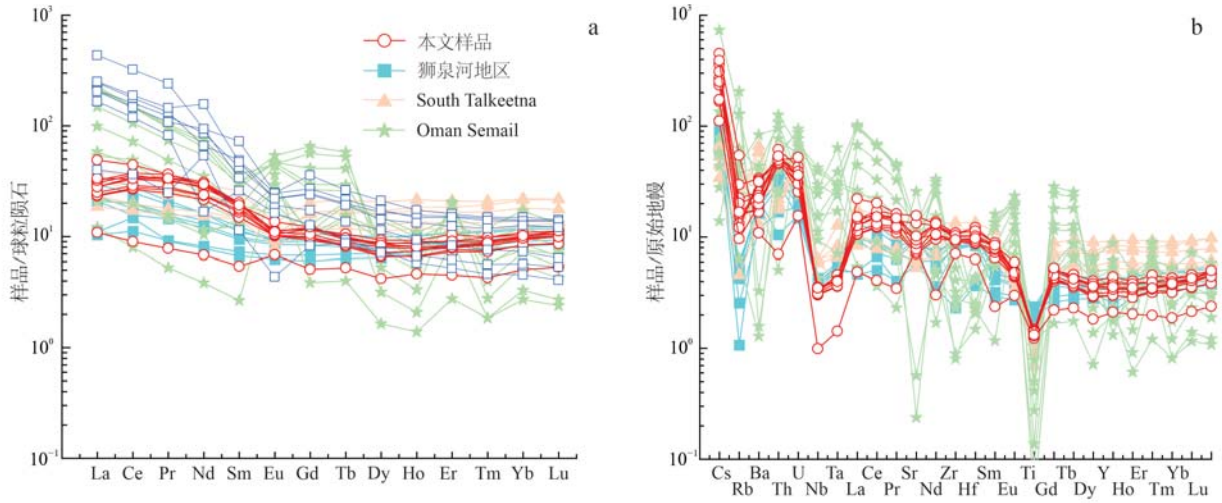

图 6　球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989；参照数据来自 Hosung *et al.*, 2019；Yang *et al.*, 2021；Li *et al.*, 2022)

Fig. 6　Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for plagiogranites(normalization values after Sun and McDonough, 1989; comparable data are from Hosung *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022)

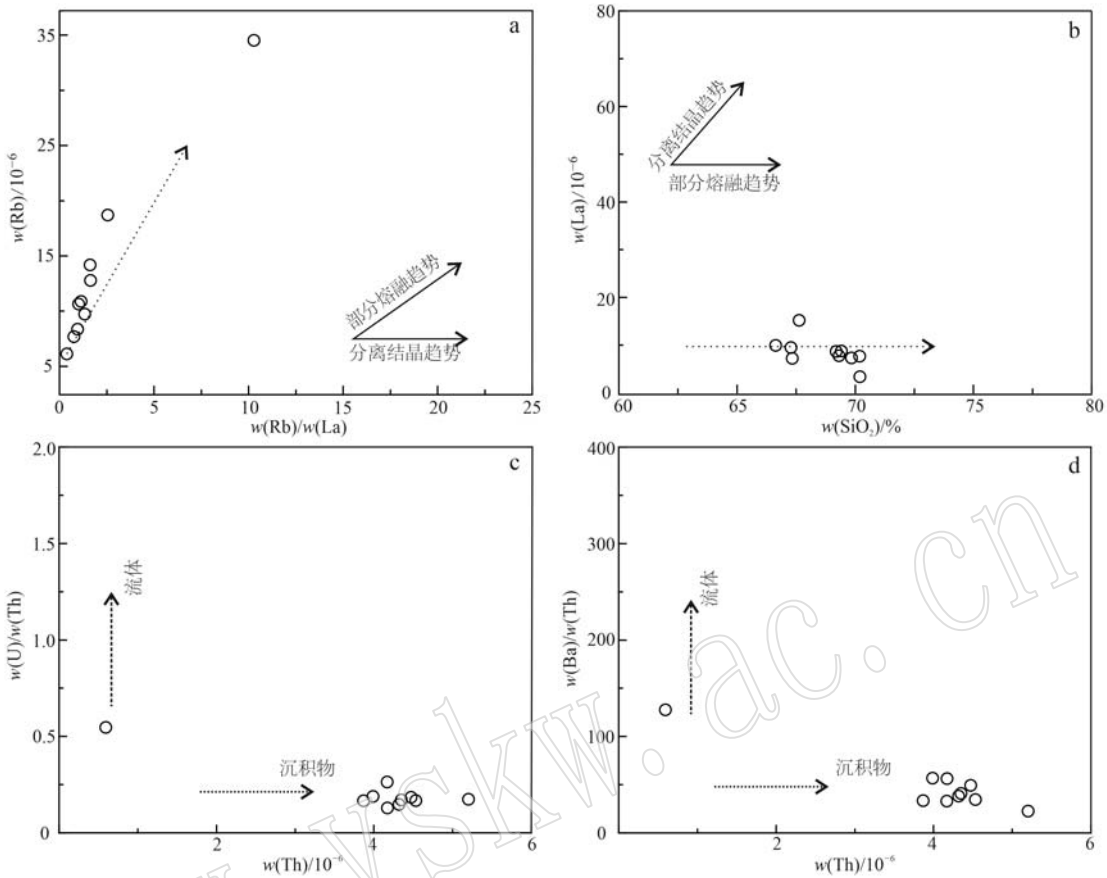

图 7 天水地区斜长花岗岩的 Rb-Rb/La（a，据 Schiano *et al.*，2010）、La-SiO_2（b，据 Brophy，2009）、U/Th-Th（c，据 Hawkesworth *et al.*，1997）和 Ba/Th-Th（d，Hawkesworth *et al.*，1997）图解

Fig. 7 Rb-Rb/La (a, after Schiano *et al.*, 2010), La-SiO_2 (b, after Brophy, 2009), U/Th-Th (c, after Hawkesworth *et al.*, 1997) and Ba/Th-Th (d, after Hawkesworth *et al.*, 1997) diagrams for plagiogranites in Tianshui area

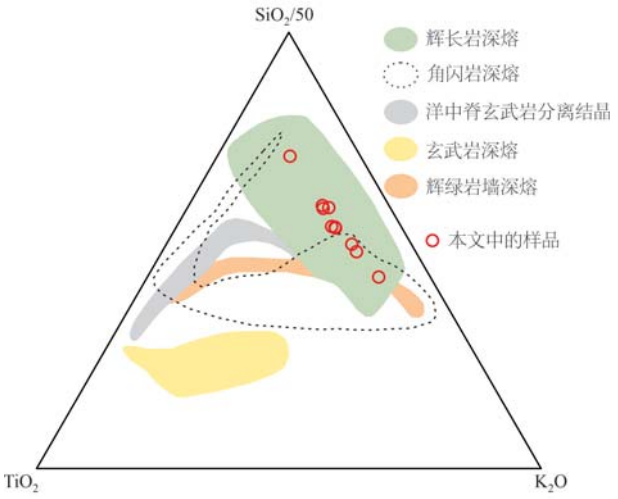

图 8 天水地区斜长花岗岩的 TiO_2-K_2O-SiO_2/50 图解（参照数据源自 France *et al.*，2010）

Fig. 8 TiO_2-K_2O-SiO_2/50 diagram for plagiogranites in Tianshui area (comparable data from France *et al.*, 2010)

产物，同时还受到少量沉积物的影响。将本文的样品与西藏阿里地区、阿拉斯加 Talkeetna 地区和阿曼 Semail 地区产出于弧前环境中的大洋斜长花岗岩进行对比（Hosung *et al.*，2019；Yang *et al.*，2021；Li *et al.*，2022），发现它们均具有相似的地球化学特征。大部分样品均属岛弧环境下未分异的 I 型花岗岩（图 10a、10b），在岩石构造环境判别图解中所有样品均落入岛弧岩浆范围内（图 10c、10d）。在稀土和微量元素组成上，西秦岭斜长花岗岩与阿里地区形成于俯冲洋壳、沉积物和上覆地幔楔共同部分熔融成因的斜长花岗岩以及阿拉斯加地区洋壳中新生辉长岩部分熔融成因的斜长花岗岩近乎一致，而阿曼地区的斜长花岗岩因其复杂的成因显示出较大的成分变化范围（Rollison，2015；Angelo *et al.*，2023）。

5.2 俯冲起始的时代

近年来，对北秦岭造山带早古生代俯冲、增生及碰撞造山作用过程及机制已有大量的研究积累（Wang

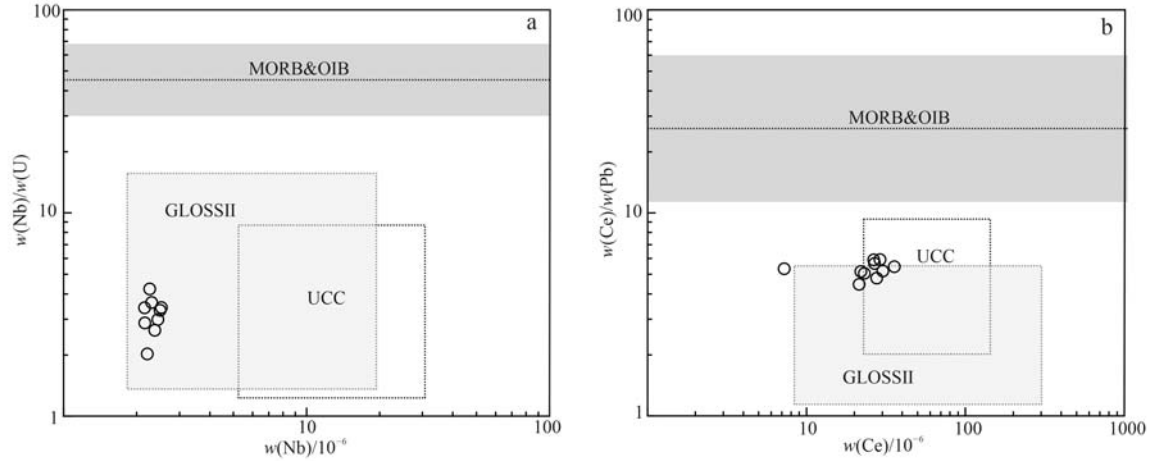

图 9　天水地区斜长花岗岩的 Nb/U-Nb 图解(a)和 Ce/Pb-Ce 图解(b)(据 Su *et al.*, 2017)

Fig. 9　Nb/U-Nb diagram (a) and Ce/Pb-Ce diagram (b) for palgiogranites in Tianshui area (after Su *et al.*, 2017)

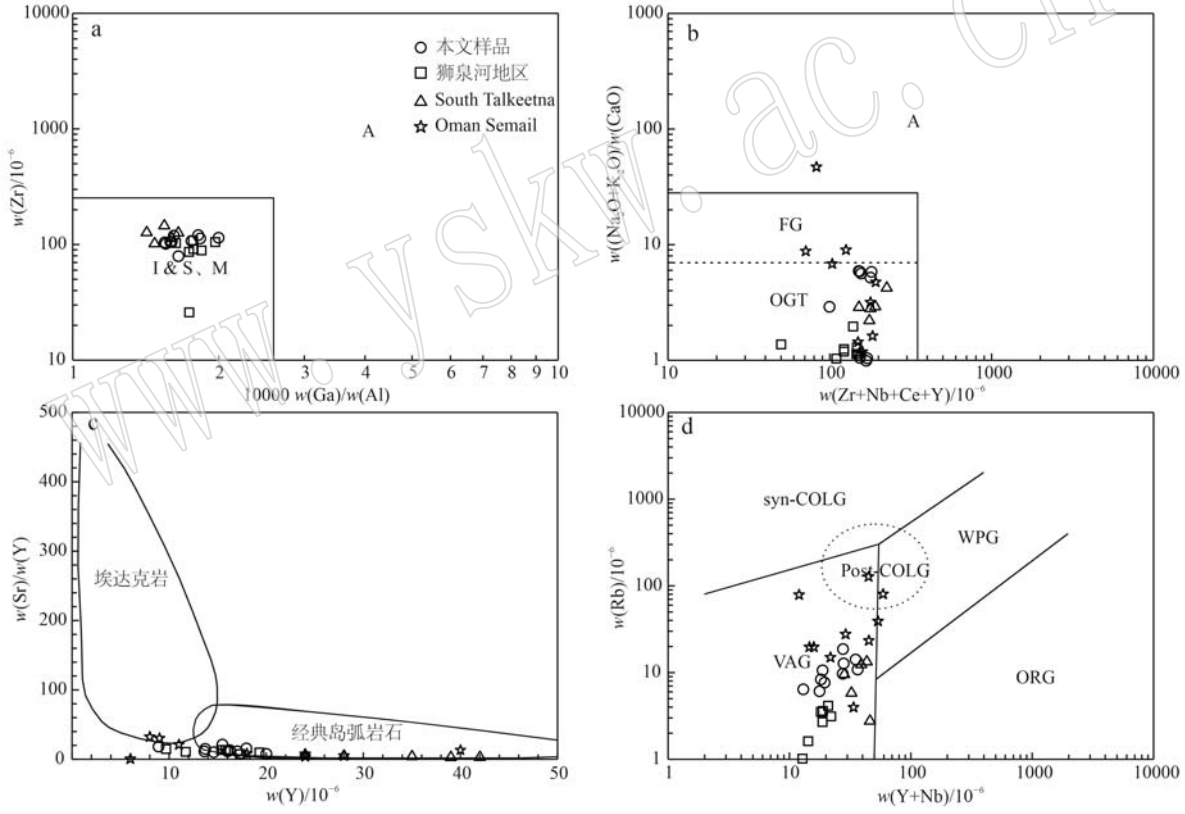

图 10　天水地区斜长花岗岩 Zr-10 000 Ga/Al 图解(a，据 Whalen *et al.*, 1987)、(Na_2O+K_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)图解(b，据 Whalen *et al.*, 1987)、Sr/Y-Y 图解(c，据 Defant and Drummond, 1990)和 Rb-(Y+Nb)图解(d，据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 10　Zr-10 000 Ga/Al (a, after Whalen *et al.*, 1987)、(Na_2O+K_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) (b, after Whalen *et al.*, 1987)、Sr/Y-Y (c, after Defant and Drummond, 1990) and Rb-(Y+Nb) (d, after Pearce *et al.*, 1984) diagrams for plagiogranites in Tianshui area

et al., 2009; Dong *et al.*, 2011a; 张建新等, 2011; Wang *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Liu *et al.*, 2016)，但关于其初始俯冲的时代及其机制仍涉及较少(Li *et al.*, 2015)，并存在争议 (Yang *et al.*, 2018)。

前面的讨论显示，本文所研究的出露于西秦岭

商丹缝合带内的斜长花岗岩为初始俯冲阶段热的洋壳部分熔融的产物,是弧前环境中的大洋斜长花岗岩。3个斜长花岗岩样品分别获得了526±4、515±4和517±6 Ma的锆石U-Pb年龄。对比前人研究结果,本次研究获得的年龄介于关子镇地区的流水沟中基性岩浆杂岩(508±3 Ma)和关子镇蛇绿混杂岩中的层状辉长岩(534±9 Ma)之间,前者被认为是形成于岛弧环境下的一套中基性深成岩浆岩(裴先治等, 2005),后者则具有类似于MORB的地球化学特征,指示其形成于古老的大洋环境中(李王晔等, 2007)。此外,关子镇地区新报道的高镁安山岩也具有相似的年龄(514±6 Ma)(毕志伟等, 2022),这一年龄与北秦岭造山带东段产出于弧前环境中具玻安岩属性的辉长岩(524±1 Ma)(李源等, 2012)也较为一致。综合考虑,这些岩石组合类似于伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)俯冲带早期演化阶段弧前的岩石组合(主要有低钛-钾拉斑玄武岩和玻安岩)。因此,我们认为商丹洋(原特提斯洋)的俯冲起始可能在发生在寒武纪早期(526~524 Ma)。

5.3 大地构造意义

近来众多学者认为中央造山带北部的北昆仑-阿尔金-祁连-北秦岭早古生代造山系是原特提斯构造体系的重要组成部分(Cawood and Buchan, 2007; Stampfli *et al.*, 2013; Zoleikhaei *et al.*, 2021, 张建新等, 2023)。这一造山系在早古生代经多陆块的碰撞,导致了多个以相邻块体命名的原特提斯洋分支洋的闭合(张建新等, 2015, 2023; 吴福元等, 2020)。过去这些分支洋的构造演化总是被单独进行讨论,近来有学者通过南阿尔金地区初始俯冲的研究工作,认为原特提斯洋的初始俯冲自西向东具有穿时的特征(Yao *et al.*, 2021),而本文中的大洋斜长花岗岩与地区中的弧前岩石组合共同指示,北秦岭造山带西段的初始俯冲与南阿尔金和北祁连地区的初始俯冲的时代是近一致的(Xia *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013; Yao *et al.*, 2021; 张建新等, 2023)。假若如此,沿中央造山带走向数千公里规模,原特提斯洋的俯冲起始时间几乎近同时,即发生在早-中寒武世,没有显示出明显的穿时性特征。这种初始俯冲的规模类似于新生代IBM俯冲带(Ishizuka *et al.*, 2011)。

6 结论

(1) 西秦岭商丹缝合带的斜长花岗岩具有较低的K_2O和TiO_2含量,以及轻稀土元素稍富集、重稀土元素平坦和富集大离子亲石元素(LILE)、亏损高场强元素(HFSE)的特征,微量元素原始地幔标准化蛛网图中显示Nb、Ta、Ti的明显负异常,Sr/Y值较低,$\varepsilon Hf(t)$值较高(在+12.05至+12.80之间),推测西秦岭斜长花岗岩形成于商丹洋初始俯冲阶段,为俯冲带浅部大洋地壳的部分熔融的产物。

(2) 3个斜长花岗岩的岩浆结晶年龄分别为526±4、515±4和517±6 Ma,揭示商丹洋(原特提斯洋)的俯冲起始可能发生在早寒武世。

(3) 北秦岭造山带俯冲起始的时代与中央造山带西段的南阿尔金和北祁连近一致,没有显示出明显的穿时性特征。沿中央造山带,早寒武世原特提斯洋初始俯冲的规模类似于新生代IBM俯冲带。

References

Angelo T V, Spencer C J, Cavosie A J, *et al*. 2023. Petrogenesis of mantle-hosted hranitoids from the Samail ophiolite[J]. Journal of Petrology, 64(5): egad021.

Bi Zhiwei, Wu Jixiu, Zhang Yaguang, *et al*. 2022. Early Cambrian subduction of the Shangdan Ocean: New evidence from the Gupo high-Mg andesite in the Guanzi Town ophiolite mélanges, Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 41(5): 423~431(in Chinese with English abstract).

Brophy J G. 2009. La-SiO_2 and Yb-SiO_2 systematics in mid-ocean ridge magmas: Implications for the origin of oceanic plagiogranite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 158(1): 99~111.

Brophy J G and Pu X F. 2012. Rare earth element-SiO_2 systematics of mid-ocean ridge plagiogranites and host gabbros from the Fournier oceanic fragment, New Brunswick, Canada: A field evaluation of some model predictions[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 164(2): 191~204.

Cawood P A and Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly[J]. Earth-Science Reviews, 82(3~4): 217~256.

Chen Junlu, Li Haobin, Wang Hongliang, *et al*. 2007. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the Junction area between the Qinling and Qilian Orogenic belts and its tectonic significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(3): 423~431(in Chinese with English abstract).

Coleman R G and Peterman Z E. 1975. Oceanic plagiogranite[J]. Jour-

nal of Geophysical Research, 80(8): 1 099~1 108.

Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 347(6294): 662~665.

Dhuime B, Hawkesworth C and Cawood P. 2011. When continents formed[J]. Science, 331(6014): 154~155.

Dong J, Wei C J and Song S G. 2021. Deep subduction and exhumation of micro-continents in the Proto-Tethys realm: Evidence from metamorphism of HP-UHT rocks in the North Qinling Orogen, central China[J]. Gondwana Research, 104: 215~235.

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

Dong Yunpeng, Yang Zhao, Zhang Guowei, *et al*. 2008. Geochemistry of the ophiolite in the Guanzizhen area, West Qinling and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 82(9): 1 186~1 194(in Chinese with English abstract).

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

Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, *et al*. 2011b. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(3): 213~237.

Flagler P A and Spray J G. 1991. Generation of plagiogranite by amphibolite anatexis in oceanic shear zones[J]. Geology, 19(1): 70~73.

Floyd P A, Yaliniz M K and Goncuoglu M C. 1998. Geochemistry and petrogenesis of intrusive and extrusive ophiolitic plagiogranites, Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey[J]. Lithos, 42(3): 225~241.

France L, Koepke J, Ildefonse B, *et al*. 2010. Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: Experimental and natural observations[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(5): 683~704.

Freund S, Haase K M, Keith M, *et al*. 2014. Constraints on the formation of geochemically variable plagiogranite intrusions in the Troodos Ophiolite, Cyprus[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(2): 978.

Frost B R. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 42(11): 2 033~2 048.

Fu Changlei, Yan Zhen and Wang Bingzhang. 2019. Discussion on the age and tectonic affinity of the mafic rocks in Qingshui-Zhangjiachuan of the conjunction area between the Qinling and Qilian orogenic belts[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(10): 3 141~3 160(in Chinese with English abstract).

Grimes C B, Ushikubo T, Kozdon R, *et al*. 2013. Perspectives on the origin of plagiogranite in ophiolites from oxygen isotopes in zircon[J]. Lithos, 179: 48~66.

Guo Qi, Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, *et al*. 2022. Granulite-facies metamorphism in the northern part of West Qinling: Constraints from phase equilibrium modeling and in-situ U-Pb dating of monazite[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(11): 3 259~3 280(in Chinese with English abstract).

Guo Q, Mao X H, Zhang J X, *et al*. 2023. Paleozoic Tectonothermal evolution in the west Qinling Orogen, Central China: Petrological and chronological evidence from garnet amphibolites[J]. Minerals, 13(9): 1 183.

Gurnis M, Hall C and Lavier L. 2004. Evolving force balance during incipient subduction[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 5: Q07001.

Haase K M, Freund S, Beier C, *et al*. 2016. Constraints on the magmatic evolution of the oceanic crust from plagiogranite intrusions in the Oman ophiolite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 171(5): 46.

Hacker B R, Abers G A and Peacock S M. 2003a. Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H_2O contents[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 108(B1): 2 029.

Hacker B R, Peacock S M, Abers G A, *et al*. 2003b. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B1): 2 030.

Hawkesworth C, Turner S, Peate D, *et al*. 1997. Elemental U and Th variations in island arc rocks: Implications for U-series isotopes[J]. Chemical Geology, 139(1~4): 207~221.

He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al*. 2007. Geochemical characteristics and tectonic environment of Hongtubu basalts and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(4): 295~309(in Chinese with English abstract).

Hosung J, Sotirios K and Stylianos T. 2019. Recycled oceanic crust as a source for tonalite intrusions in the mantle section of the Khor Fakkan block, Semail ophiolite(UAE)[J]. Geoscience Frontiers, 10(3): 1 187~1 210.

Hu Bo. 2005. Geochemical Characteristics of the Early Palaeozoic Metavolcanic Rocks from Qingshui-Zhangjiachuan in the Tianshui Area,

Gansu, and Their Tectonic Significance (Master Degree Thesis)[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).

Ishikawa T, Fujisawa S, Nagaishi K, *et al*. 2005. Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 240(2): 355~377.

Ishizuka O, Tani K, Reagan M K, *et al*. 2011. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc[J]. Earth Planet science letters, 306(3~4): 229~240.

Joun H, Kokkalas S and Tombros S. 2019. Recycled oceanic crust as a source for tonalite intrusions in the mantle section of the Khor Fakkan block, Semail ophiolite (UAE)[J]. Geoscience Frontiers, 10: 1 187~1 210.

Karson J A, Klein E M, Hurst S D, *et al*. 2001. Structure of uppermost fast-spread oceanic crust exposed at the Hess Deep Rift: Implications for subaxial processes at the East Pacific Rise[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 3(1): GC000155.

Li H, Wang M, Zeng X W, *et al*. 2022. Partial melting caused by subduction of young, hot oceanic crust in shallow high-temperature and low-pressure environments: Indications from Middle and Late Jurassic oceanic plagiogranite in Shiquanhe, Central Tibet[J]. Lithos, 420~421: 106698.

Li Wangye. 2008. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolites and Island-Arc-Type Igneous Rocks in The Western Qinling Orogen and the Eastern Kunlun Orogen: Implication for the Evolution of the Tethyan Ocean (Ph. D. Dissertation)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China (in Chinese with English abstract).

Li Wangye, Li Shuguang, Pei Xianzhi, *et al*. 2007. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb ages of the Guanzizhen ophiolite complex, the Western Qinling orogen, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2 836~2 844 (in Chinese with English abstract).

Li Wuxian and Li Xianhua. 2003. Rock types and tectonic significance of the granitoids rocks within ophiolites[J]. Advance in Earth Sciences, 18(3): 392~397 (in Chinese with English abstract).

Li Y, Yang J S, Dilek Y, *et al*. 2015. Crustal architecture of the Shangdan suture zone in the early Paleozoic Qinling orogenic belt, China: Record of subduction initiation and backarc basin development[J]. Gondwana Research, 27(2): 733~744.

Li Yuan, Yang Jingsui, Pei Xianzhi, *et al*. 2012. A model for multistage of the Early Palaeozoic Danfeng ophiolite in Qinling orogen belt: From arc to inter-arc basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1 896~1 914 (in Chinese with English abstract).

Liu L, Liao X Y, Wang Y W, *et al*. 2016. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation[J]. Earth-Science Reviews, 159: 58~81.

Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, *et al*. 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 165~173 (in Chinese with English abstract).

Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, *et al*. 2003. Meso-Neoproterozoic Geological Evolution in the Qinling Orogeny and Its Response to the Super Continental Events of Rodinia[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Lu Songnian, Yu Haifeng, Li Huaikun, *et al*. 2006. Early Paleozoic suture zones and tectonic divisions in the "Central China Orogen"[J]. Geological Bulletin of China, 25(12): 1 368~1 380 (in Chinese with English abstract).

Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.

Mao X H, Zhang J X, Yu S Y, *et al*. 2017. Early Paleozoic granulite-facies metamorphism and anatexis in the northern West Qinling orogen: Monazite and zircon U-Pb geochronological constraints[J]. Science China-Earth Sciences, 60(5): 943~957.

Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al*. 2018. Metamorphism of Qinling complex in Northern West Qinling Orogen: Petrology, phase equilibria modelling of paragneiss and their geological implication[J]. Earth Science, 43(1): 278~295 (in Chinese with English abstract).

Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 323(3~4): 183~196.

Middlemost E A K. 1985. Magmas and Magmatic Rocks[M]. London: Longman.

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

Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al*. 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11: Q0AA06.

Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Jourrnal of Petrology, 25(4): 956~983.

Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline

volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63~81.

Pei Xianzhi, Ding Saping, Hu Bo, *et al*. 2004. Definition of the Guanzizhen ophiolite in Tianshui area, western Qinling, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 23(12): 1 202~1 208(in Chinese with English abstract).

Pei X Z, Ding S P, Zhang G W, *et al*. 2007. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua basic igneous complexes in Tianshui area of West Qinling[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(S2): 264~276.

Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, *et al*. 2007. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating of Neoproterozoic granitoid gneisses in the north margin of West Qinling and geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 81(6): 772~786(in Chinese with English abstract).

Pei Xianzhi, Li Yong, Lu Songnian, *et al*. 2005. Zircons U-Pb ages of the Guanzizhen intermediate-basic igneous complex in Tianshui area, West Qinling, and their geological significance[J]. Regional Geology of China, 24(1): 23~29(in Chinese with English abstract).

Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, *et al*. 2012. LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from the meta-detrital rocks of the Early Palaeozoic Huluhe Group in eastern part of Qilian orogenic belt: Constraints of material source and sedimentary age[J]. Earth Science Frontiers, 19(5): 205~224(in Chinese with English abstract).

Rollinson H. 2009. New models for the genesis of plagiogranites in the Oman ophiolite[J]. Lithos, 112(3~4): 603~614.

Rollinson H. 2015. Slab and sediment melting during subduction initiation: Granitoid dykes from the mantle section of the Oman ophiolite [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170(3): 32.

Scarrow J H, Pease V, Fleutelot C, *et al*. 2001. The late Neoproterozoic Enganepe ophiolite, Polar Urals, Russia: An extension of the Cadomian arc? [J]. Precambrian Research, 110(1): 255~275.

Schiano P, Monzier M, Eissen J P, *et al*. 2010. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(2): 297~312.

Scholl D W and Huene R V. 2007. Crustal recycling at modern subduction zones applied to the past—Issues of growth and preservation of continental basement crust, mantle geochemistry, and supercontinent reconstruction[J]. Memoir of the Geological Society of America, 200(7): 9~32.

Song S G, Niu Y L, Su L, *et al*. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 23(4): 1 378~1 401.

Stampfli G M, Hochard C, Vérard C, *et al*. 2013. The formation of Pangea[J]. Tectonophysics, 593: 1~19.

Stern R J. 2004. Subduction initiation: spontaneous and induced[J]. Earth Planet science letters, 226(3~4): 275~292.

Stern R J and Gerya T. 2018. Subduction initiation in nature and models: A review[J]. Tectonophysics, 746: 173~198.

Stern R J, Reagan M, Ishizuka O, *et al*. 2012. To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites[J]. Lithosphere, 4(6): 469~483.

Su H M, Jiang S Y, Zhang D Y, *et al*. 2017. Partial melting of subducted sediments produced Early Mesozoic calc-alkaline lamprophyres from northern Guangxi Province, South China[J]. Scientific Reports, 7: 4 864.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Sanders A D and Norry M J. Magmatism in Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.

Wang Jing, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, *et al*. 2008. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling Orogenic belt and its tectonic implication[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 33(4): 474~486(in Chinese with English abstract).

Wang T, Wang X X, Tian W, *et al*. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(9): 1 359~1 384.

Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2015. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution [J]. Science China: Earth Sciences, 58: 1 497~1 512.

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

Whitney D L and Evans B W. 2009. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. American Mineralogist, 95(1): 185~187.

Wu Fuyuan, Wang Bo, Zhao Liang, *et al*. 2020. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1 627~1 674(in Chinese with English abstract).

Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al*. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 234(1~2): 105~126.

Wu Y B and Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. Gondwana Research, 23(4): 1 402~1 428.

Xia X, Song S and Niu Y. 2012. Tholeiite-Boninite terrane in the North Qilian suture zone: Implications for subduction initiation and back-arc basin development[J]. Chemical Geology, 328(SI): 259~277.

Xue F, Lerch M F, KröNer A, *et al*. 1996. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A review and new tectonic model[J]. Tectonophysics, 253(3~4): 271~284.

Yan Quanren, Wang Zongqi, Chen Junlu, *et al*. 2007. Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou Groups: Implications for the North Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 81(4): 488~500(in Chinese with English abstract).

Yang J H, Wang H, Chung S L, *et al*. 2021. Initial subduction-related magmatism in southern Alaska identified by geochemistry and zircon Hf-O isotopes[J]. Science Bulletin, 66(10): 1 030~1 036.

Yang L M, Song S G, Allen M B, *et al*. 2018. Oceanic accretionary belt in the West Qinling Orogen: Links between the Qinling and Qilian orogens, China[J]. Gondwana Research, 64: 137~162.

Yao J L, Cawood P A, Zhao G C, *et al*. 2021. Mariana-type ophiolites constrain the establishment of modern plate tectonic regime during Gondwana assembly[J]. Nature Communications, 12(1): 4 189.

Zhang C L, Liu L, Wang T, *et al*. 2013. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in North Qinling[J]. Chinese Science Bulletin, 58(35): 4 405~4 410.

Zhang Guowei, Zhang Zongqing and Dong Yunpeng. 1995. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 101~114(in Chinese with English abstract).

Zhang H F, Zhang B R, Harris N, *et al*. 2006. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27(6): 751~764.

Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Meng Fancong. 2011. Ployphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1 179~1 190(in Chinese with English abstract).

Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Yunshuai, *et al*. 2015. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3 531~3 554(in Chinese with English abstract).

Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Yunshuai, *et al*. 2023. Proto-Tethys orogenic system in the northern Qinghai-Tibet Plateau: Resubdivision of lithotectonic units in Qilian-North Qaidam and discussion on several controversial scientific issues[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(12): 3 507~3 532(in Chinese with English abstract).

Zhang Y Y, Sun M, Yin J Y, *et al*. 2022. Subduction initiation of the western Paleo-Asian Ocean linked to global tectonic reorganization: Insights from Cambrian island-arc magmatism within the West Junggar, NW China[J]. Geological Society of America Bulletin, 134(11~12): 3 099~3 112.

Zhang Zhiguo, Chen Junlu, Xu Xueyi, *et al*. 2011. Geochronology and geochemistry of the Neo-Proterozoic amphibolites in the Muqitan Formation: Implications for the tectonic evolution of the North Qinling Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 757~769(in Chinese with English abstract).

Zhou X and Wada I. 2021. Differentiating induced versus spontaneous subduction initiation using thermomechanical models and metamorphic soles[J]. Nature Communications, 12(1): 4 632.

Zhu M S, Yan Z Y, Pastor-Galan D, *et al*. 2023. Do microcontinents nucleate subduction initiation?[J]. Geology, 51(7): 668~672.

Zoleikhaei Y, Mulder J A and Cawood P A. 2021. Integrated detrital rutile and zircon provenance reveals multiple sources for Cambrian sandstones in North Gondwana[J]. Earth-Science Reviews, 213: 103462.

附中文参考文献

毕志伟, 吴纪修, 张亚光, 等. 2022. 商丹洋早寒武纪俯冲作用——来自甘肃关子镇蛇绿混杂岩古坡高镁安山岩的证据[J]. 地质通报, 41(5): 740~753.

陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 等. 2007. 秦祁结合部位王家岔石英闪长岩体锆石 LA-ICPMS 定年及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 423~431.

董云鹏, 杨 钊, 张国伟, 等. 2008. 西秦岭关子镇蛇绿岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地质学报, 82(9): 1 186~1 194.

付长垒, 闫 臻, 王秉璋. 2019. 秦祁结合部清水-张家川基性岩形成时代和构造归属探讨[J]. 岩石学报, 35(10): 3 141~3 160.

郭 祺, 毛小红, 张建新, 等. 2022. 西秦岭北缘秦岭杂岩麻粒岩相变质作用:来自相平衡模拟和独居石原位 U-Pb 定年的制约[J]. 岩石学报, 38(11): 3 259~3 280.

何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 2007. 北祁连东段红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 26(4): 295~309.

胡 波. 2005. 甘肃天水地区清水—张家川早古生代变质火山岩岩石地球化学特征及其构造意义(硕士学位论文)[D]. 西安: 长

安大学.

李王晔. 2008. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究——对特提斯洋演化的制约(博士学位论文)[D]. 合肥：中国科学技术大学.

李王晔, 李曙光, 裴先治, 等. 2007. 西秦岭关子镇蛇绿混杂岩的地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 23(11)：2 836~2 844.

李武显, 李献华. 2003. 蛇绿岩中的花岗质岩石成因类型与构造意义[J]. 地球科学进展, 18(3)：392~397.

李　源, 杨经绥, 裴先治, 等. 2012. 秦岭造山带早古生代蛇绿岩的多阶段演化:从岛弧到弧间盆地[J]. 岩石学报, 28(6)：1 896~1 914.

陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. 地质学报, 79(2)：165~173.

陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 2003. 秦岭中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京：地质出版社.

陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. 2006. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述[J]. 地质通报, 25(12)：1 368~1 380.

毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2018. 西秦岭北缘秦岭杂岩变质作用：副片麻岩岩石学、相平衡模拟及其地质意义[J]. 地球科学, 43(1)：278~295.

裴先治, 丁仨平, 胡　波, 等. 2004. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 23(12)：1 202~1 208.

裴先治, 丁仨平, 张国伟, 等. 2007. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 81(6)：772~786.

裴先治, 李　勇, 陆松年, 等. 2005. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 24(1)：23~29.

裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 等. 2012. 祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄：源区特征和沉积时代的限定[J]. 地学前缘, 19(5)：205~224.

裴先治, 刘会彬, 丁仨平, 等. 2006. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 30(2)：193~205.

王　婧, 张宏飞, 徐旺春, 等. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学, 33(4)：474~486.

吴福元, 万　博, 赵　亮, 等. 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6)：1 627~1 674.

闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 2007. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束,SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质学报, 81(4)：488~500.

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

张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合：阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生\碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 31(12)：3 531~3 554.

张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 2023. 青藏高原北部原特提斯造山系：祁连-柴北缘岩石构造单元再划分及几个争议科学问题讨论[J]. 岩石学报, 39(12)：3 507~3 532.

张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 2011. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用[J]. 岩石学报, 27(4)：1 179~1 190.

张志国, 陈隽璐, 徐学义, 等. 2011. 木其滩岩组形成时代,地球化学特征——对北秦岭构造演化的制约[J]. 岩石学报, 27(3)：757~769.