

造山带岩浆作用的强度和旋回性:以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例^{*}

马昌前¹ 熊富浩² 尹烁¹ 王连训¹ 高珂¹

MA ChangQian¹, XIONG FuHao², YIN Shuo¹, WANG LiangXun¹ and GAO Ke¹

1. 中国地质大学地球科学学院,地质过程与矿产资源国家重点实验室,武汉 430074

2. 成都理工大学地球科学学院,成都 610059

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2015-09-09 收稿, 2015-11-09 改回.

Ma CQ, Xiong FH, Yin S, Wang LX and Gao K. 2015. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (12): 3555 – 3568

Abstract Voluminous magmatism is commonly occurred in continental collision orogenic belt. The magma flux, magma addition rate and magma cyclicity are recent focuses of increasing interests on the global studies of magma dynamic in orogens. The Eastern Kunlun Orogen, located in northern Qinghai-Tibetan Plateau, provides an ideal place for such studies, since Late Permian to Early Triassic magmatism (mainly 270 ~ 200Ma) related to Paleo-Tethys tectonic evolution is widespread. In this work, we present a case study of the Xiangride granitoid batholith which is typical for the Eastern Kunlun Orogen magmatism. The Xiangride batholith consists of variable rock types, including quartz-diorite, monzogranite and granodiorite, with an intrusive period from 258Ma to 218Ma. Based on detailed field investigation, petrological and geochronological studies, we conduct theoretical calculations on the magma flux and magma addition rate of this complex. Our results suggest that obvious magma cyclicity exist in terms of the magma addition rate in Xiangride complex, that is, the magma addition rate of the Early Triassic quartz diorite is the lowest, followed by the Middle Triassic monzogranite, and the Late Triassic granodiorite exhibits the highest. Given a thickness of 2.5km for the Xiangride batholith, we obtained magma addition rates for Early, Middle and Late Triassic magmatism varying from 33, 50 to 99km³/m. y., respectively. Combined with the clearly high $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of Late Triassic magmatic rocks, we propose that the large abundance of Late Triassic skarn iron ore deposits in Eastern Kunlun Orogen are more likely genetically related to a granitoid magmatic flare-up as a result of contemporaneous depleted mantle-derived magma underplating and magma mixing in this region.

Key words Qinghai-Tibetan Plateau; Paleo-Tethys; Granitoid rocks; Mineralization

摘要 大陆造山带的重要特征之一是常常发育强烈的岩浆活动。如何刻画造山带古岩浆作用的强度? 岩浆从深部添加到中上地壳的速率有多大? 岩浆活动强弱的变化规律如何? 这些都是近年来国际上有关岩浆动力学的新的研究主题。位于青藏高原北部的东昆仑造山带岩浆活动强烈, 尤其发育与古特提斯构造演化相关的晚二叠世-晚三叠世岩浆活动(年龄主要介于270~200Ma之间)。发育于东昆仑东段的香日德复式花岗岩类岩基, 主要由早、中、晚三叠世的石英闪长岩、二长花岗岩和花岗闪长岩等多种岩性单元构成, 岩石类型多, 时间跨度大(258~218Ma), 是造山带岩浆活动的缩影。本文以香日德岩基为例, 在深入的野外地质、岩石学和年代学研究基础上, 结合各岩性单元的出露面积、U-Pb 锆石年龄和假定的岩体厚度, 对岩浆的体积添加速率(岩浆通量)进行了估算, 发现从早到晚, 该岩基的岩浆体积添加速率存在着旋回性的变化特征。其中, 早三叠世石英闪长岩的岩浆体积添加速率最低, 而晚三叠世花岗闪长岩的岩浆体积添加速率则最高, 中三叠世介于其间。以

* 本文受国家自然科学基金项目(41272079)和中国地质调查局项目(12120114057501)联合资助。

第一作者简介: 马昌前, 男, 1958年生, 教授, 岩石学和地球化学专业, 主要从事岩石学和岩浆动力学的教学与研究工作, E-mail: cqma@cug.edu.cn

2.5km 的岩体厚度计算得到的岩浆体积添加速率分别是,早三叠世峰期的添加速率约 $33\text{km}^3/\text{m. y.}$, 中三叠世峰期添加速率约 $50\text{km}^3/\text{m. y.}$, 而晚三叠世的峰期添加速率达到了 $99\text{km}^3/\text{m. y.}$ 。研究表明,从 230Ma 开始,东昆仑地区晚三叠世时期 Hf 同位素初始比值显著增大,并出现了大规模的铁多金属成矿作用。因此,晚三叠世时期该区强烈的 Fe 多金属成矿大爆发是在亏损地幔岩浆底侵影响下,发生大规模的花岗岩类岩浆活动和壳幔岩浆活动的结果。

关键词 青藏高原;古特提斯;花岗岩类岩石;成矿作用

中图法分类号 P588.11

1 引言

造山带岩浆作用是大陆地壳生长和分异的重要机制,常常形成大型花岗质岩基,记录了大陆动力学过程中物质的运动与能量的转化,表征了造山带大陆动力学的过程(曾令森等, 2006; Castro *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)。因此,大的花岗岩基是揭示造山带的物质组成、形成演化和动力学过程的窗口。最近 40 多年来的研究表明,造山带岩浆作用并不是均衡发展的,而是有强有弱。造山带的大型侵入体都可能是由数次甚至数十次的岩浆脉动渐进添加生长而成的(Pitcher and Berger, 1972; Hutton, 1982, 1992; Lagarde *et al.*, 1990; Paterson and Vernon, 1995; McNulty *et al.*, 1996; Vigneresse and Bouchez, 1997; Paterson and Miller, 1998; Wiebe and Collins, 1998; Johnson *et al.*, 1999; Miller and Paterson, 2001)。随着造山带地质填图的展开,尤其是锆石 U-Pb 年代学方法的广泛应用,越来越认识到侵入岩体内部组成和结构的复杂性,不仅形成时代表现出阶段性和旋回性,而且不同阶段壳幔物质的贡献也不相同(Gehrels *et al.*, 2009; Holland *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2013; Clausen *et al.*, 2014; Xiong *et al.*, 2014)。在以往的研究中,往往根据一个地区的同位素测年结果来反映不同阶段岩浆作用的强弱,也就是用年龄直方图来体现。然而,年代学资料可以反映岩浆作用的时限,但并不能真正反映岩浆活动的强度。近年来,国外学者引入了岩浆通量(Magmatic flux)或岩浆添加速率(magma addition rate)的概念(Paterson and Ducea, 2015),试图用这样的岩浆动力学参数来描述古岩浆作用的强度。对剥露的造山带,可以在估算岩浆添加速率的基础上,解剖大岩基的形成过程,深入分析大陆地壳生长和再循环的机制(Ducea, 2001; Paterson and Ducea, 2015)。对火山系统,则是通过计算岩浆喷发速率(magma eruption rate)(de Silva *et al.*, 2015),作为火山系统周期性的预测工具(Gamble *et al.*, 2003; Hora *et al.*, 2007),以推断火山下面的岩浆房的行为(Bacon and Lanphere, 2006; Scandone *et al.*, 2007)。

东昆仑造山带是青藏高原北部的巨型岩浆岩带,尤以晚古生代-早中生代古特提斯造山阶段花岗岩最为发育。巨型花岗岩带的出露为研究造山带花岗岩基的形成和陆壳生长演化机制提供了理想的天然实验室。研究表明,东昆仑造山带晚古生代-早中生代花岗岩浆活动起始于晚二叠世

(~262Ma),一直持续至晚三叠世-早侏罗世(ca. 200 ~ 185Ma)。然而,有关该期花岗岩形成的构造背景及其深部过程一直存在争议。有关构造环境的主要观点包括:①东昆仑古特提斯洋盆于晚二叠世闭合(袁万明等, 2000; 刘成东等, 2002; 罗照华等, 2002; 李荣社等, 2008; 陈守建等, 2010),三叠纪花岗岩为碰撞-碰撞后环境产物;②早三叠世时期东昆仑处于活动大陆边缘环境,但到中晚三叠世时阿尼玛卿洋盆就已经闭合(杨经绥等, 2005; 朱迎堂等, 2009; 李瑞保等, 2012; 马昌前等, 2013),晚二叠世-早三叠世花岗岩形成于洋壳俯冲环境,晚三叠世花岗岩形成于碰撞-碰撞后环境;③洋盆于晚三叠世仍未闭合,古特提斯洋壳持续俯冲,三叠纪岩浆作用均与洋壳俯冲有关(Liu, 2005; Yuan *et al.*, 2009)。厘定岩浆作用的峰期和强度,对阐明岩浆作用的旋回性和壳幔相互作用机理,进而深入认识岩浆作用的构造背景,具有重要意义。本文以东昆仑香日德三叠纪花岗岩岩基为例,通过岩浆通量的估算,厘定造山带出现岩浆潮(magmatic surges)或岩浆大爆发(magmatic flare-ups)的时间,进而讨论与古特提斯构造演化相关的岩浆活动过程。

2 区域地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北部,是青藏高原的重要组成部分(图 1),该造山带向东与秦岭造山带相连,向西则以阿尔金断裂与西昆仑相隔,北面与柴达木盆地相邻,南面则以昆南断裂与巴颜喀拉-松潘甘孜地体隔开(许志琴等, 2007, 2013; Xu *et al.*, 2015)。东昆仑造山带与秦岭和大别造山带构成了中国中央造山带,是划分中国南北地体的重要界限(殷鸿福和张克信, 1998)。东昆仑造山带是典型的复合增生造山带(杨经绥等, 2010),主要经历了早古生代原特提斯和晚古生代-早中生代古特提斯两期造山作用(Yang *et al.*, 1996; Bian *et al.*, 2004; 杨经绥等, 2004),其中,古特提斯造山事件基本奠定了东昆仑现今的地质构造格局。以昆中原特提斯蛇绿混杂岩带(Meng *et al.*, 2012)和昆南-阿尼玛卿古特提斯蛇绿混杂岩带(杨经绥等, 2004)为界,可将东昆仑划分为昆北地体和昆南地体。

研究表明,沿东昆仑南缘分布的布青山-阿尼玛卿古特提斯缝合带代表了消亡的古特提斯洋盆,其 MORB 型玄武岩和辉长岩的年代学资料一致表明该洋盆于早石炭世开启扩张(陈亮等, 2001; Yang *et al.*, 2009)。而该古特提斯缝合带内及北部东昆仑地区二叠纪岛弧型玄武岩的发现(姜春发

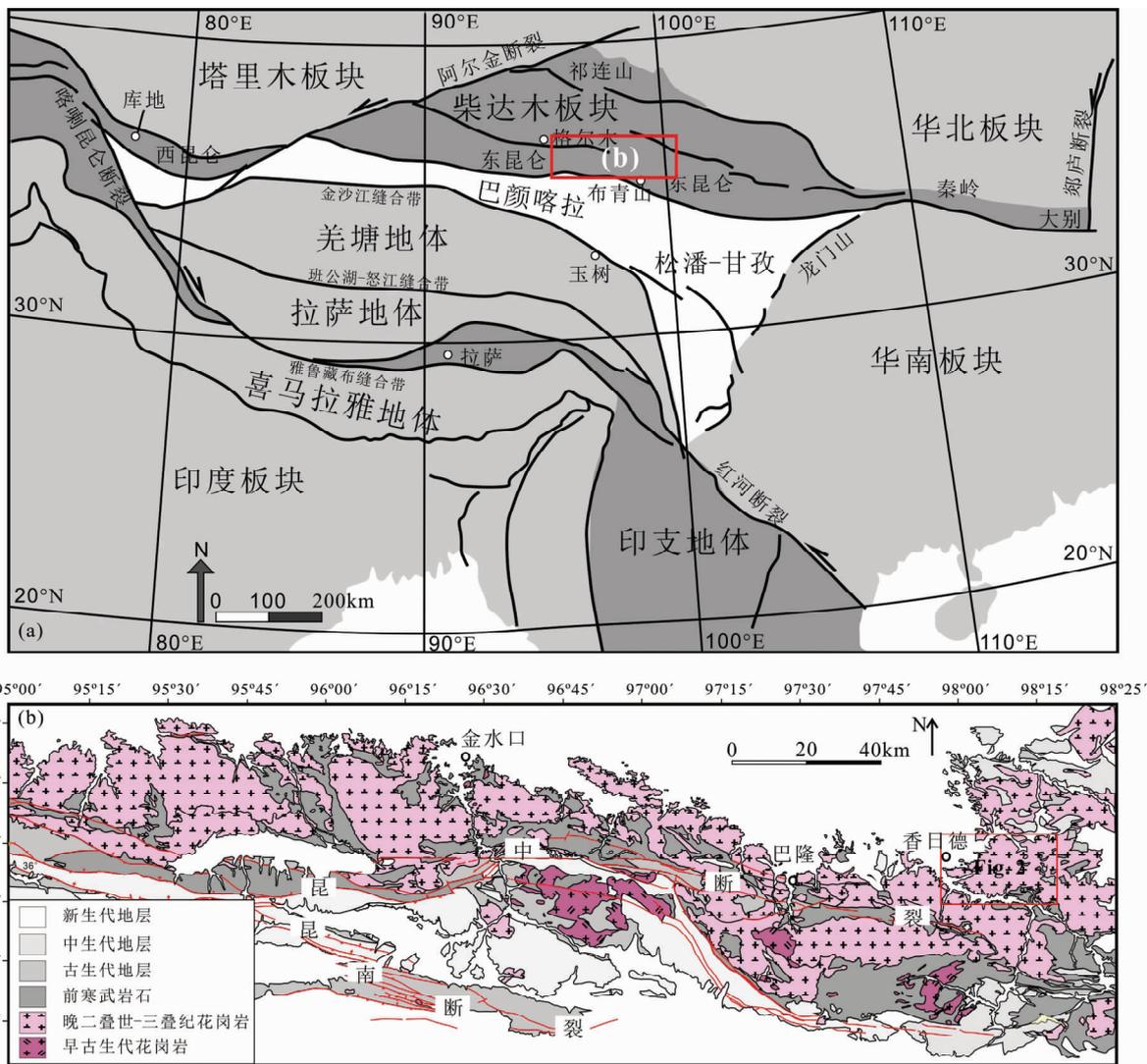


图 1 东昆仑造山带大地构造简图及岩浆岩时空分布简图
Fig. 1 Tectonic and magmatic sketches in Eastern Kunlun Orogen

等, 1992; Liu *et al.*, 2014), 则表明古特提斯洋壳于二叠纪开始向北俯冲。洋壳的俯冲及弧-陆碰撞导致东昆仑地区发育巨量岩浆活动, 形成以三叠纪花岗岩类为主体的巨型岩浆岩带 (图 1b) (莫宣学等, 2007; Chen *et al.*, 2014; Xiong *et al.*, 2014)。

东昆仑东段古特提斯域花岗岩体主要分布于昆北地体, 昆南地体相对较少, 昆南缝合带内的岩体更少。岩体规模不一, 但大多为呈东西向带状展布的大型复式岩基, 其空间展布与区域构造线一致。特别重要的是, 大型复式岩基常常由数个岩性单元构成, 各个单元之间或呈明显的侵入接触, 或呈渐变接触。以香日德复式岩基为例, 该岩基主要由石英闪长岩、二长花岗岩和花岗闪长岩等多个岩性单元构成, 不同岩性单元具有不同的岩石学、年代学和地球化学组成。从东昆仑西部的祁漫塔格地区至东段邻近香日德的巴隆地区, 晚三叠世的镁铁质岩墙群广泛出露, 是研究造山后幔源岩浆活

动的窗口。

3 岩体地质特征

出露于香日德镇东南约 2km 的香日德复式岩基, 是东昆仑造山带东端的一个代表性侵入体 (图 1b), 研究程度较高 (如, 罗明非等, 2014)。该岩体处于昆中断裂带以北, 构造位置属于昆北地体, 出露面积超过 1000km²。该岩基岩石类型复杂, 具有多次侵入的特征, 岩体侵入元古代小庙群及古生代地层。岩石类型包括石英闪长岩、二长花岗岩和 (斑状) 花岗闪长岩等 (图 2)。野外地质研究发现, 二长花岗岩呈脉状侵入石英闪长岩 (图 3a), 石英闪长岩具有强烈的岩浆混杂和混合现象 (图 3b), 局部可见花岗闪长岩呈网状分割石英闪长岩或捕获石英闪长岩团块 (图 3d, e)。花岗闪长岩与二长花岗岩截然接触 (图 3c), 可见花岗闪长岩具有冷凝边,

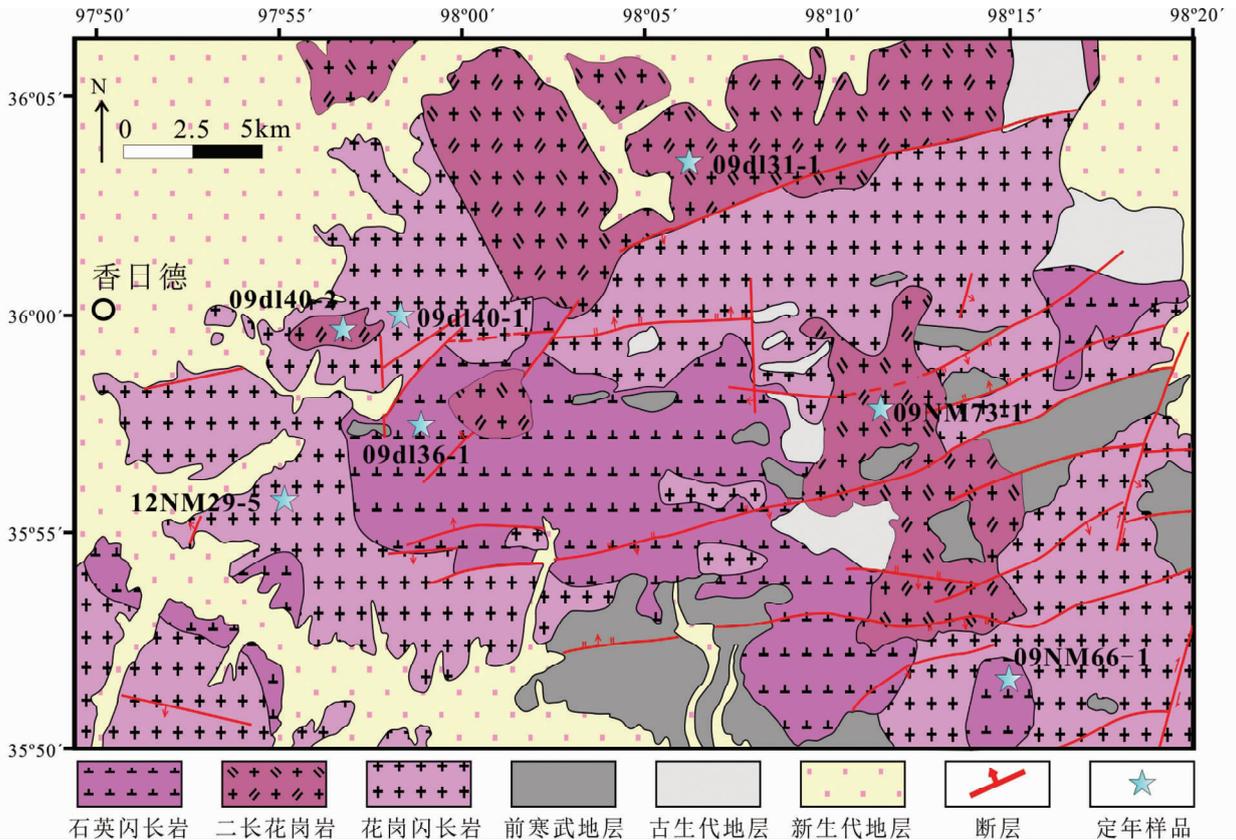


图2 东昆仑东段香日德花岗岩基地质简图

Fig. 2 Geological sketch of Xiangride granitoid batholith in Eastern Kunlun Orogen

接触边界的矿物定向明显,矿物沿接触边界走向分布,以此可推知花岗闪长岩晚于二长花岗岩。综合分析,香日德复式岩基的岩浆侵位次序依次为石英闪长岩-二长花岗岩-(斑状)花岗闪长岩。此外,石英闪长岩和(斑状)花岗闪长岩内部可见大量闪长质暗色微粒包体,但在二长花岗岩中则少见或不见暗色微粒包体(图3d-f)。

石英闪长岩位于香日德复式岩基中部(图2),岩石为中细粒结构,块状构造,主要矿物为斜长石(45%~50%)、角闪石(25%~30%)、石英(5%~10%)和黑云母(5%~10%)。岩体中发育暗色微粒包体。二长花岗岩零星分布,多为中粒结构,块状构造,局部可见似斑状结构,斑晶为钾长石,岩石中可见极少量的暗色微粒包体。二长花岗岩的主要矿物为斜长石(30%~35%)、条纹长石(35%~40%)和石英(25%~30%),暗色矿物主要为黑云母(5%),极少出现角闪石。花岗闪长岩为岩基的主体(图2),为中细粒花岗结构,块状构造,矿物主要为石英(20%~25%)、斜长石(40%~45%)、钾长石(15%~20%)、角闪石(5%~10%)和黑云母(5%)。暗色微粒包体大量分布于花岗闪长岩之中,最大者可达 $1\text{m} \times 1\text{m}$,包体中可见角闪石和长石斑晶。

锆石 U-Pb 年代学分析表明(熊富浩, 2014),石英闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化范围较宽(239~258Ma),其加权平均年龄分约为 $247.8 \pm 3.7\text{Ma}$ 。二长花岗岩共分析了

三件样品,其锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 变化于 231~244Ma 之间,加权平均年龄约为 $236.0 \pm 3.7\text{Ma}$ 。(斑状)花岗闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 218~227Ma 之间,加权平均年龄为 $223.6 \pm 1.1\text{Ma}$ 。

综上所述,香日德岩基各单元之间是不同时间先后侵位结晶的,石英闪长岩侵位相对较早,主体属于早三叠世岩浆活动产物(258Ma),而二长花岗岩的侵位结晶作用紧随其后,侵位时间约 231~244Ma 左右,属中三叠世岩浆活动产物,(斑状)花岗闪长岩侵位结晶时间约为 224Ma 左右,为晚三叠世岩浆活动产物。

4 岩浆活动强度的估算

岩浆活动强度,用岩浆通量或称为岩浆的体积添加速率来表示,指的是每百万年(m.y.)的时间内从深部添加到地壳浅部的岩浆物质的体积。有的定义为每千米长的岩浆带内每百万年的时间内从深部添加到地壳浅部的岩浆物质的体积(DeCelles *et al.*, 2009; Gehrels *et al.*, 2009; Paterson *et al.*, 2011; Caricchi *et al.*, 2014)。如果只计算每百万年(m.y.)的时间内从深部添加到地壳浅部的岩浆物质的面积,则称为视岩浆通量或面积添加速率(Paterson *et al.*, 2011)。



图3 香日德岩基的野外地质关系

(a)二长花岗岩侵入切割石英闪长岩；(b)石英闪长岩内部分异现象；(c)二长花岗岩与花岗闪长岩截然接触；(d)石英闪长岩与花岗闪长岩发生局部混合；(e)花岗闪长岩内部不均一的闪长质包体和团块；(f)花岗闪长岩侵入二长花岗岩，且花岗闪长岩内部出现大量包体，而二长花岗岩中包体含量极少

Fig. 3 Geological relations of Xiangride granitoid batholith

岩浆体积添加速率的估算方法，目前还在探索之中。Gehrels *et al.* (2009)在对北美西部海岸岩基的研究中，提出的岩浆通量的估算方法是：先将岩基大致划分为若干性质相对均匀而互相平行的片区，分别估算每个片区中每一阶段的岩浆通量 (MF, $\text{km}^3/\text{m. y.}$ 沿走向每 km 的长度，其中 m. y. 是百万年的缩写)。MF 的计算公式是：

$$\text{MF} = \text{片区面积} \times \text{某个阶段岩体所占面积}\% \times \text{古侵位深度} / \text{该阶段岩体沿走向的长度} / \text{侵位阶段的年龄间隔}$$

如果某一阶段岩体分布在多个片区中，则先分别计算每个片区的岩浆通量 ($\text{km}^3/\text{m. y.}$)。然后将所有区片同时代岩浆岩的计算结果加和，就得到这一阶段该区域总的岩浆通量或称为总通量。

Paterson *et al.* (2011) 和 Paterson and Ducea (2015) 对比了岩浆添加速率的多种定义 (表 1)。本文中，我们主要计算

岩浆的体积添加速率 ($\text{km}^3/\text{m. y.}$)。即先估算岩基中每个单元的面积，结合锆石 U-Pb 年龄数据的范围，得到面积添加速率。然后再依据对岩体厚度的假定或估算，初步得到岩浆的体积添加速率。计算中，因采用不同的假定所带来的误差情况，Paterson *et al.* (2011) 的文章有详尽的分析讨论。计算体积添加速率时，分别统计了每个单元的出露面积，并假定各单元岩石具有相同的岩体厚度。由于对岩体的真实形态和岩体厚度缺乏有效约束，这种计算不一定能反映岩浆侵位时的真实状况。此外，由于没有考虑同时期的火山岩，计算得到的岩浆添加的量是一个偏低的数值。

近年来，有关上地壳花岗岩的侵位机制和动力学的研究表明，大的花岗岩基一般都是平板状侵入体，单个岩体的最大厚度为 2.5km。一般，岩体的长度 (L) 和厚度 (T) 具有相关关系 (McCaffary and Petford, 1997)。可以表示为：

表1 有关岩浆添加速率的术语比较(据 Paterson *et al.*, 2011; Paterson and Ducea, 2015)Table 1 Commonly used quantities about magma additions rates (after Paterson *et al.*, 2011; Paterson and Ducea, 2015)

量	单位	别称
总添加体积	km ³	岩浆添加量
体积添加速率	km ³ /m. y.	岩浆通量, 岩浆产生速率
体积通量	km ³ /km ² /m. y. = km ² /m. y.	
面积添加速率	km ² /m. y.	面积通量, 视添加速率
单位弧长内的体积添加速率	(km ³ /m. y.)/(arc-km).	侵入视通量, Armstrong 单位, 岩浆添加速率

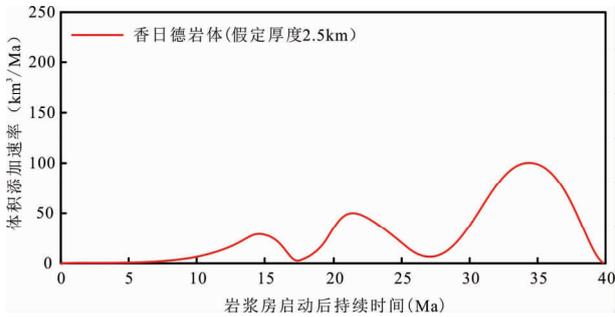


图4 香日德岩基的岩浆体积添加速率随岩浆活动时间的变化图

Fig. 4 Variation of magmatic volume addition rate vs. Time of Xiangride granitoid batholith

$$T = c \times L^a$$

其中,对于岩盖, $c = 0.12$, 而 $a = 0.88$; 而对岩基, $c = 0.29$, $a = 0.6$ (Petford *et al.*, 2000)。

根据 Paterson *et al.* (2011) 的计算方法(表1), 采用香日德岩基各岩性单元的出露面积、U-Pb 锆石年龄和假定的岩体厚度(按 2.5km 计算)进行了体积添加速率(岩浆通量)计算, 结果表示于图4中。可见, 岩浆的体积添加速率的变化存在着旋回性特征。其中, 早三叠世石英闪长岩的岩浆体积添加速率最低, 而晚三叠世花岗闪长岩的岩浆体积添加速率则最高, 中三叠世介于其间。计算表明, 香日德岩基经历了三个阶段的体积添加过程, 第一阶段持续时间约 19Myr, 其峰期的添加速率约 33km³/m. y., 第二阶段持续时间约 13Myr, 其峰期添加速率约 50km³/m. y., 第三阶段持续时间约 9Myr, 其峰期添加速率达到了 99km³/m. y.。

Tibaldi *et al.* (2013) 对阿根廷奥陶纪 Famatinian 岩浆弧的地壳剖面的研究表明, 在地壳剖面内, 对不同深度内的岩石进行年代学测定, 都得到了相近的年龄分布。因此, 我们可以以现在地表的侵入体露头定年来反映岩基整体的年龄分布状况。还需要指出的是, 要提高计算结果的可靠性, 就需要结合地球物理资料进一步约束地下主要地质体的几何形状, 同时, 也需要在野外更加精细的划分岩石单元, 并提供更详细的年代学和地球化学资料。此外, 还可以采用热模拟的方法来计算岩浆通量 (Paterson *et al.*, 2011)。

岩浆大爆发 (magmatic flare-up) 指的是岩浆添加到地壳的体积显著大于平均值的时期, 而岩浆宁静期 (magmatic

lull) 是加入到地壳中的岩浆体积远低于平均值的时期。所有的北美大陆弧都记录了高岩浆通量被岩浆宁静期所分隔的情况 (Armstrong, 1998; Paterson *et al.*, 2011)。在岩浆大爆发时期, 岩浆添加到中上地壳的速率为 75 ~ 100km³/km m. y., 而岩浆宁静期的添加速率只有 10 ~ 20km³/km m. y. (Coleman *et al.*, 1992; Ducea and Barton, 2007)。根据 Paterson *et al.* (2011) 的资料, 当体积添加速率达到 100 ~ 10⁶km³/m. y. 时, 就属于岩浆潮或岩浆大爆发阶段。由于缺乏花岗岩类岩石在深部分布情况的细节, 目前还难以准确估算东昆仑造山带单位弧长的体积添加速率, 但香日德地区晚三叠世时期加入到中上地壳的岩浆体积是巨大的, 接近岩浆大爆发状态, 这也与岩基内晚三叠世花岗闪长岩大量出露的事实一致。

5 岩浆旋回与源区特征

锆石 Th/U 比值反映了岩浆源区的性质, 也是鉴定岩浆源区是否存在变质流体贡献的有力工具 (Belousova *et al.*, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003)。样品的 Th/U 比值呈现出三个阶段演化趋势, 且总体具有降低的趋势 (图5)。所有锆石分析点具有的 Th/U 比值, 第一阶段的 Th/U 比值为 0.83 ~ 2.20, 第二阶段的 Th/U 比值为 0.28 ~ 1.27, 第三阶段的 Th/U 比值为 0.44 ~ 0.67。同时, 不同阶段的锆石具有不同的 Th 和 U 含量, 其中具有最高 Th/U 比值的第一阶段样品具有较高的 Th 和 U 含量, 其 Th 含量主要变化于 431 × 10⁻⁶ ~ 2702 × 10⁻⁶, U 含量变化于 522 × 10⁻⁶ ~ 1726 × 10⁻⁶, 而具有最低 Th/U 比值的第三阶段样品则具有较低的 Th 和 U 含量, 其 Th 含量主要变化于 112 × 10⁻⁶ ~ 585 × 10⁻⁶, U 含量变化于 252 × 10⁻⁶ ~ 1149 × 10⁻⁶。Th 和 U 与流体性质密切相关 (Tatsumi *et al.*, 1986; Saunders *et al.*, 1991), 板片沉积物携带的流体常常富集 Th 和 U 等大离子亲石元素 (LILE), 而板片熔体常常亏损 LILE。香日德岩基不同样品的 Th 和 U 含量的逐渐降低, 反映了源区富集 LILE 的流体贡献逐渐减弱, 表明第一阶段石英闪长岩岩浆源区存在大量的板片流体的贡献。

锆石 Lu-Hf 同位素的研究表明, 香日德岩基的 Lu-Hf 同位素存在着系统的变化规律 (图6): 第一阶段的石英闪长岩具有较宽和偏低的 Hf 同位素组成, 而第三阶段花岗闪长岩具有较高的 Hf 同位素组成, 这反映了源区组成的差异性变

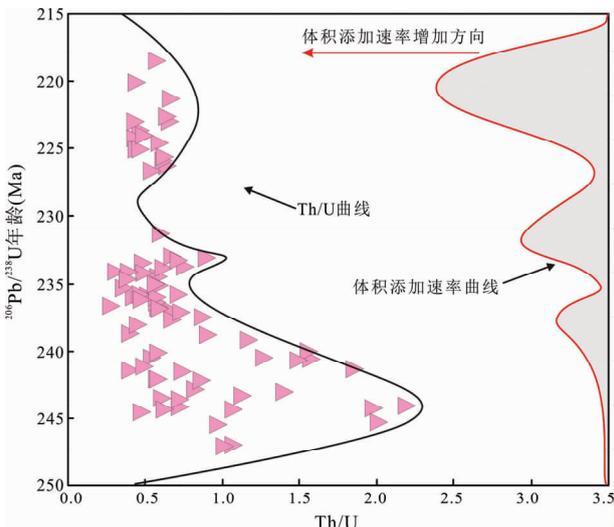


图5 香日德岩基中锆石 Th/U 比值与岩浆体积添加速率对比图

Fig.5 Zircon Th/U ratios and volume addition rate of of Xiangride granitoid batholith

化。结合 Th 和 U 元素组成所提供的信息,第一阶段岩浆存在大量板片流体贡献,而板片流体主要来自板片沉积物。因此,可以推测,第一阶段石英闪长岩岩浆源区存在大量的板片沉积物同位素贡献,而玄武质板片熔体的贡献较弱,这与石英闪长岩的 Hf 同位素组成特征一致,与此不同,第三阶段的花岗闪长岩具有较高的 Hf 同位素组成、较低的 Th 和 U 组成,表明板片沉积物的贡献较弱,而玄武质熔体的贡献较强。

香日德岩基样品的 Sr 和 Y 等元素组成也具有规律性变化特征(图7)。第一阶段和第二阶段样品具有较低的 Sr 和较高的 Y 组成,具有较低的 Sr/Y 和 La/Yb 比值,而第三阶段样品则明显具有较高的 Sr 和较低的 Y 组成,其 Sr/Y 和 La/Yb 比值较高(图7)。这种规律性变化特征表明第一阶段和第二阶段岩浆主要发生了斜长石等分离结晶或源区残留,而

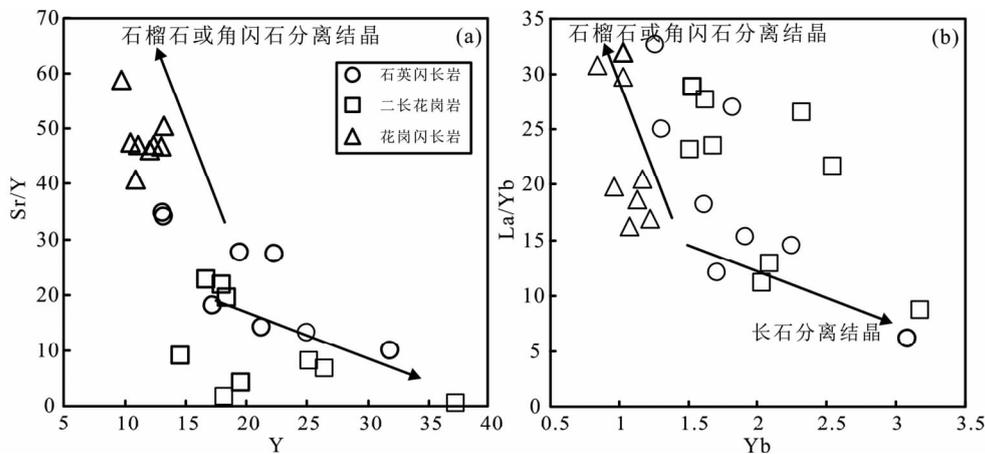


图7 香日德岩基内部各单元的 Sr/Y-Y 和 La/Yb-Yb 图

Fig.7 Sr/Y vs. Y and La/Yb vs. Yb diagrams of Xiangride granitoid batholith

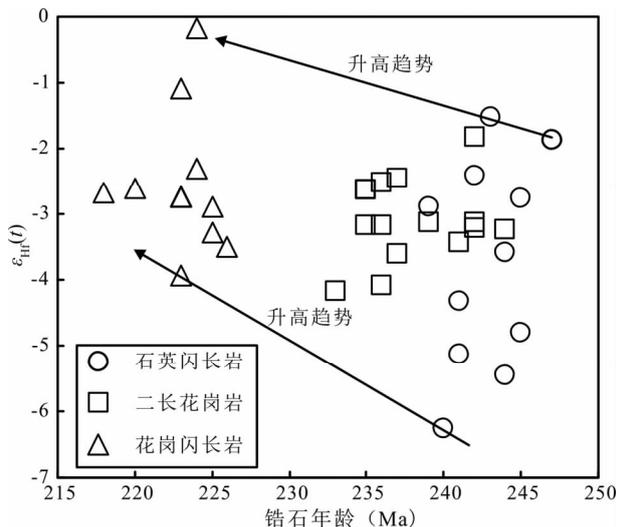


图6 香日德岩基中锆石 Hf 同位素组成变化图

Fig.6 Diagram showing Zircon Hf isotopic composition of Xiangride granitoid batholith

第三阶段岩浆则发生了石榴石或角闪石分离结晶或源区残留。源区不同类型矿物的稳定存在反映了不同的地壳深度(肖龙等, 2004; Castillo, 2012)。以分离结晶或源区残留的主要矿物相为依据,可以推测第一和第二阶段岩浆起源于正常地壳厚度,而第三阶段岩浆则是在加厚地壳产生的岩石基础上形成的。这种差异性特征反映了香日德岩基的构建过程中经历了碰撞前和碰撞加厚的构造过程。

岩浆体积添加速率的初步估算表明,香日德岩基存在着三个旋回性发展的阶段。这种阶段性不仅与构造背景的转变密切相关,也与源区性质的变化紧密联系。实验岩石学对大陆下地壳不同源岩的大量熔融实验研究表明,来自变基性岩熔融的岩浆比来自变沉积岩熔融的岩浆具有更低的 $(Na_2O + K_2O) / (FeO^T + MgO + TiO_2)$ 、 $CaO / (FeO^T + MgO +$

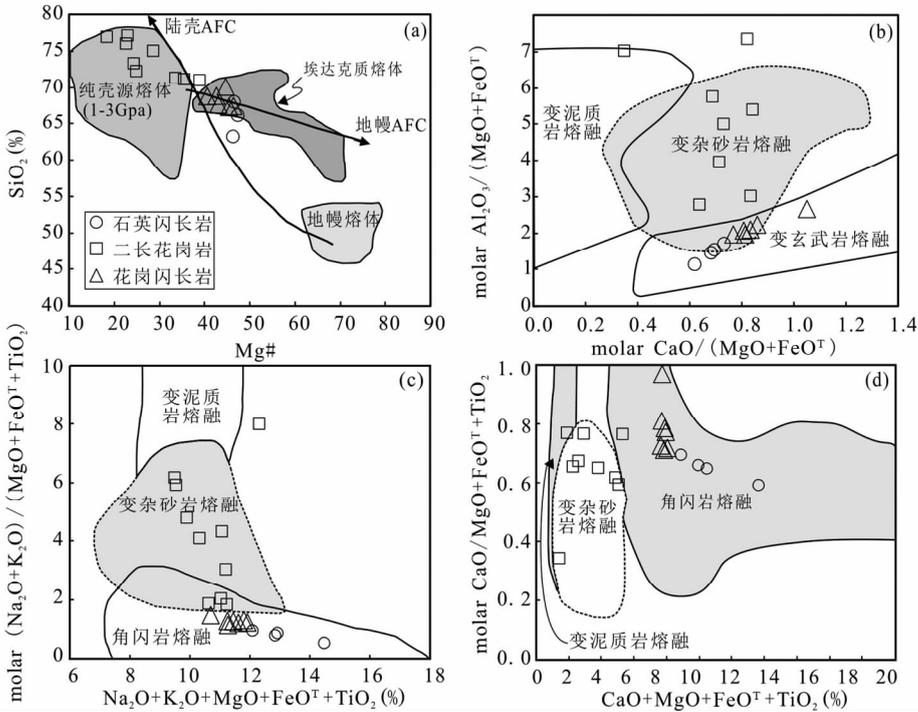


图8 香日德岩基内部各单元的岩浆源区分析图解

Fig. 8 Geochemistry and magma sources of Xiangride granitoid batholith

TiO₂) 和 Al₂O₃/(FeO^T + MgO) 比值, 更高的 CaO/(MgO + FeO^T) 和 CaO + FeO^T + MgO + TiO₂ 比值 (Patiño Douce and Johnston, 1991; Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995)。香日德岩基第一阶段岩浆岩具有与变基性岩部分熔融产生的岩浆相似的特征(图8), 指示岩浆可能来源于基性下地壳的部分熔融。然而, 岩体内还发育镁铁质暗色微粒包体, 可以认为, 第一阶段石英闪长岩既与基性下地壳熔融有关, 也存在幔源玄武质岩浆的叠加和混合作用。

与第一阶段岩石相比, 第二阶段高硅花岗岩类具有相似的 CaO/(MgO + FeO^T) 比值, 但 Al₂O₃/(MgO + FeO^T)、K₂O/Na₂O 和 (Na₂O + K₂O)/(FeO^T + MgO + TiO₂) 等的比值却显著升高, 反映了源区具有类似变质硬砂岩的特征(图8)。第三阶段岩浆岩具有较低的 (Na₂O + K₂O)/(FeO^T + MgO + TiO₂) 和 K₂O/Na₂O 比值, 其特征与 1.6GPa 条件下变玄武岩熔融产生的熔体成分相似, 也与 1~4.0GPa 条件下变玄武岩和榴辉岩熔融产生的熔体成分相似 (Rapp *et al.*, 1991)。如图7所示, 香日德第三阶段岩石具有类似于加厚地壳熔融的地球化学特征。实验岩石学研究表明, 在高压条件下 (>1GPa), 变玄武岩、榴辉岩和角闪岩等岩石将发生熔融, 形成以石榴石为主要残余矿物相的熔体, 熔体具有高 Sr 低 Y 等埃达克岩特征。以上资料表明, 香日德第三阶段岩浆岩主要起源于加厚下地壳熔融, 其较低的 (Na₂O + K₂O)/(FeO^T + MgO + TiO₂) 比值和较高的 CaO/(MgO + FeO^T) 比值则表明其源区为下地壳角闪岩。

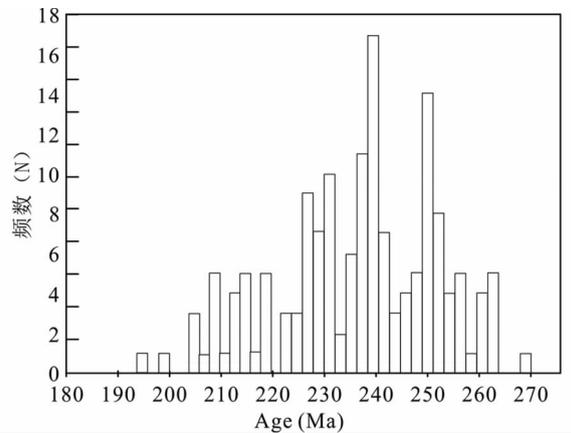


图9 东昆仑古特提斯域花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄统计图

Fig. 9 Zircon U-Pb age charts of Paleo-Tethyan granitoid rocks in Eastern Kunlun

6 地质和成矿意义

锆石年代学统计资料表明, 东昆仑古特提斯域岩浆活动出现于 270~200Ma 之间, 存在着多个峰期(图9), 其中最高峰的年龄为早三叠世(约 240Ma), 而晚三叠世岩浆活动年龄的峰最低。然而, 根据岩浆体体积添加速率的估算结果, 东昆仑花岗岩浆的大规模侵位结晶发生在晚三叠世, 而早三叠世岩浆添加速率较低, 这表明东昆仑造山带巨量花岗岩浆大爆

表 2 昆北地体中代表性的成岩成矿年龄对比

Table 2 Timing of magmatic crystallization and mineralization in representative granitoids and their ore deposits, Northern Kunlun Terrain

地点	矿种	岩性(测年对象)	测年方法	成岩(成矿*)年龄	资料来源
鸭子沟	铜钼矿	正长花岗斑岩	U-Pb	224 ± 2Ma	李世金等, 2008
		辉钼矿	Re-Os	225 ± 3Ma *	何书跃等, 2009
景忍	铁(锡钼)	花岗闪长岩	U-Pb	235 ± 2Ma	丰成友等, 2011a
		二长花岗岩	U-Pb	219 ± 1Ma	
		辉钼矿(铜钼矿)	Re-Os	224 ± 1Ma	
		辉钼矿(钼矿)	Re-Os	230 ± 2Ma	
虎头崖	铅锌	花岗闪长岩	U-Pb	235 ± 2Ma	丰成友等, 2011b
		二长花岗岩	U-Pb	219 ± 2Ma	
		辉钼矿(铜钼矿)	Re-Os	225 ± 4Ma *	
		辉钼矿(钼矿)	Re-Os	230 ± 5Ma *	
肯德可克	铁(钴金)	二长花岗岩(锆石)	U-Pb	229.5 ± 0.5Ma	赵财胜等, 2006
		辉长岩(斜长石)	Ar-Ar	211 ± 5Ma *	
野马泉	铁(铅锌)	石英二长闪长岩(锆石)	U-Pb	219 ± 1Ma	高永宝等, 2014
		正长花岗岩	U-Pb	213 ± 1Ma	
		细粒正长花岗岩	U-Pb	204 ± 3Ma	刘云华等, 2006
		闪长岩	U-Pb	227 ± 3Ma	
		矿石(金云母)	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	225 ± 2Ma *	
尕林格	铁(锌)	石英二长闪长岩	U-Pb	228 ± 1Ma	高永宝等, 2012
		石英二长岩	U-Pb	234 ± 1Ma	
它温查汉	铁	白云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	230 ± 4Ma	田承盛等, 2013
拉陵灶火	钼(铜)	辉钼矿	Re-Os	218 ± 4Ma *	王富春等, 2013
		辉钼矿	Re-Os	238 ± 1Ma *	
白石崖	铁(铅锌)	花岗闪长岩 矿石(金云母)	U-Pb ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	230 ± 1Ma 230 ± 2Ma *	本项目组未发表资料

发发生在碰撞后环境,而俯冲阶段产生的岩浆通量较低,可能与冈底斯巨型花岗岩基的成因机制相近(Mo *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2013)。

香日德岩基岩浆通量的研究表明,自早三叠世到晚三叠世,发生了三次强烈的岩浆活动,但从早到晚,岩浆体积添加速率增加,这与区域构造演化和深部动力学背景密切相关。早三叠世岩浆体体积添加速率较低,其锆石 Th/U 比值偏高,且 Hf 同位素组成较低(图 6),这与源区发生富集改造和初始熔融有关。即晚二叠世阿尼玛卿板片向北俯冲,导致源区发生富集改造作用,板片沉积物或流体使源区强烈富 Th,并触发了地幔楔的熔融作用,形成具有弧岩浆化学属性的玄武质岩浆作用(熊富浩等, 2011; Xiong *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014)。玄武质岩浆的底侵作用,导致地壳熔融和早三叠世花岗质岩浆作用。因此,早三叠世深部过程涉及到下地壳熔融-壳幔混合-岩浆分异与均一化等过程。与早三叠世相比,中三叠世时期,岩浆体体积添加速率略微升高,其 Hf 同位素组成较为均一,且岩体中不发育镁铁质暗色微粒包体,这表明这一阶段的岩浆活动起源于陆壳熔融。晚三叠世时期,花岗岩岩浆体体积添加速率最大,其 Hf 同位素组成范围很宽,但部分岩石中软流圈地幔物质的贡献明显增多,同时也具有加厚地壳的微量元素特征(高 Sr 低 Y),普遍发育暗色微粒包体。这表明,这一时期的岩浆活动是在前期加厚的背景下,陆壳

岩石发生熔融的产物,熔融过程中受到了地幔物质的添加和贡献。

以往提出过多种岩浆大爆发的机制,可大致归为两类。一是岩石圈伸展和(或)拆沉导致软流圈地幔熔体的加入(Kay and Mahlburg-Kay, 1991; Lee *et al.*, 2006);二是地壳和(或)岩石圈的缩短引起大规模的熔融作用(Ducea, 2001; Ducea and Barton, 2007)。例如,根据地质记录 and 同位素地球化学资料,北美西部大岩基的形成都发生于挤压时期,因而认为加州弧岩浆大爆发是由地壳(岩石圈)加厚引起的(Ducea and Barton, 2007)。与北美西部不同,东昆仑地区侵入岩锆石 Hf 同位素的统计表明(图 10),全区的同位素特征不仅具有与香日德复式岩基相似的特点,即从早到晚 Hf 同位素组成升高,而且从 230Ma 开始,锆石的 Hf 同位素组成范围变宽,部分岩体尤其是含矿岩体具有相当高的 Hf 同位素组成(ϵ_{Hf} 高达 +7.7)(图 10)。这表明,青藏高原北部的晚三叠世大规模岩浆活动,与软流圈地幔的活动和相关熔体的加入有关。

在东昆仑地区尤其是在昆北地体与柴达木盆地邻接区,产出了一系列大-中型矽卡岩-斑岩型铁铜(钼铅锌)多金属矿床,与成矿有关的岩体如肯得可克、野马泉、尕林格、五龙沟、双庆和白石崖等闪长岩-花岗闪长岩体等,大都形成于晚三叠世时期(熊富浩, 2014; Yuan *et al.*, 2013)。部分成矿

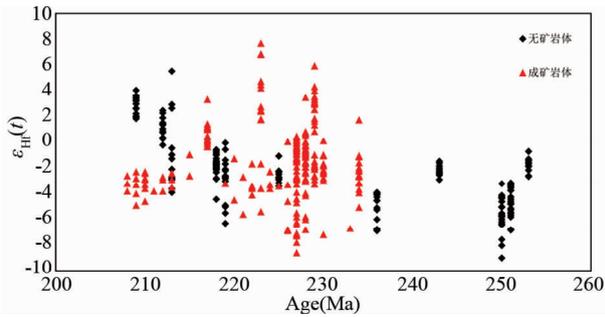


图 10 东昆仑古特提斯含矿与不含矿岩浆岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 10 Zircon Hf isotope of ore-bearing and barren granitoid rocks, Eastern Kunlun

年代学资料也表明,成矿作用大多发生在晚三叠世(表 2)。例如,祁漫塔格的野马泉、都兰县的白石崖砂卡岩型铁多金属矿床的形成年龄分别为 $225 \pm 2\text{Ma}$ 和 $230 \pm 2\text{Ma}$ (均为矿石金云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄,本项目组未刊资料)。可以认为,由于晚三叠世时期东昆仑处于碰撞后伸展环境,深部地幔岩浆上涌,就促使原先加厚的地壳发生熔融,在减压环境下形成大体积的花岗质岩浆,导致陆壳生长,也有利于矿床的形成。尤其是在盆地结合部,地幔物质对岩浆活动的贡献更大(图 10),导致岩浆大爆发,也为成矿提供了巨量的热和物质,有利于矿床形成,而且由于剥露较浅,矿体容易保留下来。

7 结论

(1) 岩浆从深部添加到中上地壳的速率是当前岩浆动力学研究的一个新主题。深入研究其变化规律,对于认识大陆地壳生长和演化机理,探索大型花岗岩基的产生机制,认识岩浆活动与成矿的关系,具有重要意义。

(2) 东昆仑造山带研究活动强烈,尤以与古特提斯构造演化相关的晚二叠世-晚三叠世岩浆活动最为集中,其形成年龄跨度大(多介于 270~200Ma 之间)、岩石类型多,分别代表了从洋壳俯冲、大陆碰撞到碰撞后阶段的岩浆记录,其中,晚三叠世还广泛发育了镁铁质岩墙群。

(3) 位于东昆仑东段的香日德岩基是东昆仑古特提斯岩浆活动的缩影。锆石 U-Pb 定年表明,岩体结晶年龄介于 258~218Ma 之间。早三叠世的石英闪长岩是在俯冲板片流体的作用下主要由基性下地壳部分熔融的岩浆结晶产物,中三叠世的二长花岗岩具有地壳变沉积岩熔融形成的岩石的化学特征,而晚三叠世的花岗闪长岩是在软流圈地幔的影响下,下地壳角闪岩熔融和与幔源岩浆相互作用的产物。

(4) 对岩浆的体积添加速率的估算表明,从早到晚,该岩基的岩浆体积添加速率存在着旋回性的变化特征。其中,早三叠世石英闪长岩的岩浆体积添加速率最低,而晚三叠世花岗岩闪长岩的岩浆体积添加速率最高,中三叠世介于其间。添

加速率的变化,主要与壳幔相互作用和构造体制的转换有关。

(5) 东昆仑造山带昆北地体内,产出了一系列晚三叠世大-中型斑岩型-矽卡岩型铁多金属矿床。在伸展背景下,软流圈地幔及其熔体的参与、以及地壳岩石大规模熔融作用,有利于成矿的发生。

致谢 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室许志琴院士对研究工作给予了指导,并邀请第一作者为《岩石学报》专辑撰文;研究生姚杰参与了讨论。特此感谢。

References

- Armstrong RL. 1988. Mesozoic and Early Cenozoic magmatic evolution of the Canadian Cordillera. *Geological Society of America Special Papers*, 218: 55–92
- Bacon CR and Lanphere MA. 2006. Eruptive history and geochronology of Mount Mazama and the Crater Lake region, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, 118(11–12): 1331–1359
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622
- Bian QT, Li DH, Pospelov I, Yin LM, Li HS, Zhao DS, Chang CF, Luo XQ, Gao SL, Astrakhantsev O and Chamov N. 2004. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(4): 577–596
- Caricchi L, Simpson G and Schaltegger U. 2014. Zircons reveal magma fluxes in the Earth's crust. *Nature*, 511(7510): 457–461
- Castillo PR. 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134–135: 304–316
- Castro A, Vogt K and Gerya T. 2013. Generation of new continental crust by sublithospheric silicic-magma relamination in arcs: A test of Taylor's andesite model. *Gondwana Research*, 23(4): 1554–1566
- Chen L, Sun Y, Pei XZ, Gao M, Feng T, Zhang ZQ and Chen W. 2001. Northernmost Paleo-Tethyan oceanic basin in Tibet: Geochronological evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating of Dur'ngoi ophiolite. *Chinese Science Bulletin*, 46(1): 1203–1205
- Chen SJ, Li RS, Ji WH, Zhao ZM, Liu RL, Jia BH, Zhang ZF and Wang GC. 2010. The Permian lithofacies paleogeographic characteristics and basin-mountain conversion in the Kunlun orogenic belt. *Geology in China*, 37(2): 374–393 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Gehrels G, Yin A, Zhou Q and Huang PH. 2014. Geochemical and Nd-Sr-Pb-O isotopic constrains on Permo-Triassic magmatism in eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for the evolution of the Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2014.11.013
- Clausen BL, Morton DM, Kistler RW and Lee CTA. 2014. Low-initial-Sr felsic plutons of the northwestern Peninsular Ranges batholith, southern California, and the role of mafic-felsic magma mixing in continental crust formation. *Geological Society of America Memoirs*, 211: 317–344
- Coleman DS, Glazner AF and Frost TP. 1992. Evidence from the lamark granodiorite for rapid Late Cretaceous crust formation in California. *Science*, 258(5090): 1924–1926
- De Silva SL, Riggs NR and Barth AP. 2015. Quickening the pulse;

- Fractal tempos in continental arc magmatism. *Elements*, 11(2): 113–118
- DeCelles PG, Ducea MN, Kapp P and Zandt G. 2009. Cyclicity in Cordilleran orogenic systems. *Nature Geoscience*, 2(4): 251–257
- Ducea MN. 2001. The California arc: Thick granitic batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups. *Geological Society of America, GSA Today*, 11(11): 4–10
- Ducea MN and Barton MD. 2007. Igniting flare-up events in Cordilleran arcs. *Geology*, 35(11): 1047–1050
- Feng CY, Ma SC, Li GC, Wang S and Shu XF. 2011a. Geochronological constraints on the origin of Jingren-Yingqinggou polymetallic ore deposits, Qinghai. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl.): 576–577 (in Chinese)
- Feng CY, Wang XP, Shu XF, Zhang AK, Xiao Y, Liu JN, Ma SC, Li GC and Li DX. 2011b. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai Province and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1806–1817 (in Chinese with English abstract)
- Gamble JA, Price RC, Smith IEM, McIntosh WC and Dunbar NW. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of magmatic activity, magma flux and hazards at Ruapehu volcano, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120(3–4): 271–287
- Gao YB, Li WY, Ma XG, Zhang ZW and Tang QY. 2012. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, eastern Kunlun. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 48(2): 36–47 (in Chinese with English abstract)
- Gao YB, Li WY, Qian B, Li K, Li DS, He SY, Zhang ZW and Zhang JW. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1647–1665 (in Chinese with English Abstract)
- Gehrels G, Rasmussen M, Woodsworth G, Crawford M, Andronico C, Hollister L, Patchett J, Ducea M, Butler R, Klepeis K, Davidson C, Friedman R, Haggart J, Mahoney B, Crawford W, Pearson D and Girardi J. 2009. U-Th-Pb geochronology of the Coast Mountains batholith in north-coastal British Columbia: Constraints on age and tectonic evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 121(9–10): 1341–1361
- He SY, Li DS, Li LL, Qi LY and He SF. 2009. Re-Os age of molybdenite from the Yazigou copper (molybdenum) mineralized area in eastern Kunlun of Qinghai Province, and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2): 236–242 (in Chinese with English abstract)
- Holland JE, Surpless BE, Smith DR, Loewy SL and Lackey JS. 2013. Intrusive history and petrogenesis of the Ash Mountain Complex, Sierra Nevada batholith, California (USA). *Geosphere*, 9(4): 691–717
- Hora JM, Singer BS and Wörner G. 2007. Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic Zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints from Volcán Parímacota, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 119(3–4): 343–362
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Hutton DHW. 1982. A tectonic model for the emplacement of the Main Donegal granite, NW Ireland. *Journal of Geological Society*, 139(5): 615–631
- Hutton DHW. 1992. Granite sheeted complexes: Evidence for the dyking ascent mechanism. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1–2): 377–382
- Jiang CF, Yang JS, Feng BG, Zhu ZZ, Zhao M and Chai YC. 1992. Opening-closing Tectonic of Kunlun Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Johnson SE, Paterson SR and Tate MC. 1999. Structure and emplacement history of a multiple-center, cone-sheet-bearing ring complex: The Zarza Intrusive Complex, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(4): 607–619
- Kay RW and Mahlburg-Kay S. 1991. Creation and destruction of the lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80(2): 259–278
- Lagarde JL, Brun JP and Gapais D. 1990. Formation of epizonal granitic plutons by in situ assemblage of laterally expanding magma. *Comptes Rendus: Académie des Sciences, Serie II*, 310(8): 1109–1114
- Lee CTA, Cheng X and Horodyskyi U. 2006. The development and refinement of continental arcs by primary basaltic magmatism, garnet pyroxenite accumulation, basaltic recharge and delamination: Insights from the Sierra Nevada, California. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(2): 222–242
- Li RB, Pei XZ, Li ZC, Liu ZQ, Chen GC, Chen YX, Wei FH, Gao JM, Liu CJ and Pei L. 2012. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244–254 (in Chinese with English abstract)
- Li RS, Ji WH, Yang YC, Yu PS, Zhao ZM, Chen SJ, Meng Y, Pan XP, Shi BD, Zhang WJ, Li H and Luo CY. 2008. Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Areas. Beijing: Geological Publishing House, 1–400 (in Chinese)
- Li S, Wang T, Wilde SA and Tong Y. 2013. Evolution, source and tectonic significance of Early Mesozoic granitoid magmatism in the Central Asian Orogenic Belt (central segment). *Earth-Science Reviews*, 126: 206–234
- Li SJ, Sun FY, Feng CY, Liu ZH, Zhao JW, Li YC and Wang S. 2008. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in eastern Kunlun, Qinhai Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 949–955 (in Chinese with English abstract)
- Liu B, Ma CQ, Zhang JY, Xiong FH, Huang J and Jiang HA. 2014. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age and geochemistry of subduction-related mafic dikes in northern Tibet, China: Petrogenesis and tectonic implications. *International Geology Review*, 56(1): 57–73
- Liu CD, Zhang WQ, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Li SW and Zhao X. 2002. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegulu granite in the Eastern Kunlun. *Geol. Bull. China*, 21(11): 739–744 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT. 2005. Petrology, geochemistry and geochronology of Late Triassic volcanics, Kunlun orogenic belt, western China: Implications for tectonic setting and petrogenesis. *Geochemical Journal*, 39(1): 1–20
- Liu YH, Mo XX, Yu XH, Zhang XT and Xu GW. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the East Kunlun and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2457–2463 (in Chinese with English abstract)
- Luo MF, Mo XX, Yu XH, Li XW, Huang XF and Yu JC. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229–3241 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Ke S, Cao YQ, Deng JF and Zhan HW. 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292–297 (in Chinese with English abstract)
- Ma CQ, Xiong FH, Zhang JY, Liu B, Huang J and Jiang HA. 2013. The influence of subducted slab on magmatism from plate subduction to post-orogenic extension: Evidence from Early Permo-Late Triassic mafic dike swarms in East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 87(Suppl.): 79–81 (in Chinese)
- McCaffary KJW and Petford N. 1997. Are granitic intrusions scale

- invariant? *Journal of the Geological Society*, 154(1): 1–4
- McNulty BA, Tong WX and Tobisch OT. 1996. Assembly of a dike-fed magma chamber: The Jackass Lakes pluton, central Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin*, 108(8): 926–940
- Meng FC, Zhang JX and Cui MH. 2012. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, western China and its tectonic significance. *Gondwana Research*, 23(2): 825–836
- Miller RB and Paterson SR. 2001. Construction of mid-crustal sheeted plutons: Examples from the North Cascades, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 113(11): 1423–1442
- Mo XX, Luo ZH, Deng JF, Yu XH, Liu CD, Zhan HW, Yuan WM and Liu YH. 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Zhu DC, Zhou S and Niu YL. 2009. Mantle input to the crust in southern Gangdese, Tibet, during the Cenozoic: Zircon Hf isotopic evidence. *Journal of Earth Science*, 20(2): 241–249
- Niu YL, Zhao ZD, Zhu DC and Mo XX. 2013. Continental collision zones are primary sites for net continental crust growth: A testable hypothesis. *Earth-Science Reviews*, 127: 96–110
- Paterson SR and Vernon RH. 1995. Bursting the bubble of ballooning plutons: A return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geological Society of America Bulletin*, 107(11): 1356–1380
- Paterson SR and Miller RB. 1998. Mid-crustal magmatic sheets in the Cascades Mountains, Washington: Implications for magma ascent. *Journal of Structural Geology*, 20(9–10): 1345–1363
- Paterson SR, Okaya D, Memeti V, Economos R and Miller RB. 2011. Magma addition and flux calculations of incrementally constructed magma chambers in continental margin arcs: Combined field, geochronologic, and thermal modeling studies. *Geosphere*, 7(6): 1439–1468
- Paterson SR and Ducea MN. 2015. Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. *Elements*, 11(2): 91–98
- Patiño Douce AE and Johnston AD. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202–218
- Petford N, Cruden AR, McCaffrey KJW and Vigneresse JL. 2000. Granitic magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408(6813): 669–673
- Pitcher WS and Berger AR. 1972. *The Geology of Donegal: A Study of Granite Emplacement and Unroofing*. New York: Wiley, 1–435
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2013. Multi-stage granitic magmatism during exhumation of subducted continental lithosphere: Evidence from the Wulong pluton, South Qinling. *Gondwana Research*, 24(3–4): 1108–1126
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1–4): 1–25
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Saunders AD, Norry MJ and Tarney J. 1991. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 335(1638): 377–392
- Scandone R, Cashman KV and Malone SD. 2007. magma supply, magma ascent and the style of volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(3–4): 513–529
- Tatsumi Y, Hamilton DL and Nesbitt RW. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1–4): 293–309
- Tian CS, Feng CY, Li JH and Cao DZ. 2013. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of Tawenchahan Fe-polymetallic deposit in Qimantag Mountain of Qinghai Province and its geological implications. *Mineral Deposits*, 32(1): 169–176 (in Chinese with English abstract)
- Tibaldi AM, Otamendi JE, Cristofolini EA, Bialiari I, Walker Jr BA and Nergantz GC. 2013. Reconstruction of the Early Ordovician Famatinian arc through thermobarometry in lower and middle crustal exposures: Sierra de Valle Fértil, Argentina. *Tectonophysics*, 589: 151–166
- Vigneresse JL and Bouchez JL. 1997. Successive granitic magma batches during pluton emplacement: The case study of Cabeza de Araya (Spain). *Journal of Petrology*, 38(12): 1767–1776
- Wang FC, Chen J, Xie ZY, Li SP, Tan SX, Zhang YB and Wang T. 2013. Geological features and Re-Os isotopic dating of the Lalingzaohuo molybdenum polymetallic deposit in East Kunlun. *Geology in China*, 40(4): 1209–1217 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Wilde SA, Hong DW, Li S and Salnikova EB. 2014. Mesozoic intraplate granitic magmatism in the Altai accretionary orogen, NW China: Implications for the orogenic architecture and crustal growth. *American Journal of Science*, 314(1): 1–42
- Wiebe RA and Collins WJ. 1998. Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: Implications for the emplacement and crystallization of granitic magma. *Journal of Structural Geology*, 20(9–10): 1273–1289
- Xiao L, Rapp R and Xu JF. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 219–228 (in Chinese with English abstract)
- Xiong FH, Ma CQ, Zhang JY and Liu B. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3350–3364 (in Chinese with English abstract)
- Xiong FH, Ma CQ, Jiang HA, Liu B, Zhang JY and Zhou Q. 2013. Petrogenetic and tectonic significance of Permian calc-alkaline lamprophyres, East Kunlun orogenic belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau. *International Geology Review*, 55(14): 1817–1834
- Xiong FH. 2014. Spatial-temporal pattern, petrogenesis and geological implications of Paleo-Tethyan granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment). Ph. D. Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese)
- Xiong FH, Ma CQ, Zhang JY, Liu B and Jiang HA. 2014. Reworking of old continental lithosphere: An important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau. *Journal of the Geological Society*, 171(6): 847–863
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Zhang JX and Wu CL. 2007. Orogenic Plateaux: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1–458 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li WC, Li HQ, Cai ZH, Yan Z and Ma CQ. 2013. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Dilek Y, Cao H, Yang JS, Robinson P, Ma CQ, Li HQ, Jolivet M, Roger F and Chen XJ. 2015. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 320–337
- Yang JS, Robinson PT, Jiang CF and Xu ZQ. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258(1–4): 215–231

- Yang JS, Wang XB, Shi RD, Xu ZQ and Wu CL. 2004. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: A fragment of paleo-Tethyan oceanic crust. *Geology in China*, 31(3): 225 - 239 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu ZQ, Li HB and Shi RD. 2005. The paleo-Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A'nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 369 - 380 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Shi RD, Wu CL, Wang XB and Robinson PT. 2009. Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau; Evidence for Paleo-Tethyan suture in Northwest China. *Journal of Earth Science*, 20(2): 303 - 331
- Yang JS, Xu ZQ, Ma CQ, Wu CL, Zhang JX, Wang ZQ, Wang GC, Zhang HF, Dong YP and Lai SC. 2010. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China. *Geology in China*, 37(1): 1 - 11 (in Chinese with English abstract)
- Yin HF and Zhang KX. 1998. Evolution and characteristics of the Central Orogenic Belt. *Earth Science*, 23(5): 438 - 442 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Wilde S, Li XH, Liu XH, Long XP, Xia XP, Ye K and Li JL. 2009. Garnet-bearing tonalitic porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau; Implications for adakite and magmas from the MASH Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1489 - 1510
- Yuan WM, Mo XX, Yu XH and Luo ZH. 2000. The record of Indosinian tectonic setting from the granulitoid of Eastern Kunlun Mountains. *Geological Review*, 46(2): 203 - 211 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Mo XX, Zhang AK, Chen XN, Duan HW, Li X, Hao NN and Wang XM. 2013. Fission track thermochronology evidence for multiple periods of mineralization in the Wulonggou gold deposits, eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province. *Journal of Earth Science*, 24(4): 471 - 478
- Zeng LS, Liu J and Saleeby JB. 2006. Root zone processes for the formation and evolution of a large-scale granitic batholith: Drip structures, potassic volcanism and Earth surface processes. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1257 - 1273 (in Chinese with English abstract)
- Zhao CS, Yang FQ and Dai JZ. 2006. Metallogenic age of the Kendekeke Co, Bi, Au deposit in East Kunlun Mountains, Qinghai Province, and its significance. *Mineral Deposits*, 25(Suppl.): 427 - 430 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YT, Tian JC, Bai SH, Yu CL, Zhang X, Xiao L and Cao TS. 2009. Lithofacies palaeogeography of the Carboniferous-Triassic in Qinghai Province. *Journal of Palaeogeography*, 11(4): 384 - 392 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈亮, 孙勇, 裴先治, 高明, 冯涛, 张宗清, 陈文. 2001. 德尔尼蛇绿岩⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据. *科学通报*, 46(5): 424 - 426
- 陈守建, 李荣社, 计文化, 赵振明, 刘荣丽, 贾宝华, 张振福, 王国灿. 2010. 昆仑造山带二叠纪岩相古地理特征及盆山转换探讨. *中国地质*, 37(2): 374 - 393
- 丰成友, 马圣钊, 李国臣, 王松, 舒晓峰. 2011a. 青海景忍-迎庆沟多金属矿床成因的成岩成矿年代学约束. *矿物学报*, (增刊1): 576 - 577
- 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 张爱奎, 肖晔, 刘建楠, 马圣钊, 李国臣, 李大新. 2011b. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1806 - 1817
- 高永宝, 李文渊, 马晓光, 张照伟, 汤庆艳. 2012. 东昆仑杂林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约. *兰州大学学报(自然科学版)*, 48(2): 36 - 47
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 李侃, 李东生, 何书跃, 张照伟, 张江伟. 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. *岩石学报*, 30(6): 1647 - 1665
- 何书跃, 李东生, 李良林, 祁兰英, 何寿福. 2009. 青海东昆仑鸭子沟斑岩型铜(钼)矿区辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 33(2): 236 - 242
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 朱志直, 赵明, 柴耀楚. 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 刘战庆, 陈国超, 陈有妍, 魏方辉, 高景民, 刘成军, 裴磊. 2012. 东昆仑东段晚古生代-中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应. *地学前缘*, 19(5): 244 - 254
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 于浦生, 赵振明, 陈守建, 孟勇, 潘晓平, 史秉德, 张维吉, 李行, 洛长义. 2008. 昆仑山及邻区地质. 北京: 地质出版社, 1 - 400
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 刘振宏, 赵俊伟, 李玉春, 王松. 2008. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成矿年代学研究. *地质学报*, 82(7): 949 - 955
- 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 李述为, 赵欣. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因. *地质通报*, 21(11): 739 - 744
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 张雪亭, 许国武. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(10): 2457 - 2463
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 黄雄飞, 于峻川. 2014. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义. *岩石学报*, 30(11): 3229 - 3241
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. *地质通报*, 21(6): 292 - 297
- 马昌前, 熊富浩, 张金阳, 刘彬, 黄坚, 蒋红安. 2013. 从板块俯冲到造山后阶段俯冲板片对岩浆作用的影响: 东昆仑早二叠世-晚三叠世镁铁质岩墙群的证据. *地质学报*, 87(增刊): 79 - 81
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403 - 414
- 田承盛, 丰成友, 李军红, 曹德智. 2013. 青海它温查汉铁多金属矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究及意义. *矿床地质*, 32(1): 169 - 176
- 肖龙, Rapp R, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. *岩石学报*, 20(2): 219 - 228
- 王富春, 陈静, 谢志勇, 李善平, 谈生祥, 张玉宝, 王涛. 2013. 东昆仑拉陵灶火铜多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素定年. *中国地质*, 40(4): 1209 - 1217
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 刘彬. 2011. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学. *岩石学报*, 27(11): 3350 - 3364
- 熊富浩. 2014. 东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布、岩

- 石成因及其地质意义. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 吴才来. 2007. 造山的高原: 青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社, 1-458
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 李化启, 蔡志慧, 闫臻, 马昌前. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. 岩石学报, 29(6): 1847-1860
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 许志琴, 吴才来. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳. 中国地质, 31(3): 225-239
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 史仁灯. 2005. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系. 岩石矿物学杂志, 24(5): 369-380
- 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 吴才来, 张建新, 王宗起, 王国灿, 张宏飞, 董云鹏, 赖绍聪. 2010. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题. 中国地质, 37(1): 1-11
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点. 地球科学, 23(5): 438-442
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录. 地质论评, 46(2): 203-211
- 曾令森, 刘静, Saleeby JB. 2006. 大型花岗岩基形成和演化的深部动力学过程: 滴水构造、钾质火山作用与地表地质过程. 地质通报, 25(11): 1257-1273
- 赵财胜, 杨富全, 代军治. 2006. 青海东昆仑肯德可克钴铋金矿床成矿年龄及意义. 矿床地质, 25(增刊): 427-430
- 朱迎堂, 田景春, 白生海, 余存莲, 张翔, 肖玲, 曹桐生. 2009. 青海省石炭纪-三叠纪岩相古地理. 古地理学报, 11(4): 384-392