

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.397>



西藏东南缘早二叠世长英质凝灰岩 锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征

麦源君¹,朱利东^{1*},杨文光¹,解龙¹,童霞¹,郝金月²,钟摇¹

1. 成都理工大学沉积地质研究院,四川成都 610059

2. 成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059

摘要:西藏东南缘记录的唐加-松多古特提斯增生杂岩带对认识古特提斯洋晚古生代的构造演化提供了新的证据。针对该杂岩带中新发现的长英质凝灰岩开展了全岩主、微量元素,锆石LA-ICP-MS U-Pb定年和锆石Hf同位素组成的研究。结果显示冲尼凝灰岩喷发于278~275 Ma,具有较高的SiO₂含量(63.47%~72.65%)、Al₂O₃含量(14.53%~21.31%),较低的K₂O含量(1.30%~2.51%)和TiO₂含量(0.50%~1.17%),MgO含量较低,介于0.92%~2.00%,Mg[#]范围在19.9~34.2(均低于40)。富集大离子亲石元素(LILE)、亏损高场强元素(HFSE)。锆石具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+10.2~+14.4)和相对年轻的地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{c}}=351\text{--}621\text{ Ma}$,认为冲尼凝灰岩是唐加-松多古特提斯洋向北俯冲背景下的新生地壳部分熔融的产物,洋盆俯冲消减的开始时代不晚于早二叠世,并且在早二叠世拉萨地体东南缘存在新生地壳生长事件。

关键词:早二叠世;拉萨地体;Hf同位素;U-Pb年龄;唐加-松多古特提斯;岩石学。

中图分类号: P548;P581

文章编号: 1000-2383(2021)11-3880-12

收稿日期:2020-11-21

Zircon U-Pb and Hf Isotopic Composition of Permian Felsic Tuffs in Southeastern Margin of Lhasa, Tibet

Mai Yuanjun¹, Zhu Lidong^{1*}, Yang Wenguang¹, Xie Long¹, Tong Xia¹, Hao Jinyue², Zhong Yao¹

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

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

Abstract: The Tangjia-Sumdo Paleo-Tethys accretionary complex belt, recorded in the southeastern margin of Lhasa, provides new evidence for the understanding of the Late Paleozoic tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean. In this paper, it reports new data for the felsic tuff in this accretionary complex belt, including petrology, major and trace element compositions, zircon U-Pb age, and in-situ Hf isotopic compositions. U-Pb zircon dating indicates that the timing of eruption of the Chongni tuffs was ca. 278–275 Ma. They are characterized by relatively high SiO₂ (63.47%–72.65%), and high Al₂O₃ (14.53%–21.31%), relatively low K₂O (1.30%–2.51%), TiO₂ (0.50%–1.17%), MgO (0.92%–2.00%), and Mg[#] (19.9–34.2). These tuffs exhibit LILE enrichment and HFSE depletion. The zircons participating in the weighted age calculation have positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of +10.2 to +14.4 and relatively young zircon Hf crustal model ages ($T_{\text{DM}}^{\text{c}}=351\text{--}621\text{ Ma}$). It agrees that Chongni tuffs were derived from the partial melting of the juvenile crust under the background of the northward subduction of the Tangjia-Sumdo Paleo-Tethys Ocean slab, and the beginning time of the ocean slab subduction is not later than Early Permian, before which there

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41972118);冈底斯—喜马拉雅铜矿资源基地调查项目(No.DD20160015)。

作者简介:麦源君(1995—),男,博士研究生,古生物学与地层学专业。ORCID: 0000-0001-8830-0400. E-mail: maiyuanjun@126.com

*通讯作者:朱利东, ORCID: 0000-0001-5047-0017. E-mail: zhuld@cdut.edu.cn

引用格式:麦源君,朱利东,杨文光,等,2021.西藏东南缘早二叠世长英质凝灰岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征.地球科学,46(11):3880–3891.

were the events that crust grew in the southeastern margin of Lhasa.

Key words: Early Permian; Lhasa terrane; Hf isotope; U-Pb age; Tangjia-Sumdo Paleo-Tethys; petrology.

位于冈瓦纳大陆与劳亚大陆之间的古特提斯洋(Zhu *et al.*, 2013),其形成与演化改变了晚古生代全球尺度的海陆格局,青藏高原内部因记录了古特提斯洋盆演化有关的沉积盆地、构造-岩浆作用而备受地学界关注(Cawood *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2011a; Zhai *et al.*, 2016).龙木措-双湖-澜沧江缝合带作为青藏高原发育重要的晚古生代缝合带,在过去几十年间,报道了该带保存了原、古特提斯洋洋壳残余、俯冲消减的各类岩石,代表了青藏高原古特提斯大洋发育的主洋盆,其发育演化时代为晚寒武世-晚三叠世(李才, 1987; 李才等, 2008; 吴彦旺, 2013; Zhai *et al.*, 2016; Fan *et al.*, 2017).但自杨经绥等(2006)在松多地区发现榴辉岩后,改变了原有的古特提斯演化格局,将古特提斯洋的构造域从羌塘延伸到拉萨地体(Liu *et al.*, 2020),使其近年成为国内外学者研究的热点(李化启等, 2008; Yang *et al.*, 2009; Zhang and Tang, 2009; 董昕等, 2010; 董昕和张泽明, 2013; 吴兴源等, 2013; Weller *et al.*, 2016; 郎兴海等, 2017; Wang *et al.*, 2019).尽管松多地区的超高压-高压变质岩有着较为深入探讨(Li *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2009, 2020; Yang *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2012, 2015; Weller *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019),但与大洋演化直接相关的蛇绿混杂岩及增生杂岩研究较为薄弱.此外,整个拉萨地体二叠纪报道大部分基性火山岩是利用地层对比与化石来确定时代(耿全如等, 2007; 王立全等, 2008; Zhu *et al.*, 2010),有精确年龄约束的二叠纪岩浆岩仅在鸭洼地区与唐加-松多-布久等地有报道(Zhu *et al.*, 2009; 李奋其等, 2012; 牛志祥, 2019; Wang *et al.*, 2019, 2021; 李楠等, 2020; 于云鹏, 2020),这使得不同学者对拉萨地体二叠纪时期的构造背景还存在不同的认识.新一轮的1:5万区域地质调查资料确立了位于拉萨地体东南缘的唐加-松多古特提斯增生杂岩带,该带保存了相对完整的与古特提斯洋演化以及洋陆转换相关的混杂岩(李光明等, 2020; 解超明等, 2020),新识别出了晚古生代蛇绿混杂岩(王斌等, 2017)、中二叠世洋岛残片(Wang *et al.*, 2019)、中二叠世岛弧岩浆岩(李楠等, 2020; 于云鹏, 2020; Wang *et al.*, 2021)以及晚三叠世-早侏罗世岛弧火山岩(李光明等, 2020)等关键地质体.这为研究古特提斯洋的

演化提供了有利的约束,同时也对拉萨地体二叠纪的演化具有重要的指导意义.最近,笔者在唐加乡地区冲尼村附近首次发现一处早二叠世长英质凝灰岩的露头,本文对其锆石 U-Pb 年龄、全岩主微量地球化学以及锆石 Hf 同位素组成开展研究,并且在综合区域资料对比基础上,探讨唐加-松多古特提斯早二叠世的俯冲消减作用以及与之相关的地壳生长.

1 地质背景与岩石特征

青藏高原自北向南由一系列构造块体拼合而成,主要以东昆仑缝合带、金沙江缝合带、龙木措-双湖-澜沧江缝合带、班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布缝合带为界划分成松潘-甘孜地体、羌北-昌都地体、羌南-保山地体、拉萨地体和喜马拉雅地体(图1a)(Yin and Harrison, 2000; Xu *et al.*, 2015).其中,拉萨地体夹持于班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布缝合带之间,以往的研究以狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带和洛巴堆-米拉山断裂带为界,由北向南分为北部拉萨地体、中部拉萨地体和南部拉萨地体(Zhu *et al.*, 2008).南部拉萨地体主要以新生地壳为主,出露了白垩纪-第三纪冈底斯岩基和古近系林子宗火山岩,三叠纪-白垩纪火山-沉积地层主要分布在其东部;中部拉萨地体代表一个微大陆与前寒武纪结晶基底岩石,覆盖了寒武系-二叠系沉积岩和上侏罗统-下白垩统火山岩;北部拉萨地体整体也主要是新生地壳而非古老的改造地壳,中-上三叠统沉积岩被中侏罗统碎屑岩不整合覆盖,主要分布在其东部,而下白垩统地层沿着其走向广泛发育(Zhu *et al.*, 2008, 2010).

基于松多榴辉岩的发现,表明拉萨地体内部发育了一条唐加-松多古特提斯增生杂岩带(杨经绥等, 2006; 李光明等, 2020),该带东缘与洛巴堆-米拉山断裂带近乎重叠展布,而后有学者以这条晚古生代杂岩带为界将拉萨地体划分为南、北地体(Zhang *et al.*, 2014).本文研究区位于拉萨市东北墨竹工卡县唐加乡一带,出露的地质单元主要包括石炭-二叠系松多岩组(C-Ps)、上三叠统-下侏罗统火山-沉积地层雄来组(T₃J_{1x})和渐新统日贡拉组(E₃r)以及俯冲增生杂岩和中-新生代岩浆岩(图1b).其中松

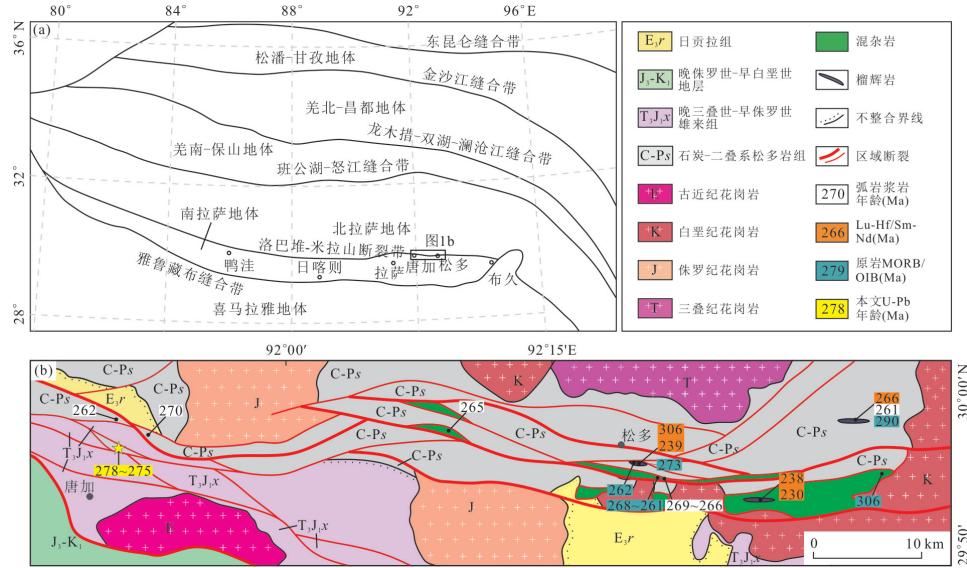


图1 青藏高原地质简图以及唐加-松多地区地质简图

Fig.1 Tangjia-Sumdo geological map in the Gangdese, Tibet

a. 青藏高原构造单元划分简图(李才等, 2008; Zhang *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015); b. 唐加-松多地区地质简图。数据来源: 陈松永等(2008); Yang *et al.* (2009); 曾令森等(2009); Cheng *et al.* (2012, 2015); Weller *et al.* (2016); Wang *et al.* (2019, 2021); 李楠等(2020); 于云鹏(2020)

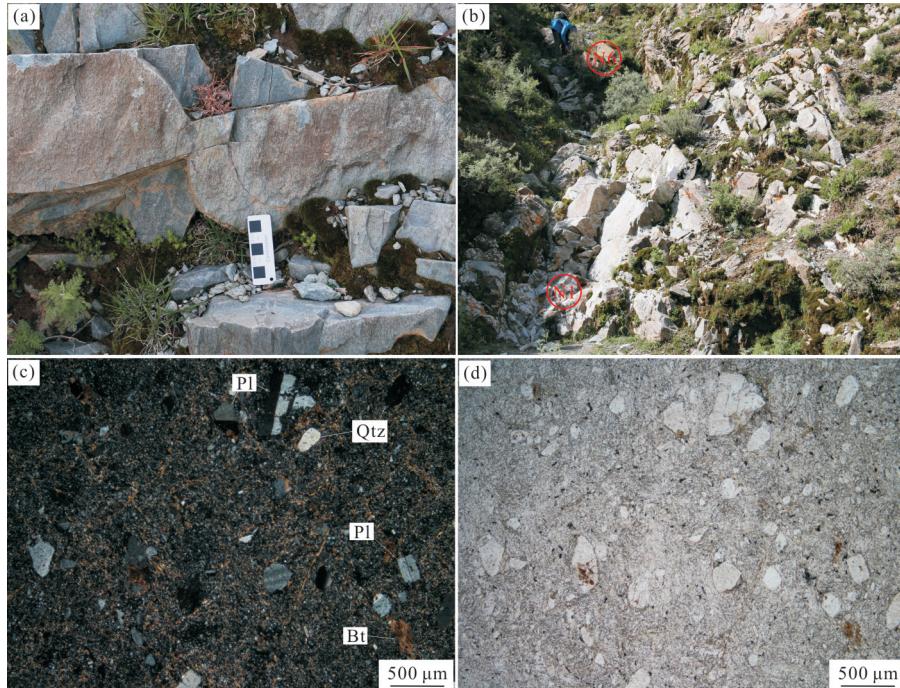


图2 冲尼凝灰岩野外照片(a, b)和镜下特征(c, d)

Fig.2 Field images (a, b) and micrographs (c, d) of Chongni tuffs

b. 采样点位; N1.D0021-N1; N6.D0021-N6. Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母

多岩组为一套局部有序、宏观无序的地质体, 其岩石组合主要为变质石英砂岩、白云母石英片岩, 局部夹薄层中基性火山岩; 雄来组为角度不整合于石炭-二叠系松多岩组之上的碎屑岩与火山岩组合。

本文研究的长英质凝灰岩出露于唐加乡冲尼村以西, 岩石整体呈灰绿色、灰白色, 具凝灰结构, 块状构造(图 2a), 岩石致密坚硬, 可见厚度约为 15 m(图 2b), 整体呈透镜体状与雄来组浅变

质灰岩围岩断层接触。显微岩石学观察显示冲尼凝灰岩主要由晶屑、火山灰胶结物组成,具有典型的火山碎屑结构,玻屑与岩屑均不发育。晶屑含量整体约为 15%~30%,大小在 0.05~2 mm,成分主要为石英、斜长石,以及少量黑云母,故定名为长英质凝灰岩;晶屑多呈港湾状、棱角-次棱角状,未见来自沉积岩或岩浆岩的岩屑,推测冲尼凝灰岩未经历长距离的搬运,为火山喷发后原地堆积形成;胶结物为火山灰,主要由粒径 <0.05 mm 的长英质矿物组成,见部分铁质矿物析出,呈他形粒状分布于胶结物之中(图 2c, 2d)。

2 分析方法

本次野外采样工作尽量选择新鲜样品,经过室内洗净并晾干后备用。样品的无污染碎样在河北廊坊市(宇能)宇恒矿岩技术服务有限公司完成,主量元素和微量元素的测试在武汉上谱分析科技有限公司实验室完成,其中主量元素用 XRF 法测定,微量元素采用等离子质谱仪 ICP-MS (Agilent 7700e) 测定,分析精度优于 5%~10%。

锆石分选在河北廊坊市(宇能)宇恒矿岩技术服务有限公司完成,首先对样品进行破碎、淘洗、电磁和重液分选,而后在双目镜下挑选出晶形符合条件的锆石颗粒。在北京锆年领航科技有限公司实验室进行了锆石的制靶、透射光和反射光显微照相、阴极发光(CL)显微照相以及锆石微量元素和 LA-ICP-MS 微区原位 U-Pb 同位素、Hf 同位素分析。锆石 U-Pb 同位素采用的分析仪器为激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS, Agilent 7900 型),激光剥蚀平台为 Resolution SE 型,利用 193 nm 深紫外激光进行剥蚀,剥蚀直径采用 30 μm ,能量密度为 2 J/cm²,频率为 5 Hz,以锆石 91500 作为校正标样,GJ-1 作为检测标样,锆石微量元素测定以 NIST 610 作为外标,⁹¹Zr 作为内标计算含量,数据采用 Iolite 程序处理(Paton *et al.*, 2010)。

锆石 Hf 同位素测试在锆石完成定年后进行,所有的 Hf 同位素分析点均位于相同锆石 U-Pb 测试点同一位置。利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪,系统为 NWR213nm 固体激光器,仪器运行条件及分析方法详见文献(Hu *et al.*, 2012)。激光剥蚀物质以 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 20 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,能量密度为 5 J/cm²,频率为 8 Hz,测定时使用锆石国际标样 Plešovice 作

为参考物质。分析过程中锆石标样 Plešovice 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282 479 3 \pm 0.000 004 (2σ , $n=15$),与文献中标的测试值在误差范围内完全一致(Sláma *et al.*, 2008)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄与微量元素

本文对冲尼地区的两件凝灰岩(D0021-N1、D0021-N6)(图 1b)进行了锆石 U-Pb 定年与稀土元素测定,分析结果分别列于附表 1、附表 2 中。样品 D0021-N1、D0021-N6 分别各获取了 25 个锆石年龄测点,其稀土元素含量普遍偏高(D0021-N1: $\Sigma\text{REE}=728\sim7\ 030\ \mu\text{g/g}$; D0021-N6: $\Sigma\text{REE}=587\sim2\ 674\ \mu\text{g/g}$)。在球粒陨石标准化配分图中,轻、重稀土分馏明显,具有 Ce 的正异常和 Eu 的负异常(图 3b, 3d),呈典型的火成岩锆石稀土元素配分模式;此外,锆石颗粒无色透明呈半自形晶,在 CL 图像中呈现规则的韵律环带,颗粒粒度较小(粒径一般 <100 μm)(图 4),且具有较高的 Th/U 比值(0.29~1.57),显示典型的岩浆成因锆石特征(Hoskin and Black, 2000)。剔除不谐和的年龄后,D0021-N1 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 278.0 \pm 3.5 Ma (2σ , MSWD=3.1, $n=8$)(图 3a, 3b);D0021-N6 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 275.6 \pm 0.9 Ma (2σ , MSWD=0.54, $n=12$)(图 3c, 3d),两件凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内相近,说明冲尼凝灰岩喷发于早二叠世。除此之外两件凝灰岩中均存在年龄值较老的锆石:D0021-N1 中存在 302~289 Ma、326~320 Ma、372~363 Ma 的锆石年龄,D0021-N6 中具有 302~291 Ma、318~313 Ma、460 Ma 的锆石年龄,这些锆石没有发现明显的磨圆,部分锆石为次棱角状、边部具熔蚀边或存在吸收现象(例如测点:D0021-N1-11、D0021-N1-12、D0021-N1-25, D0021-N6-6、D0021-N6-11、D0021-N6-12、D0021-N6-14、D0021-N6-15 等)(图 4),锆石的形态特征也显示出未经历过长距离的搬运。其次,岩石显微特征呈现以晶屑为主、未见岩屑的特点,而晶屑一般是由早期结晶的斑晶崩碎或火山通道的围岩岩石炸碎后形成。合理地推测冲尼凝灰岩的中酸性母质岩浆熔体在上升的过程中捕获了早期岩浆作用形成的锆石,岩浆喷发后随着火山灰就近堆积在火山口附近。

3.2 锆石 Hf 同位素

针对冲尼村的两件凝灰岩,共计 39 颗锆石进行

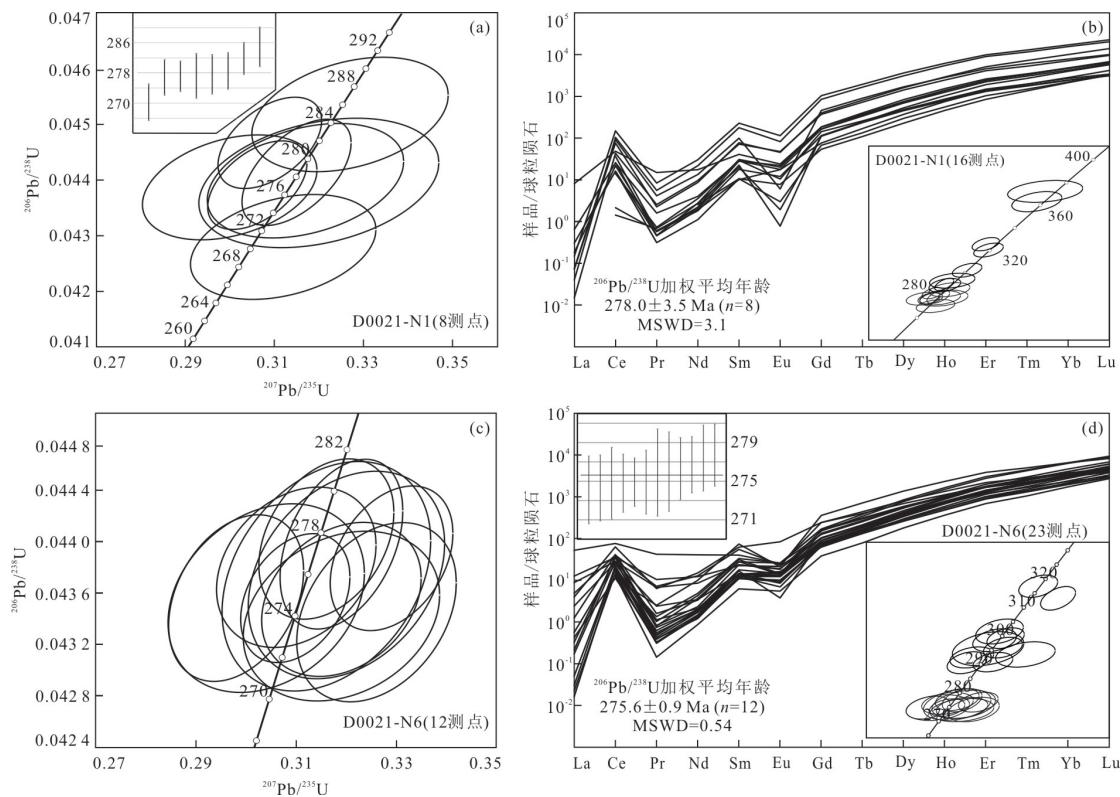


图3 冲尼凝灰岩锆石的U-Pb年龄谐和图(a, c)和锆石球粒陨石标准化稀土配分图(b, d)

Fig.3 U-Pb concordia diagrams (a, c) of the analyzed zircon and zircon chondrite-normalized REE patterns (b, d) in Chongni tuffs

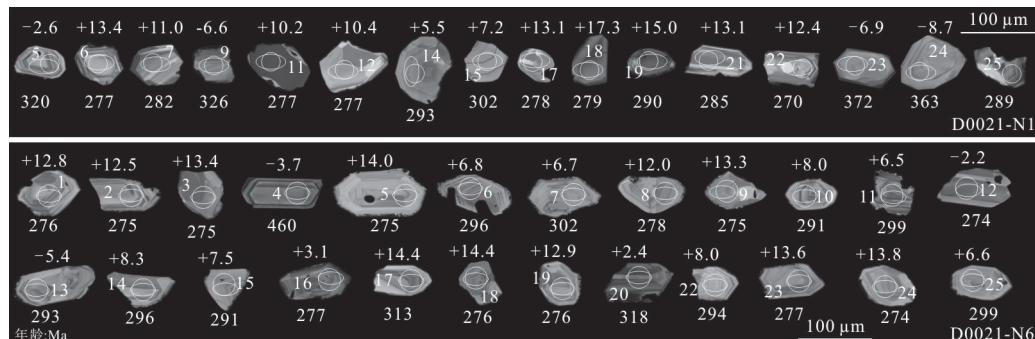


图4 冲尼凝灰岩锆石的阴极发光图像

Fig.4 Zircon CL images of the analyzed zircon in Chongni tuffs

了原位 Hf 同位素的分析(附表 3). $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值根据同一锆石 U-Pb 年龄值计算, 整体 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.028~0.07~0.336 和 0.000~0.789~0.009~0.060. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值范围为 0.282~0.517~0.283~0.137. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -8.7~+15.0; 其中参与锆石加权年龄(年龄范围为 270~285 Ma)计算的测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +10.2~+14.4, 具有相对年轻的地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{c}}=351\sim621 \text{ Ma}$, 捕获锆石(290~460 Ma)的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -8.7~+15.0, 整体地壳模式年龄 $T_{\text{DM}}^{\text{c}}=324\sim1894 \text{ Ma}$. 以上均为排除其中测点 D0021-N1-

18 的结果(模式年龄小于结晶年龄).

3.3 岩石地球化学特征

冲尼早二叠世凝灰岩的全岩主微量元素测试结果见附表 4. 样品主量元素中 SiO_2 含量变化于 63.47%~72.65%, TiO_2 含量为 0.50%~1.17%, 有较高的 Al_2O_3 含量(14.53%~21.31%), 有较高铝饱和指数($A/\text{CNK}=1.07\sim4.72$, 平均值为 1.81), 属过铝质岩石. MgO 含量较低, 介于 0.92%~2.00%, $\text{Mg}^{\#}$ 范围在 19.9~34.2(均低于 40), 使用针对蚀变火山岩分类有效的图解($\text{Zr}/\text{TiO}_2\text{-Nb/Y}$ 、 Th-Co 图解)进行判别, 样品落在安山岩和安山岩

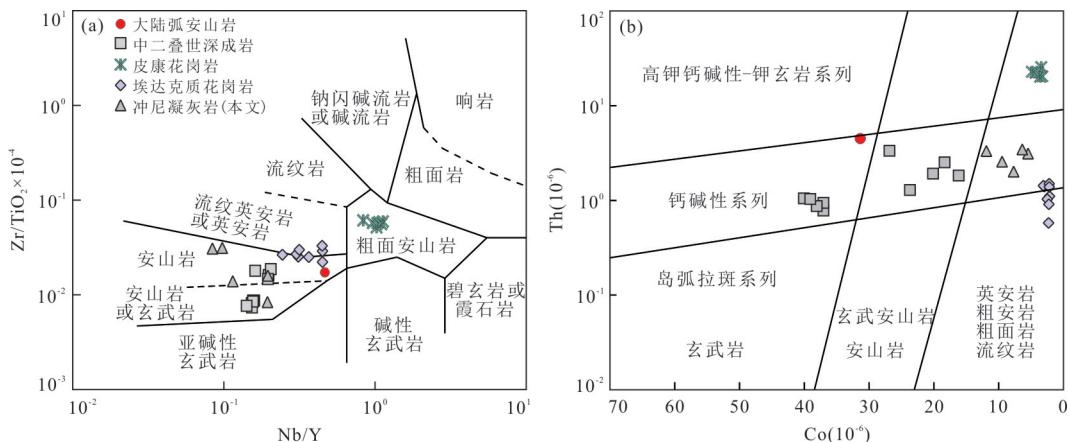


图5 冲尼凝灰岩岩石判别图

Fig.5 Classification diagrams of Chongni tuffs

a. Zr/TiO_2 -Nb/Y图解,据Winchester and Floyd(1977);b. Th-Co图解,据Hastie *et al.* (2007).数据来源:大陆平均弧安山岩(Kelemen *et al.*, 2007);中二叠世深成岩(李楠等, 2020;于云鹏, 2020);埃达克质花岗岩(Wang *et al.*, 2021);皮康花岗岩(Zhu *et al.*, 2009)

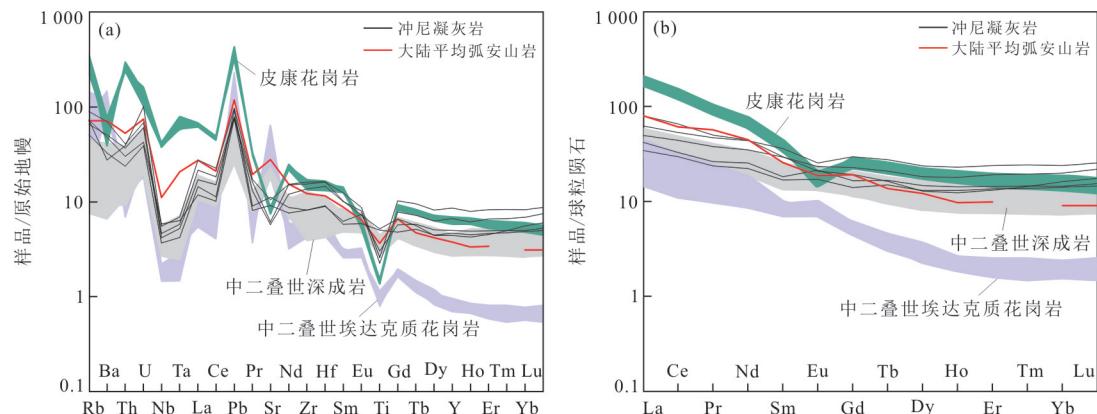


图6 原始地幔标准化微量元素蛛网图及球粒陨石标准化稀土分带图

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element spidergram and chondrite-normalized REE pattern

标准化数据引自Sun and McDonough(1989).数据引用参看图5

或玄武岩内(图5a),属于钙碱性系列(图5b).

冲尼凝灰岩在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6a)上明显富集Rb、Ba、Th、U、K等大离子亲石元素(LILEs),并且强烈亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSEs).其次在球粒陨石稀土元素配分图(图6b)上轻、重稀土元素分馏作用较弱($(La_N/Yb_N)=2.04\sim4.95$),具有不同程度的轻微正和负Eu异常($\delta Eu=0.77\sim1.23$),表明斜长石分离结晶作用或源区斜长石的残留不明显.

4 讨论

4.1 岩浆源区与构造背景

锆石Hf同位素可以很好地反映岩浆源区特征(Griffin *et al.*, 2000),冲尼凝灰岩具有正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值

(+10.2~+14.4),与研究区时代相近的深成岩的锆石Hf同位素组成具有很高的相似度($\varepsilon_{Hf}(t)=+12.2\sim+12.8$,于云鹏, 2020; $\varepsilon_{Hf}(t)=+13.8\sim+15.7$, Wang *et al.*, 2021),不同于早二叠世布久中基性岩浆岩($\varepsilon_{Hf}(t)=-2.7\sim+0.1$)(牛志祥, 2019)和中二叠世皮康花岗岩($\varepsilon_{Hf}(t)=-4.5\sim+1.9$)(Zhu *et al.*, 2009).对于正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值,目前存在3种不同的解释:(1)变质作用的影响.锆石受变质作用形成残留锆石、重结晶锆石和新生的变晶锆石(吴福元等, 2007),其中新生的变晶锆石周围的流体/矿物对其Hf同位素组成有重要的影响(吴福元等, 2007).当变质锆石结晶时源区存在石榴石,会导致锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值明显升高,出现相对较高的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(Zheng *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2006),从野外和室内镜下观察并未发现凝灰岩存在明显的变质,

且锆石都具较高的 Th/U 比值、火成岩稀土配分特征和韵律环带, 可以排除变质产生的影响。(2) 亏损地幔来源的岩浆直接结晶分异。部分学者认为地幔玄武质岩浆可以直接结晶分异出少量的花岗质岩浆(Grove and Donnelly-Nolan, 1986; Bacon and Druitt, 1988), 事实上最多形成相当于高镁安山岩成分的岩浆(Hofmann, 1988), 冲尼凝灰岩具有较高的 SiO₂ 含量(63.47%~72.65%), 这只有在地幔极低部分熔融的条件下形成, 产生的少量熔体难以聚集上涌并出现岩浆喷发, 故不太可能是亏损地幔来源。(3) 新生(juvenile)地壳的部分熔融。Hf 同位素常用来区别以陆壳再循环为主或以新生地壳生长为主的造山过程(Collins *et al.*, 2011), 俯冲作用会逐渐移除掉古老的下地壳, 地幔楔派生的新生地壳会持续增加, 与俯冲相关的岩浆活动也会呈现出 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值越来越大的特征(Collins *et al.*, 2011), 冲尼凝灰岩具有较正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 明显不同于古老地壳的特征(即较负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)。其较为年轻的地壳模式年龄($T_{\text{DM}}^{\text{c}}=351\sim621 \text{ Ma}$), 表明具有

相对年轻的岩浆来源, 加之相对低的 Mg[#] 值(19.9~34.2)也反映壳源特征, 故笔者认为冲尼凝灰岩应来自于新生地壳的部分熔融。

岩浆岩锆石中微量元素(如 Y、Th、U、Nb、Ta)能很好地反映其岩石类型和结晶环境(Heaman *et al.*, 1990; Belousova *et al.*, 2002), 常被用于判别其形成的大地构造背景(Belousova *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2012)。通过统计大量的岩浆岩锆石微量元素特征, 利用 Y-Yb/Sm 与 Y-U 图解区分出几种不同类型的锆石微量元素特征组合(Belousova *et al.*, 2002), 本文样品落入花岗岩类与镁铁质岩重叠区内(图 7a, 7b)。其次锆石总稀土元素含量都偏高(D0021-N1: ΣREE = 728~7 030 μg/g; D0021-N6: ΣREE = 587~2 674 μg/g), 与 Belousova *et al.*(2002)报道的花岗岩中锆石微量元素特征相当, 表明其更可能为花岗岩类锆石。在此基础上, 利用锆石中微量元素的 Th、U、Nb、Hf 来约束其构造背景(Yang *et al.*, 2012), 样品均落入岩浆弧区域(图 7c, 7d)。此外, 冲尼凝灰岩在原始地幔标准化微量

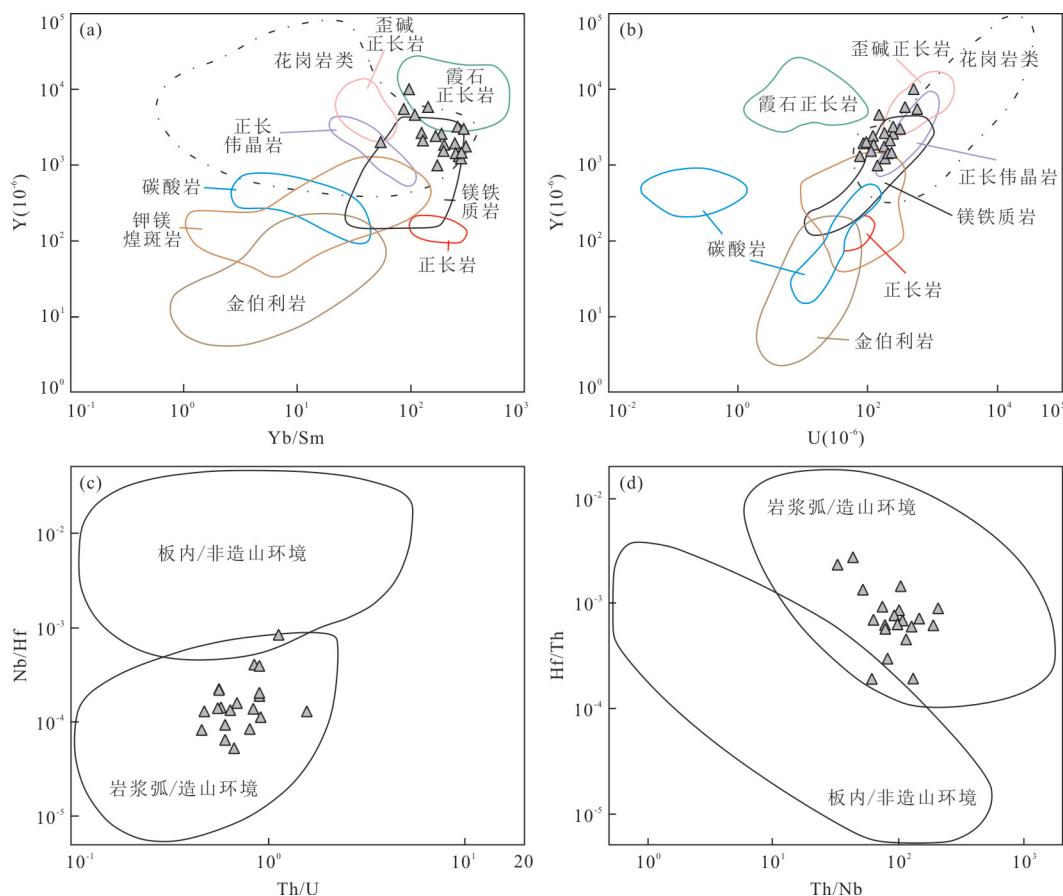


图 7 冲尼凝灰岩锆石微量元素特征判别图

Fig.7 Zircon trace element plots of Chongni tuffs

a, b. 据 Belousova *et al.* (2002); c, d. 据 Yang *et al.* (2012)

元素蛛网图(图6a)和球粒陨石稀土元素配分图(图6b)上具有明显的岛弧特征,如强烈亏损Nb、Ta、Ti,与典型的大陆平均原始弧安山岩特征相似(Kelemen *et al.*, 2007),但在大陆岛弧、活动大陆边缘以及同碰撞环境都能显示这种特征。根据松多地区榴辉岩273~260 Ma的峰期变质年龄,表明该时段洋盆发生一期深俯冲作用(陈松永等,2008; Yang *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2012; Weller *et al.*, 2016)。冲尼凝灰岩喷发于278~275 Ma与松多榴辉岩进变质年龄相仿,且两者处于同一构造带内相距约50 km,可以排除同碰撞的环境;而后出现与岛弧相关的镁铁质岩浆活动(270 Ma, 李楠等,2020)、埃达克质花岗岩(269~266 Ma, Wang *et al.*, 2021)以及闪长质岩浆活动(262 Ma, 于云鹏, 2020),表明早-中二叠世唐加-松多地区处于洋壳俯冲消减的大地构造背景。综上笔者认为冲尼凝灰岩形成于古特提斯洋俯冲背景下新生地壳部分熔融的大陆岛弧环境。

4.2 唐加-松多古特提斯洋俯冲时限与地壳生长

前人研究表明,唐加-松多古特提斯杂岩带中发现原岩为洋壳玄武岩的榴辉岩(306 Ma, 全岩Sm-Nd, Li *et al.*, 2009; 290 Ma, 锆石U-Pb, Cheng *et al.*, 2012),以及洋岛玄武岩(306 Ma, 陈松永, 2008),说明洋盆在晚石炭世-早二叠世早期就已经打开。冲尼凝灰岩喷发年龄为278~275 Ma以及松多榴辉岩存在273 Ma的进变质年龄(Weller *et al.*, 2016),表明唐加-松多古特提斯洋俯冲不会晚于早二叠世。其次,上述冲尼凝灰岩形成于古特提斯洋俯冲背景下新生地壳部分熔融的岛弧环境,样品中捕获的锆石年龄在290~460 Ma的测点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-8.7~+15.0,其地壳模式年龄 T_{DM}^{c} =324~1 894 Ma,整体跨度较大,合理的解释是新生地壳主要是来源于板块汇聚边缘,洋壳的俯冲导致地幔楔的部分熔融,从而引发弧岩浆作用形成新生地壳;进一步的俯冲形成流体向上运移或岩浆底侵使得新生地壳形成后便很快又部分熔融,形成长英质熔体,而俯冲作用引发的新生地壳部分熔融带来的时空变化差异,使得唐加-松多杂岩带中与弧岩浆有关的锆石整体呈现出 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值随着锆石结晶年龄变年轻而变正的趋势(图8),这表明在早二叠世拉萨地体东南缘就已经开始发育新生地壳,出现地壳生长事件。

再者,温木朗洋岛残片(268~260 Ma)表明中

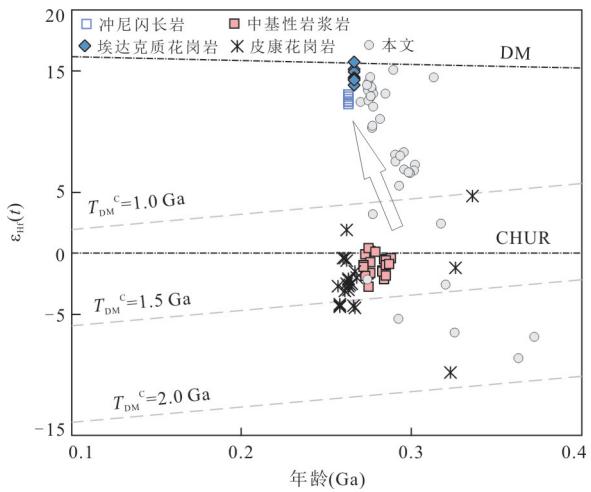


图8 冲尼凝灰岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -锆石年龄图

Fig.8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age diagram of Chongni tuffs

数据来源于Zhu *et al.*(2009);牛志祥(2019);于云鹏(2020);Wang *et al.*(2021)

二叠世唐加-松多古特提斯洋还存在洋盆(Wang *et al.*, 2019)。松多榴辉岩识别出原岩为N-MORB型玄武质岩浆,全岩Sm-Nd等时线年龄为239±3.5 Ma,榴辉岩作为俯冲折返的产物,暗示着中三叠世晚期还存在着洋壳俯冲事件(曾令森等,2009)。白朗榴辉岩研究表明其原岩为OIB型玄武质岩浆,并提出唐加-松多古特提斯洋不会早于230 Ma关闭(Cheng *et al.*, 2015)。综上表明唐加-松多古特提斯洋至少从晚石炭世一直演化到晚三叠世。此外,唐加-松多增生杂岩带北侧发育以古老地壳为基底的晚古生代火山-沉积地层(王立全等,2008),而南侧南拉萨地体主要是以新生地壳为主(Zhu *et al.*, 2011b),缺乏前寒武纪基底。从石炭-二叠纪到早中生代的弧岩浆岩显示不断向南迁移的趋势,并且带内发育倾向北的多期次透入性面理构造(李光明等,2020),故笔者认为唐加-松多古特提斯洋俯冲极性为向北俯冲。

最近发现唐加-松多增生杂岩带内发育了不整合于晚古生代混杂岩之上的晚三叠世-早侏罗世沉积-火山盆地(雄来组),表明该地区存在晚三叠世的造山作用,但不能简单地认为是古特提斯洋闭合造山。因为雄来组出露大量具弧火山岩特征的中基性火山岩夹层(以安山岩为主),正如前文提到,此类性质的岩石在大陆岛弧、活动大陆边缘以及同碰撞环境都能产出,这也可能代表了唐加-松多古特提斯洋于晚三叠世-早侏罗世还在俯冲,并且俯冲增生同样也会出现区域性角

度不整合(肖文交等, 2019)。因此, 唐加-松多古特提斯洋的闭合时限还需进一步研究。

5 结论

(1) 拉萨地体东南缘冲尼凝灰岩的锆石 U-Pb 测年结果显示, 其结晶年龄分别为 278.0 ± 3.5 Ma 和 275.6 ± 0.9 Ma, 形成时代为早二叠世。

(2) 冲尼长英质凝灰岩具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值、明显亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 表明其形成于唐加-松多古特提斯洋北向俯冲背景下的新生地壳部分熔融的岛弧环境。

(3) 拉萨地体东南缘在早二叠世就已经开始发育新生地壳, 存在地壳增长事件。

致谢: 感谢成都理工大学李博博士、李楠硕士、周豫硕士在野外工作中提供的帮助, 两位匿名审稿专家也提供了许多建设性的意见, 极大地改进了文章内容, 在此谨致谢忱!

附表见本刊官网 (<http://www.earth-science.net>)。

References

- Bacon, C. R., Druitt, T. H., 1988. Compositional Evolution of the Zoned Calcalkaline Magma Chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 224–256. <https://doi.org/10.1007/BF00402114>
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Cawood, P. A., Johnson, M. R. W., Nemchin, A. A., 2007. Early Palaeozoic Orogenesis along the Indian Margin of Gondwana: Tectonic Response to Gondwana Assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1/2): 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.006>
- Chen, S. Y., Yang, J. S., Xu, X. Z., et al., 2008. Study of Lu-Hf Geochemical Tracing and LA-ICPMS U-Pb Isotopic Dating of the Sumdo Eclogite from the Lhasa Block, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1528–1538 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, H., Liu, Y. M., Vervoort, J. D., et al., 2015. Combined U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and Ar-Ar Multichronometric Dating on the Bailang Eclogite Constrains the Closure Timing of the Paleo-Tethys Ocean in the Lhasa Terrane, Tibet. *Gondwana Research*, 28(4): 1482–1499. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.017>
- Cheng, H., Zhang, C., Vervoort, J. D., et al., 2012. Zircon U-Pb and Garnet Lu-Hf Geochronology of Eclogites from the Lhasa Block, Tibet. *Lithos*, 155: 341–359. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.09.011>
- Collins, W. J., Belousova, E. A., Kemp, A. I. S., et al., 2011. Two Contrasting Phanerozoic Orogenic Systems Revealed by Hafnium Isotope Data. *Nature Geoscience*, 4(5): 333–337. <https://doi.org/10.1038/ngeo1127>
- Dong, X., Zhang, Z. M., 2013. Genesis and Tectonic Significance of the Early Jurassic Magmatic Rocks from the Southern Lhasa Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1933–1948 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X., Zhang, Z. M., Geng, G. S., et al., 2010. Devonian Magmatism from the Southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2226–2232 (in Chinese with English abstract).
- Fan, J. J., Li, C., Xie, C. M., et al., 2017. Remnants of Late Permian-Middle Triassic Ocean Islands in Northern Tibet: Implications for the Late-Stage Evolution of the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 44: 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.020>
- Geng, Q. R., Wang, L. Q., Pan, G. T., et al., 2007. Volcanic Rock Geochemistry and Tectonic Implication of the Luobadui Formation on the Gangdese Zone, Xizang (Tibet). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2699–2714 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00343-9)
- Grove, T. L., Donnelly-Nolan, J. M., 1986. The Evolution of Young Silicic Lavas at Medicine Lake Volcano, California: Implications for the Origin of Compositional Gaps in Calc-Alkaline Series Lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(3): 281–302. <https://doi.org/10.1007/BF00572157>
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A., et al., 2007. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks Using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341–2357. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Heaman, L. M., Bowins, R., Crocket, J., 1990. The Chemical Composition of Igneous Zircon Suites: Implications for Geochemical Tracer Studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(6): 1597–1607. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90083-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90083-2)

- 10.1016/0016-7037(90)90394-Z
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314. [https://doi.org/10.1016/0016-821X\(88\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0016-821X(88)90132-X)
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K., Greene, A. R., 2007. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1–70. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03035-8>
- Lang, X.H., Tang, J.X., Deng, Y.L., et al., 2017. The First Discovery of Early Carboniferous Gabbro in Xiongcun Area on the Southern Margin of Lhasa Terrane, Tibet: Remnants of Paleo-Tethys Ocean? . *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5): 745–753 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., 1987. The Longmu Co-Shuanghu-Jitang Plate Suture and the Northern Boundary of Gondwanaland during Carboniferous and Permian. *Journal of Changchun Geological Institute*, 17(2): 155–166 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Dong, Y.S., Zhai, Q.G., et al., 2008. Discovery of Eopaleozoic Ophiolite in the Qiangtang of Tibet Plateau: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating and Its Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 31–36 (in Chinese with English abstract)
- Li, F.Q., Liu, W., Zhang, S.Z., et al., 2012. Chronology and Geochemical Characteristics of Yawa Mafic Complex in the Dajiacuo Area, Southern Gangdese. *Acta Geologica Sinica*, 86(10): 1592–1603 (in Chinese with English abstract)
- Li, G.M., Zhang, L.K., Wu, J.Y., et al., 2020. Reestablishment and Scientific Significance of the Ocean Plate Geology in the Southern Tibet Plateau, China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Li, H.Q., Cai, Z.H., Chen, S.Y., et al., 2008. The Indosinian Orogenesis Occurred in Lhasa Terrain and the Evidence from Muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1595–1604 (in Chinese with English abstract).
- Li, N., Zhu, L.D., Yang, W.G., et al., 2020. Discovery of the Middle Permian Island-Arc Basalt in the Chongni Area, Tibet and Its Tectonic Implication. *Geology and Exploration*, 56(4): 722–731 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. L., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2009. Geochemistry and Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Composition of Eclogite in the Lhasa Terrane, Tibet, and Its Geological Significance. *Lithos*, 109(3/4): 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.004>
- Liu, Y., Liu, H. F., Theye, T., et al., 2009. Evidence for Oceanic Subduction at the NE Gondwana Margin during Permo-Triassic Times. *Terra Nova*, 21(3): 195–202. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00874.x>
- Liu, Y. M., Li, S. Z., Xie, C. M., et al., 2020. Subduction-Collision and Exhumation of Eclogites in the Lhasa Terrane, Tibet Plateau. *Gondwana Research*. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.01.019>
- Niu, Z.X., 2019. Permian Magmatic Rocks in the Eastern End of the Gangdese Arc, and Their Cenozoic Metamorphism and Tectonic Significance (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Paton, C., Woodhead, J. D., Hellstrom, J. C., et al., 2010. Improved Laser Ablation U-Pb Zircon Geochronology through Robust Downhole Fractionation Correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06. <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., et al., 2008. Plešovice Zircon—A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, B., Xie, C. M., Dong, Y. S., et al., 2021. Middle Permian Adakitic Granite Dikes in the Sumdo Region, Central Lhasa Terrane, Central Tibet: Implications for the Subduction of the Sumdo Paleo-Tethys Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 205: 104610. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104610>

- Wang, B., Xie, C. M., Fan, J. J., et al., 2019. Genesis and Tectonic Setting of Middle Permian OIB - Type Mafic Rocks in the Sumdo Area, Southern Lhasa Terrane. *Lithos*, 324/325: 429—438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.11.015>
- Wang, B., Xie, C.M., Li, C., et al., 2017. The Discovery of Wenmulang Ophiolite in Songduo Area of the Tibetan Plateau and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 36(11): 2076—2081 (in Chinese with English abstract)
- Wang, L. Q., Pan, G. T., Zhu, D.C., et al., 2008. Carboniferous-Permian Island Arc Orogenesis in the Gangdise Belt, Tibet, China: Evidence from Volcanic Rocks and Geochemistry. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1509—1534 (in Chinese with English abstract).
- Weller, O. M., St-Onge, M. R., Rayner, N., et al., 2016. U-Pb Zircon Geochronology and Phase Equilibrium Modelling of a Mafic Eclogite from the Sumdo Complex of South-East Tibet: Insights into Prograde Zircon Growth and the Assembly of the Tibetan Plateau. *Lithos*, 262: 729—741. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.005>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X.Y., Wang, Q., Zhu, D.C., et al., 2013. Origin of the Early Carboniferous Granitoids in the Southern Margin of the Lhasa Terrane and Its Implication for the Opening of the Songdo Tethyan Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3716—3730 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2006. U-Pb, Hf and O Isotope Evidence for Two Episodes of Fluid-Assisted Zircon Growth in Marble-Hosted Eclogites from the Dabie Orogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14): 3743—3761. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.05.011>
- Wu, Y. W., 2013. The Evolution Record of Longmuco-Shuanghu-Lancang Ocean Cambrian-Permian Ophiolites (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W.J., Li, J.L., Song, D.F., et al., 2019. Structural Analyses and Spatio-Temporal Constraints of Accretionary Orogens. *Earth Science*, 44(5): 1661—1687 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C.M., Li, C., Li, G.M., et al., 2020. The Research Progress and Problem of the Sumdo Paleo-Tethys Ocean, Tibet. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(2): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Dilek, Y., Cao, H., et al., 2015. Paleo-Tethyan Evolution of Tibet as Recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 320—337. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.01.021>
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2012. Large Igneous Province and Magmatic Arc Sourced Permian-Triassic Volcanogenic Sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261/262: 120—131. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.018>
- Yang, J.S., Xu, Z.Q., Geng, Q.R., et al., 2006. A Possible New HP/UHP(?) Metamorphic Belt in China: Discovery of Eclogite in the Lasha Terrane, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1783—1792 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Li, Z. L., et al., 2009. Discovery of an Eclogite Belt in the Lhasa Block, Tibet: A New Border for Paleo-Tethys?. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(1): 76—89. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.04.001>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yu, Y.P., 2020. Permian-Jurassic Magmatism and Its Tectonic Significance in Sumdo Area, Southern Tibet (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L.S., Liu, J., Gao, L.E., et al., 2009. Early Mesozoic High-Pressure Metamorphism within the Lhasa Block, Tibet and Its Implications for Regional Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 140—151 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Wang, J., et al., 2016. Oldest Paleo-Tethyan Ophiolitic Mélange in the Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 128(3/4): 355—373. <https://doi.org/10.1130/b31296.1>
- Zhang, K. J., Tang, X. C., 2009. Eclogites in the Interior of the Tibetan Plateau and Their Geodynamic Implications. *Science Bulletin*, 54(15): 2556—2567. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0407-9>
- Zhang, Z. M., Dong, X., Santosh, M., et al., 2014. Meta-

- morphism and Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane, Central Tibet. *Gondwana Research*, 25(1): 170–189. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.024>
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Zhao, Z. F., et al., 2005. Metamorphic Effect on Zircon Lu-Hf and U-Pb Isotope Systems in Ultrahigh-Pressure Eclogite-Facies Metagranite and Metabasite. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 378–400. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.025>
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Dating and In-Situ Hf Isotopic Analysis of Permian Peraluminous Granite in the Lhasa Terrane, Southern Tibet: Implications for Permian Collisional Orogeny and Paleogeography. *Tectonophysics*, 469(1–4): 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.017>
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2010. Presence of Permian Extension- and Arc-Type Magmatism in Southern Tibet: Paleogeographic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7/8): 979–993. <https://doi.org/10.1130/b30062.1>
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Chung, S. L., et al., 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet. *International Geology Review*, 50(5): 442–471. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.50.5.442>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y., et al., 2011a. Lhasa Terrane in Southern Tibet Came from Australia. *Geology*, 39(8): 727–730. <https://doi.org/10.1130/g31895.1>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011b. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1/2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429–1454. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.002>
- 火山岩地球化学及构造意义. 岩石学报, 23(11): 2699–2714.
- 郎兴海, 唐菊兴, 邓煜霖, 等, 2017. 西藏拉萨地块南缘雄村矿集区首次发现早石炭世辉长岩: 古特提斯洋的残留?. 地球学报, 38(5): 745–753.
- 李才, 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界. 长春地质学院学报, 17(2): 155–166.
- 李才, 董永胜, 瞿庆国, 等, 2008. 青藏高原羌塘早古生代蛇绿岩: 堆晶辉长岩的锆石SHRIMP定年及其意义. 岩石学报, 24(1): 31–36.
- 李奋其, 刘伟, 张士贞, 等, 2012. 冈底斯南部打加错地区鸭洼基性杂岩的年代学及地球化学特征. 地质学报, 86(10): 1592–1603.
- 李光明, 张林奎, 吴建阳, 等, 2020. 青藏高原南部洋板块地质重建及科学意义. 沉积与特提斯地质, 40(1): 1–14.
- 李化启, 蔡志慧, 陈松永, 等, 2008. 拉萨地体中的印支造山事件及年代学证据. 岩石学报, 24(7): 1595–1604.
- 李楠, 朱利东, 杨文光, 等, 2020. 西藏冲尼中二叠世岛弧玄武岩的发现及意义. 地质与勘探, 56(4): 722–731.
- 牛志祥, 2019. 冈底斯岩浆弧东端二叠纪岩浆岩及新生代变质作用与构造意义(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 王斌, 解超明, 李才, 等, 2017. 青藏高原松多地区温木朗蛇绿岩的发现及其地质意义. 地质通报, 36(11): 2076–2081.
- 王立全, 潘桂棠, 朱弟成, 等, 2008. 西藏冈底斯带石炭纪-二叠纪岛弧造山作用: 火山岩和地球化学证据. 地质通报, 27(9): 1509–1534.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185–220.
- 吴兴源, 王青, 朱弟成, 等, 2013. 拉萨地体南缘早石炭世花岗岩类的起源及其对松多特提斯洋开启的意义. 岩石学报, 29(11): 3716–3730.
- 吴彦旺, 2013. 龙木错-双湖-澜沧江洋历史记录: 寒武纪-二叠纪的蛇绿岩(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 肖文交, 李继亮, 宋东方, 等, 2019. 增生型造山带结构解析与时空制约. 地球科学, 44(5): 1661–1687.
- 解超明, 李才, 李光明, 等, 2020. 西藏松多古特提斯洋研究进展与存在问题. 沉积与特提斯地质, 40(2): 1–13.
- 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等, 2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带: 青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带. 地质学报, 80(12): 1783–1792.
- 于云鹏, 2020. 藏南松多地区二叠纪-侏罗纪岩浆作用及构造意义(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 曾令森, 刘静, 高利娥, 等, 2009. 青藏高原拉萨地块早中生代高压变质作用及大地构造意义. 地学前缘, 16(2): 140–151.

附中文参考文献

- 陈松永, 杨经绥, 徐向珍, 等, 2008. 西藏拉萨地块松多榴辉岩的锆石Lu/Hf同位素研究及LA-ICPMS U-Pb定年. 岩石学报, 24(7): 1528–1538.
- 董昕, 张泽明, 2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因和构造意义. 岩石学报, 29(6): 1933–1948.
- 董昕, 张泽明, 耿官升, 等, 2010. 青藏高原拉萨地体南部的泥盆纪花岗岩. 岩石学报, 26(7): 2226–2232.
- 耿全如, 王立全, 潘桂棠, 等, 2007. 西藏冈底斯带洛巴堆组