

doi:10.3799/dqkx.2013.000

川南平川镁铁质—超镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义

曾令高^{1,2,3}, 张均², 孙腾², 郭东宝⁴

1. 新疆地矿局第九地质大队, 新疆乌鲁木齐 830000

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为探讨镁铁质—超镁铁质岩的岩石学特征及成岩成矿作用时间序列, 完善区域成岩成矿年代学格架, 对平川地区的镁铁质—超镁铁质岩进行了元素地球化学分析和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。测试结果显示, 黄草坪辉长岩成岩年龄为 259.7 ± 1.2 Ma, 其捕获锆石结晶年龄为 269.8 ± 2.4 Ma, 辉绿(玢)岩等次火山岩参考成岩年龄为 $248 \pm$ Ma, 其变质锆石年龄为 $67 \pm$ Ma。研究表明, 平川地区的镁铁质—超镁铁质岩产出于大陆裂谷环境, 岩浆源区来自上地幔尖晶石相二辉橄榄岩, 为一套同源异相有利于铁矿化形成的富钠质拉斑玄武质岩石系列。岩浆活动开始孕育时间不晚于 269.8 ± 2.4 Ma, 大规模岩浆活动发生于 259.7 ± 1.2 Ma, 其约束了岩浆分异型和火山喷发(溢)沉积型矿化的成矿时间, 次火山岩的成岩年龄约束了次火山热液型矿化的成矿时间上限, 变质锆石 U-Pb 年龄记录了平川地区经历了喜马拉雅期陆内造山作用。平川地区构造岩浆活动具有爆发性、阶段性和成矿专属性等特点, 镁铁质—超镁铁质岩的形成可能与岩石圈的大规模减薄作用有关, 攀西地区海西—印支期的成岩—成矿作用为同源岩浆受区域统一深部地球动力学背景约束演化的异相产物。

关键词: 锆石; 镁铁质—超镁铁质岩; 成岩成矿作用; 平川地区; 地球化学。

中图分类号: P595; P597

文章编号: 1000-2383(2013)06-1197-17

收稿日期: 2012-12-30

Zircon U-Pb Age of Mafic-Ultramafic Rock from Pingchuan Region in Southern Sichuan and Its Geological Implications

ZENG Ling-gao^{1,2,3}, ZHANG Jun², SUN Teng², GUO Dong-bao⁴

1. No. 9 Geological Brigade, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and elements geochemical analysis has been carried out for mafic-ultramafic rock from Pingchuan to discuss the petrology characteristics and the time series of diagenesis-mineralization in Pingchuan region and further improve the geochronological framework of diagenesis-mineralization of the Panxi area. The test results show that Huangcaoping gabbro formed in 259.7 ± 1.2 Ma and its capture zircon's crystallization age is 269.8 ± 2.4 Ma, and the subvolcanic's reference diagenetic age is $248 \pm$ Ma and its metamorphic zircon age is $67 \pm$ Ma. The results indicate that mafic-ultramafic rock in Pingchuan region is a set of homologous phase sodium-rich tholeiitic rock series, conducing to the formation of iron-mineralization, outputting in the continental rift environment, magma source coming from the upper mantle spinel lherzolite. The magmatic activity started no later than 269.8 ± 2.4 Ma, and the large-scale magmatic activity occurred at 259.7 ± 1.2 Ma, which constrained the mineralization time of magmatic profiled and volcanic eruptions (underflow) sedimentary, and the subvolcanic diagenetic age limited the upper mineralization time of sub-volcanic hydrothermal, and the metamorphic zircon U-Pb age recorded

基金项目: 全国危机矿山找矿专项项目“宁芜及川西陆相次火山岩型铁铜矿床成矿规律总结研究”(No. 20109904)。

作者简介: 曾令高(1983—), 男, 硕士, 主要从事成矿规律与成矿预测方面的研究工作。E-mail: lgzeng100@163.com

that Pingchuan region experienced Himalayan intracontinental orogeny. The tectonic-magmatic activity of Pingchuan region is featured with being explosive, phased and metallogenic; the formation of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region is probably related to the large-scaled lithospheric thinning; diagenesis-mineralization in Hercynian-Indosinian in Panxi area is the comagmatic product of different phases evolution, controlled by regional uniform deep geodynamics.

Key words: zircon; mafic-ultramafic rock; diagenesis-mineralization; pingchuan region; geochemistry.

攀西裂谷带位于扬子准地台的西缘,是我国著名的铁铜多金属成矿带之一. 由于其形成于晚古生代—中生代裂谷构造环境,强烈的壳幔相互作用等复杂的大陆动力学过程,爆发式的岩浆活动和规模性的铁铜多金属成矿作用,成岩成矿作用与地幔柱活动密切相关以及巨大的找矿潜力等特点,奠定了攀西地区作为探索裂谷构造环境陆内动力学过程及地幔柱活动与成岩成矿关系的重要地位,是我国西南大火成岩省岩浆活动及其成矿响应研究不可多得理想空间,是开展裂谷带成岩成矿作用及成矿系统研究得天独厚的天然实验室和绝佳场所. 因而,对攀西地区开展成岩成矿作用研究一直是地学界的一个前沿课题和关注焦点(梅厚均, 1973; 骆耀南, 1985; 田竞亚和胡秀蓉, 1986; 和昭, 1986; 卢记仁等, 1987; 杨时惠和阙梅英, 1987; 滕吉文和魏斯禹, 1987; 张云湘等, 1988; 沈苏等, 1988; 吴根耀, 1997; 王登红等, 1998, 2001, 2010; 宋谢炎等, 1998, 2005; 张招崇等, 2003, 2006, 2007, 2009; 刘家铎等, 2004; 陶琰等, 2004; 张成江等, 2004; Zhang *et al.*, 2006; 肖龙等, 2007).

年代学研究是攀西地区成岩成矿作用研究的重要组成部分,它是阐明成岩成矿作用过程和深刻理解与成岩成矿作用相关联的地球动力学背景的关键. 近年来,随着 LA-ICP-MS、SHRIMP、 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 、Re-Os 等高精度测试方法广泛应用于成岩成矿年龄测定,攀西地区获得了一批高精度的同位素地质年龄数据(宋谢炎等, 2001; Zhou *et al.*, 2002; Lo *et al.*, 2002; Oven *et al.*, 2002; 夏斌等, 2004; 陶琰等, 2004; 钟宏等, 2004, 2009; 刘红英等, 2005; 侯增谦等, 2006; 林清茶等, 2006; 石贵勇等, 2006; 王登红等, 2010; 王萌等, 2011),为峨眉山大火成岩省不同岩相镁铁质岩—超镁铁质岩之间内在联系的探讨及成矿动力学研究提供了数据支撑,为厘定攀西地区成岩成矿演化时间序列奠定了良好基础. 尽管攀西地区年代学研究工作目前已具有较高的整体水平,然而对川南平川地区与“平川”式磁铁矿有密切成生联系的镁铁质岩—超镁铁质岩却缺乏一套相应的限制成岩成矿时限的年代学数据,在一定程度上制约

了攀西地区成岩成矿演化年代学格架的建立和成岩成矿作用大陆动力学背景的探索.

平川铁矿床是我国西部地区一个较为特色的富铁矿床,因其矿石极富而闻名于国内外,目前已有 50 余年的开采史. 然而,人们对其成矿作用和成矿过程至今仍不明晰,对矿床的成矿规律认识缺乏深刻的理解,这些因素目前已成为了制约平川地区乃至相似地区找矿勘探取得突破的瓶颈. 导致出现目前这一困境的一个重要原因就是成岩成矿演化过程缺乏深入客观的认识,而精确厘定成岩成矿作用过程又立足于对成岩—成矿地质时限及其结构的准确约束和对成岩成矿动力学背景的深入分析,将成岩成矿作用自身及其形成环境有机的结合起来,进而阐明成矿演化过程及成矿规律. 平川地区目前年代学资料较少,仅 20 世纪 90 年代,攀西地质大队区调一队应用 K-Ar 法分别获得了黄草坪辉长岩和苦橄岩的同位素地质年龄为 280 Ma 和 198 Ma,由于受测试方法及当时测试技术的限制,其所获得的同位素年龄精度明显偏低,加之定年工作缺乏系统性,所获年代学数据难以准确限定成岩成矿作用发生的时间. 王萌等(2011)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法获得大板山岩体的苏长辉长岩成岩年龄为 259.69 ± 0.61 Ma,但野外调研表明,该地区的岩体为多期侵位的复合岩体,不同时期侵位的岩浆岩是否为同一岩浆作用的产物仍需进一步工作获得同位素年代学数据加以论证. 鉴于此,笔者在深入调研平川地区实际地质情况的基础上,对区内与成矿作用密切相关的镁铁质岩—超镁铁质岩进行了系统的锆石 U-Pb 定年,联系区域构造热事件,以建立区内成岩成矿演化时间序列及区域成岩成矿年代学格架,进而深入理解成岩成矿过程及其动力学背景.

1 区域岩浆—成矿作用特征

伴随海西—印支期的区域性构造热事件,攀西地区发育了大规模的喷出(溢)—侵入相镁铁质—超镁铁质岩,孕育了多矿种多矿化类型的内生成矿作用以及叠加、改造型外生成矿作用,从而构成了延伸

千余公里近 SN 向展布的极具特色的成岩—成矿带。峨眉山地幔柱是导致攀西地区大规模成矿作用的根本原因,由地幔柱作用引起的大量幔源岩浆活动和流体作用可能是我国西南地区发生大规模成矿作用的重要原因(王登红等,1998,2001)。伴随大规模的玄武岩喷发(溢)作用和镁铁质—超镁铁质岩的侵位,攀西地区发育了一套大火成岩省独具特色的内生矿产组合,主要包括赋存于玄武岩中的铁、铜矿和镁铁质—超镁铁质侵入岩中的钒钛磁铁矿、富磁铁矿以及铜镍硫化物铂族矿化,成岩成矿作用为同源岩浆演化的异相产物(宋谢炎等,2005;张招崇等,2007)。笔者(2011)将其成矿响应统归为幔源镁铁质岩浆源的基性—超基性岩浆岩成矿系列组,其由铜镍硫化物—铂族成矿系列类型和铁矿成矿系列类型构成。世界级的攀枝花、太和、红格、白马钒钛磁铁矿床,平川、牛厂磁铁矿床,白马寨、力马河铜镍硫化物—铂族矿床,均为这一时期岩浆构造热事件成矿响应的产物。

研究区位于攀西成岩—成矿带的南段,其成岩成矿作用是攀西地区岩浆—成矿作用的缩影。发育了一套由峨眉山玄武岩、矿山梁子岩套以及辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等脉岩等组成的喷出(溢)—侵入相镁铁质—超镁铁质岩。矿化以发育由赋存在峨眉山玄武岩中的火山喷发(溢)沉积型铁矿、与辉绿(玢)岩及苦橄(玢)岩等次火山岩密切相关的矿浆贯入型铁矿以及辉长岩中的岩浆结晶分异型铁矿构成的磁铁矿特色成矿系列为主,同时在南天沟二辉橄榄岩中发育了铜镍硫化物矿化,水关箐玄武岩中发育了玄武岩型铜矿化,同时大杉树地区的岩浆结晶分异型矿化显示出向钒钛磁铁矿过渡的特点,区内几乎涵盖了攀西地区与海西—印支期构造热事件有关的所有内生金属矿产,而以发育“平川”式磁铁矿为特色。

2 地质概况及样品采集

研究区在大地构造位置上位于扬子准地台北部的盐源—丽江台缘拗陷带东缘与康滇地轴中段西缘的结合部位,地质构造背景为古生代沉降带^①。海西—印支期岩浆活动强烈,主要发育一套由晚二叠世峨眉山玄武岩、矿山梁子岩套以及辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等脉岩等组成的喷出(溢)—侵入相镁铁质—

超镁铁质岩(图1)。玄武岩主要分布于研究区西侧,为晚二叠世中心式火山喷发(溢)岩浆活动的产物,矿山梁子岩套分布于研究区中部及中偏东部,由黄草坪辉长岩、大坪子苏长辉长岩和南天沟二辉橄榄岩组成,大坪子苏长辉长岩与黄草坪辉长岩多呈隐蔽侵入接触关系,在两者接触处常见前者呈指状伸入后者中,并含有后者的捕掳体,南天沟二辉橄榄岩与大坪子苏长辉长岩呈侵入接触关系,其内接触带常含前两者的捕掳体,三者侵位时间上具有固定的先后关系。矿山梁子岩套呈岩床或复合岩床断续出露于研究区内,与围岩多为侵入接触关系,局部见呈断层接触关系,自北而南分布有大板山复合岩床、烂纸厂岩床、牦牛山复合岩床、大杉树复合岩床等(图1)。其中大板山复合岩床出露面积最大,分布于矿山梁子一带,岩石类型发育最为齐全,由黄草坪辉长岩、大坪子苏长辉长岩和南天沟二辉橄榄岩组成。大杉树复合岩床出露于右所乡至大杉树一带,呈岩株状侵入于古生界地层中,由黄草坪辉长岩和大坪子苏长辉长岩组成。区内的辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等脉岩主要分布于矿山梁子铁矿区一带(图1),被认为是与南天沟二辉橄榄岩同期同源的岩浆在上升侵位过程中受到了黄草坪辉长岩等围岩混染的浅成—超浅成相产物,野外调研表明,苦橄(玢)岩侵位早于辉绿(玢)岩。

平川铁矿床是这一时期构造—岩浆作用的产物,是一个多矿段多成因类型的复合型矿床,其成矿作用类型可划分为次火山热液型、火山喷发(溢)沉积型和岩浆分异型,矿化类型与特定的火成岩建造类型表现出明显的时空专属性特点。次火山热液型矿化主要与辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等脉岩在空间上相依,矿体常常产出于辉绿(玢)岩的顶盖层、凹陷部位以及岩体裂隙中,矿化受岩体与碳酸盐岩地层接触带控制,热液贯入成矿特征明显,矿体就位时间略晚于辉绿(玢)岩侵位。火山喷发(溢)沉积型矿化呈层状、似层状、透镜状赋存于二叠纪玄武岩建造中,具多层产出特点,主要赋存于峨眉山玄武岩下段的致密块状玄武岩与玄武质角砾岩的接触带附近,与围岩接触界线清楚,局部呈渐变过渡关系,发育纹层—条带状构造,沉积成矿特征明显,为与晚二叠世火山喷发(溢)沉积作用有关的同生沉积矿化。岩浆分异型矿化赋存于辉长岩建造中,矿化与围岩呈渐变过渡关系。

为了厘定平川地区的成岩成矿作用时间序列,探讨岩浆源区、岩浆演化以及成岩成矿地球动力学

^①四川省地质矿产局攀西地质大队区调一队,1990. 中华人民共和国区域地质调查报告(1:5万). 平川幅、田湾幅.

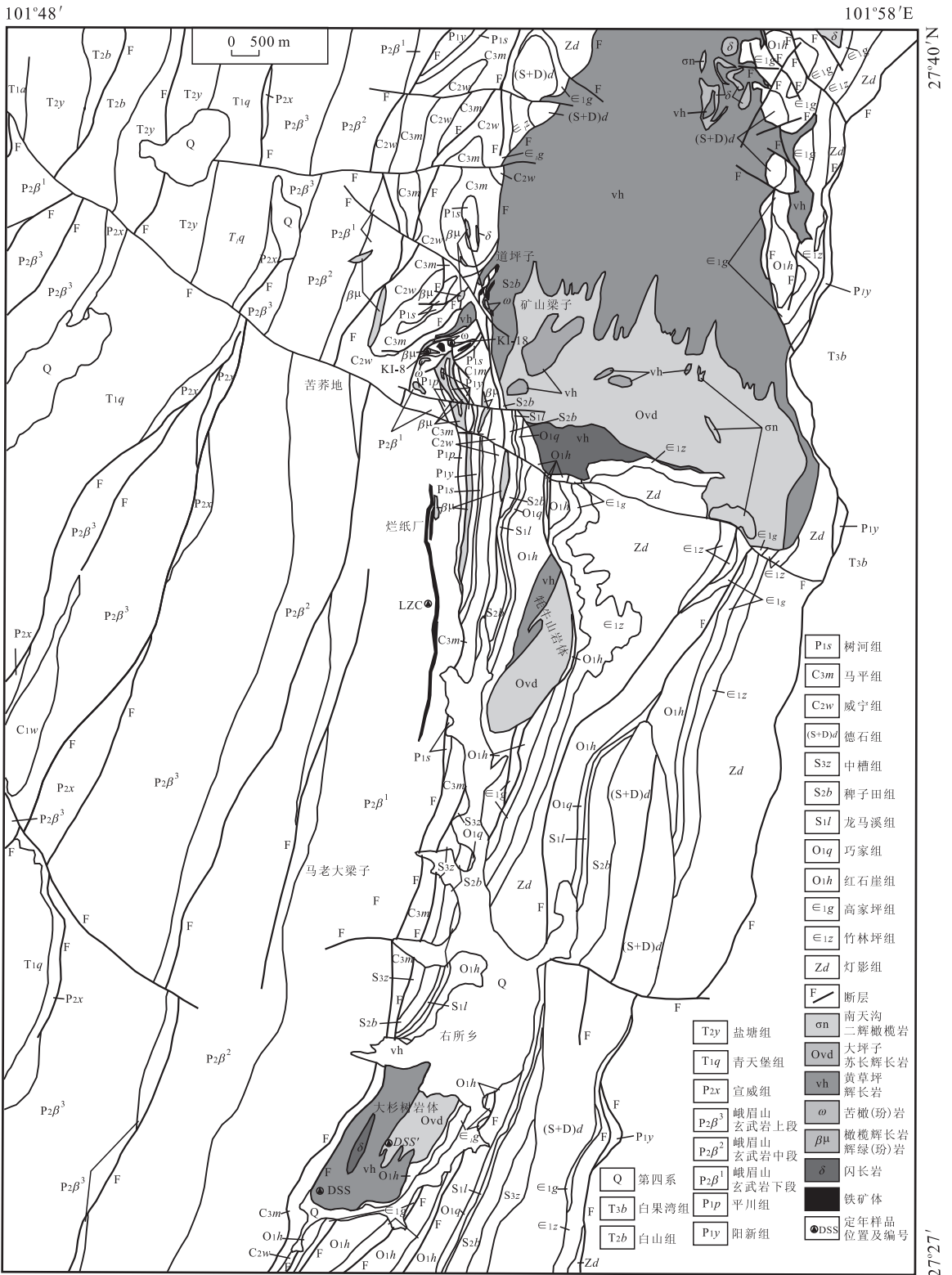


图 1 平川铁矿地质矿产略图(据①修订)

Fig. 1 Sketch map of geological and mineral of Pingchuan iron deposit

背景,笔者在平川地区系统采集了一套镁铁质—超镁铁质岩石样品用于元素地球化学分析和锆石 U-Pb年代学研究. 用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定

年的辉长岩样品采自大杉树复合岩床(编号 DSS), 所采样品具星点—浸染状磁铁矿矿化,为岩浆结晶分异型矿化的赋矿建造,岩石呈浅灰绿色,中粗粒斑

状结构,块状构造,弱蚀变,主要矿物为斜长石、辉石、磁铁矿等,斜长石含量 60%±,普通辉石 20%±,紫苏辉石 3%±,磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等不透明矿物含量 10%±,以磁铁矿为主,以及少量的绿泥石、角闪石、黑云母、橄榄石等(7%±),辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩样采自矿山梁子铁矿坑(编号分别为 KI-8 和 KI-18),其呈次火山岩产出,与次火山热液型磁铁矿具有密切的空间依附关系,是该类型磁铁矿矿体的主要赋矿围岩。辉绿(玢)岩呈深灰绿色,变余辉绿—辉长结构,块状构造,斑晶主要为辉石,主要矿物为斜长石、辉石、透闪石,以及少量橄榄石,斜长石含量 50%±,辉石 25%±,透闪石 20%±,橄榄石 5%±。苦橄(玢)岩呈墨绿色,中粗粒斑状结构,块状构造,斑晶主要为橄榄石,见少量磁铁矿,基质为微晶结构,主要为橄榄石、斜长石、辉石,橄榄石含量达 85%±,斜长石 10%±,辉石 5%±。大坪子苏长辉长岩样品采自大杉树复合岩床(编号 DSS'),玄武岩样品采自烂纸厂 213 勘探线(编号 LZC),这两个样品未挑选出供实验用的锆石颗粒,本次工作未进行年代学研究。

3 分析方法

全岩的常量、微量元素测试分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成,常量元素测试仪器为 X 射线荧光光谱仪(XRF),微量元素测量仪器为质谱仪。锆石样品的破碎和挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成,用于挑选锆石的辉长岩样品大于 20 kg,苦橄(玢)岩、辉绿(玢)岩、玄武岩样品均大于 40 kg。区内岩浆岩基性程度较高,锆石含量较少,所采 5 个样品仅大杉树辉长岩挑选出了较多的锆石颗粒,矿山梁子辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩也挑选出了一定量的锆石颗粒,而苏长辉长岩和玄武岩挑选出的锆石颗粒极少,因此,本次实验仅对大杉树辉长岩及矿山梁子的苦橄(玢)岩和辉绿(玢)岩做了测试分析。在双目镜下手工挑选出晶形、透明度和色泽度均较好的锆石,置于环氧树脂中固定,待干燥后将样品靶磨蚀和抛光至锆石核心露出。在光学显微镜下对锆石靶进行透射光和反射光照相,在西北大学大陆动力学国家重点实验室拍摄了锆石的阴极发光(CL)图像(图 2),查明锆石的内部结构,以便在测试时针对性地选择锆石颗粒和斑点位置,获得具明确地质意义的有效同位素年龄。锆石微区原位测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国

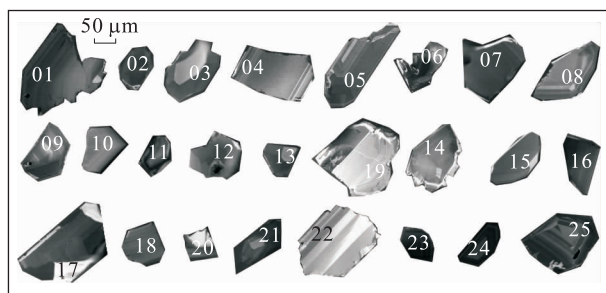


图 2 大杉树辉长岩锆石阴极发光(CL)图像及测试位置
Fig. 2 Zircon cathodoluminescence (CL) images and test position of Dashanshu gabbro

家重点实验室(GPMR)激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪器上完成,实验中激光束斑直径为 32 μm,采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石 U-Pb 同位素组成分析以 91500 作为外标,NIST610 作为内标,微量元素以 91500 作为外标,⁹¹Zr 作为内标,详细分析流程及原理参见 Yuan *et al.* (2004)。实验获得的数据处理采用 ICPMDataCal 软件(Liu *et al.*, 2010),所测试样品普通 Pb 含量极低,本次实验未进行普通 Pb 校正,年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(3. 23 版)(Ludwig, 2003)进行,同位素比值误差为 1σ,年龄计算采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值误差为 2σ。

4 分析结果

4.1 元素地球化学

平川地区的镁铁质—超镁铁质岩的常量元素、微量元素分析结果分别列于表 1 和表 2。

从表 1 可以看出,平川地区的镁铁质—超镁铁质岩总体具有低钙、铝,富镁的特点,与西伯利亚地台安卡拉地区安卡拉—伊利姆式铁矿的赋矿围岩组成相似^②(梅厚钧等,1973),而与钒钛磁铁矿赋矿围岩往往表现出贫钙、高铝、富铁的特点有所区别,说明平川地区的镁铁质—超镁铁质岩有利于形成类似于安卡拉—伊利姆式铁矿床。分离结晶作用在镁铁质—超镁铁质岩浆的演化过程中起着重要作用,从图 3 可以看出,平川地区的镁铁质—超镁铁质岩化学成分之间具有较好的相关性,MgO 与 FeO^T 表现出正相关关系(矿化辉长岩除外,矿化辉长岩因磁铁矿化而导致分析样品 FeO^T 偏高),而与 SiO₂、TiO₂、CaO、Alk、Al₂O₃ 呈现出负相关关系,反映了以橄榄

^②地质矿产部成都地质矿产研究所,1984. 西昌地区铁矿(下册):西昌地区主要铁矿类型成矿地质特征及矿床实例。

表 1 平川地区镁铁质—超镁铁质岩常量元素含量及特征值

Table 1 Table of eigenvalue and content of major elements of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

样号	岩石类型	化学成分(%)											特征值
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
ZK21101-2	细粒玄武岩	51.57	2.19	14.47	3.30	7.21	0.20	6.94	10.90	2.15	0.84	0.24	10.18
ZK21201-9	块状玄武岩	50.31	1.97	14.03	2.87	8.30	0.19	8.63	9.71	3.02	0.73	0.24	10.88
ZK21503-1	含杏仁体玄武岩	53.56	1.77	14.62	3.10	7.21	0.18	6.70	8.79	2.68	1.17	0.21	10.00
ZK22001-1	灰绿色玄武岩	50.14	2.30	14.28	5.81	5.98	0.21	6.26	11.83	1.90	1.04	0.25	11.21
ZK22001-3	杏仁体玄武岩	53.96	2.06	14.52	2.09	7.19	0.18	5.65	9.94	4.10	0.06	0.24	9.07
ZK22101-2	含杏仁体玄武岩	52.32	2.15	14.88	3.34	7.22	0.18	6.88	8.42	4.29	0.07	0.26	10.22
ZK22101-10	块状玄武岩	50.74	2.21	14.61	3.64	7.76	0.25	7.52	8.34	3.12	1.58	0.24	11.03
ZK22101-14	铁质凝灰岩	44.79	1.15	11.75	11.81	7.95	0.36	8.50	11.31	1.88	0.07	0.42	18.58
LZC-3	斑状玄武岩	49.62	1.99	13.97	5.01	7.05	0.21	7.57	11.76	2.03	0.52	0.26	11.56
CK10201-1	粗粒辉长岩	51.44	2.93	14.91	5.53	5.27	0.14	4.93	9.07	5.01	0.58	0.18	10.25
CK10201-4	细粒辉长岩	50.41	1.95	14.75	2.56	8.25	0.19	6.85	9.57	4.73	0.54	0.20	10.56
CK10201-6	中粗粒辉长岩	50.46	1.70	15.59	3.85	5.68	0.22	7.87	9.69	3.89	0.91	0.15	9.15
CK10201-7	中—细粒矿化辉长岩	47.19	1.52	14.56	3.00	11.23	0.13	7.35	11.28	3.15	0.46	0.14	13.93
CK10201-8	中—细粒辉长岩	49.94	1.59	15.36	3.94	5.63	0.13	7.77	11.53	3.39	0.58	0.14	9.17
DPZ-1	中—粗粒辉长岩	49.90	0.95	15.84	2.50	7.00	0.19	9.06	10.30	2.92	1.25	0.09	9.24
DPZ-3	粗粒辉长岩	49.93	1.98	12.95	5.81	7.23	0.22	7.15	10.29	3.81	0.36	0.28	12.46
DPZ-71-2	辉绿辉长岩	49.07	2.73	15.53	2.92	10.19	0.20	5.92	8.49	3.86	0.86	0.24	12.81
DPZ-74	中细粒辉长岩	50.55	1.72	12.85	4.36	5.26	0.16	9.14	11.12	4.38	0.30	0.16	9.19
ZK3002-5-1	细粒辉长岩	52.48	0.89	16.31	3.12	5.99	0.17	6.68	11.30	2.63	0.36	0.07	8.79
ZK3002-14	中—粗粒矿化辉长岩	46.07	2.71	13.05	9.24	9.34	0.19	5.97	10.13	2.69	0.55	0.05	17.65
ZK3002-18	矿化粗粒辉长岩	44.55	2.26	13.00	2.73	18.10	0.19	5.50	10.01	2.92	0.68	0.07	20.56
ZK3002-19	中粗粒辉长岩	52.08	1.03	15.11	3.89	4.97	0.18	6.69	11.85	3.25	0.88	0.07	8.47
ZK3002-20	矿化细粒辉长岩	43.43	2.57	13.36	9.63	10.81	0.20	6.90	10.50	2.15	0.40	0.05	19.48
K-8	辉绿岩	44.74	1.39	8.73	2.70	9.35	0.30	24.25	7.92	0.41	0.09	0.12	11.78
K-10	辉绿岩	46.42	0.01	9.08	1.58	12.06	0.17	23.44	7.01	0.01	0.12	0.10	13.48
K-14	辉绿岩	44.14	1.09	8.21	3.92	7.91	0.20	25.41	8.77	0.20	0.04	0.10	11.44
K-41	辉绿岩	44.88	1.20	9.05	3.01	8.43	0.17	23.78	8.56	0.52	0.30	0.10	11.14
K-244	辉绿岩	45.78	1.22	8.84	3.68	9.47	0.26	22.57	7.73	0.31	0.03	0.10	12.78
K-13	苦橄岩	44.93	1.22	9.41	3.84	7.61	0.20	22.20	9.07	1.12	0.31	0.09	11.06
K-15	苦橄岩	45.20	1.23	9.65	3.66	7.69	0.19	21.66	9.11	1.23	0.27	0.09	10.99
K-18	苦橄岩	44.19	1.04	8.27	2.92	8.78	0.20	25.22	7.88	1.19	0.22	0.09	11.41
K-246-2	苦橄岩	45.31	1.16	8.55	2.65	9.21	0.19	23.17	8.20	1.32	0.14	0.09	11.59
K-246-3	苦橄岩	46.05	1.13	8.86	3.04	9.09	0.20	21.65	8.32	1.31	0.21	0.12	11.83
K-171	苦橄岩	45.37	1.20	8.36	4.30	7.75	0.19	23.80	7.82	0.88	0.23	0.10	11.62

注:氧化物含量已换算成 100%,分析数据由澳实分析检测(广州)有限公司测定。

石、辉石为主的分离结晶作用,这与岩相学观察的堆晶现象相吻合。此外野外观察到斜斑玄武岩中斜长石呈粗晶、伟晶产出也证实了分离结晶作用的存在。

平川地区的镁铁质—超镁铁质岩总体具有趋于一致的微量元素分布型式(图 4、5)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线显示该地区的镁铁质—超镁铁质岩稀土总量较低,具有轻稀土相对富集,弱 δEu 和 δCe 异常的右倾稀土配分模式,表明仅发生了微弱的斜长石分离结晶作用,铁质玄武岩具强正 δEu 异常特征可能与残浆中有结晶斜长石的坠入有关。在微量元素原始地幔标准化配分曲线上各岩石类型也表现出趋于一致的分布模式, Nb、Zr、Hf、P 等高场强元素表现出负异常特征, Ba、Pb、Sr、Nd 等

大离子亲石元素等均呈现出明显正异常, Ba、U、Pb 等强不相容元素在铁质玄武岩中明显富集, 镁铁质—超镁铁质岩总体具有较强烈的 K 负异常, 指示成岩作用与消减作用无关, 强烈的 P 负异常和弱的 Ti 正异常暗示岩浆起源于上地幔。区内镁铁质—超镁铁质岩微量元素组成具有相似的配分模式可能暗示了玄武岩、辉长岩、辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩为同源岩浆演化的异相产物, 与前人的认识相吻合。

4.2 锆石 U-Pb 年代学

本次实验剔除异常值之后的有效年龄数据及稀土组成分别列于表 3 和表 4。

大杉树辉长岩的锆石呈浅黄色或无色, 绝大多数锆石结晶较好, 锆石长度约 60~300 μm , 宽度约

表 2 平川地区镁铁质-超镁铁质岩微量元素含量及特征值

Table 2 Eigenvalues and contents of Trace elements of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

样号	岩石名称	元素(10^{-6})																	特征值											
		Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	La	Ce	Pb	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm	Eu	Dy	Y	Ho	Yb	Lu	Gd	Tb	Er	Tm	Σ REE	LREE/ HREE	δ Eu	δ Ce
ZK21101-2	细粒玄武岩	20.1	1140	2.2	0.5	1.06	17.4	18.2	37.7	4.5	5.15	503	22.7	136.0	3.7	5.40	1.97	4.90	23.9	0.91	2.14	0.32	5.45	0.89	2.52	0.35	108.60	5.21	1.10	0.94
ZK21201-9	块状玄武岩	23.3	660	2.4	0.6	1.26	20.9	21.0	44.5	3.3	5.42	487	22.6	142.5	3.8	5.33	1.72	4.88	27.3	1.02	2.30	0.31	5.95	0.95	2.78	0.39	119.15	5.41	0.93	1.00
ZK21503-1	杏仁体玄武岩	43.1	280	2.0	0.5	0.98	15.0	21.8	43.5	5.7	5.57	397	22.9	123.0	3.4	5.09	1.73	4.27	21.6	0.78	1.81	0.26	5.33	0.76	2.21	0.29	116.30	6.40	1.01	0.94
ZK22001-1	灰绿色玄武岩	32.9	450	2.3	0.6	1.23	17.9	21.8	47.7	7.6	6.17	718	26.7	91.5	3.2	6.18	2.11	4.97	24.6	0.94	2.13	0.33	6.00	0.96	2.54	0.37	128.90	6.07	1.05	0.99
ZK22001-3	杏仁体玄武岩	2.8	110	1.9	0.5	1.11	17.3	18.8	42.1	5.0	5.74	426	25.5	115.5	3.3	5.88	2.24	4.83	23.4	0.93	2.19	0.31	5.84	0.92	2.51	0.35	118.14	5.61	1.16	0.98
ZK22101-2	杏仁体玄武岩	2.2	90	2.5	0.7	1.18	18.5	24.3	50.5	4.9	6.21	376	26.0	177.5	4.7	6.00	2.05	4.93	26.4	1.04	2.21	0.30	6.21	1.02	2.67	0.36	133.80	6.14	1.02	0.98
ZK22101-10	块状玄武岩	44.6	1310	2.5	0.6	1.12	17.8	24.4	48.6	10.8	5.54	335	24.0	159.0	4.2	5.25	2.00	4.33	23.0	0.84	1.82	0.26	5.32	0.83	2.33	0.29	125.81	6.85	1.15	0.98
ZK22101-14	铁质凝灰岩	3.8	10000	3.9	4.2	0.63	11.4	51.1	72.6	160.5	6.40	807	22.9	100.5	2.7	4.46	4.46	4.19	25.0	0.87	2.22	0.34	4.84	0.77	2.54	0.35	178.04	10.04	2.92	0.84
LZC-3	斑状玄武岩	11.8	190	1.3	0.3	0.84	12.9	13.8	30.4	3.8	4.59	355	21.1	87.3	2.7	5.31	1.89	5.23	25.7	0.97	2.30	0.32	5.72	0.94	2.69	0.38	95.64	4.16	1.04	0.93
CK10201-1	中粗粒辉长岩	15.2	540	3.1	0.3	1.53	22.9	15.2	33.1	2.3	3.98	450	19.8	51.5	2.0	4.81	1.85	5.10	29.5	1.06	2.61	0.41	5.32	0.91	3.08	0.43	97.66	4.16	1.11	1.02
CK10201-4	细粒辉长岩	14.5	360	3.1	0.5	1.22	19.0	20.4	46.1	14.4	5.23	398	21.0	113.5	3.4	4.99	1.49	4.75	25.6	0.88	2.26	0.33	5.42	0.86	2.54	0.36	116.61	5.70	0.87	1.07
CK10201-6	中粗粒辉长岩	17.8	470	1.4	0.3	0.70	11.0	13.2	26.2	1.1	3.44	362	15.5	57.1	2.0	3.92	1.28	4.21	21.0	0.83	2.11	0.31	4.30	0.72	2.35	0.35	78.72	4.19	0.95	0.93
CK10201-7	中-细粒矿化辉长岩	11.5	210	1.8	0.3	0.62	9.9	10.5	25.8	4.8	3.11	429	13.7	60.6	1.9	3.79	1.18	3.60	21.0	0.73	1.81	0.26	3.98	0.67	2.03	0.28	71.44	4.35	0.92	1.09
DPZ-1	中-粗粒辉长岩	29.3	420	1.4	0.2	0.39	6.4	7.1	17.3	4.5	2.08	260	9.0	27.4	0.9	2.43	0.99	3.04	17.2	0.62	1.65	0.22	2.98	0.52	1.72	0.27	49.92	3.53	1.12	1.09
DPZ-71-2	辉绿辉长岩	22.2	280	1.8	0.4	1.07	16.6	16.1	37.2	2.1	5.54	542	25.6	120.0	3.4	6.61	2.47	6.63	31.8	1.26	2.96	0.43	7.22	1.18	3.49	0.49	117.18	3.95	1.09	0.96
DPZ-74	中细粒辉长岩	10.6	320	2.7	0.3	1.02	15.1	15.6	34.5	3.2	4.77	223	19.8	75.4	2.5	4.70	1.40	4.45	22.6	0.86	2.24	0.32	5.13	0.79	2.56	0.35	97.47	4.84	0.87	0.97
ZK3002-4	中-细粒辉长岩	13.7	180	1.7	0.3	0.30	4.8	8.1	17.2	2.7	1.99	253	8.7	48.6	1.6	2.60	0.85	3.49	20.6	0.72	1.86	0.28	3.17	0.59	2.06	0.30	51.91	3.16	0.90	1.02
ZK3002-5	细粒辉长岩	9.4	170	1.5	0.3	0.24	3.8	6.4	13.5	4.1	1.68	276	7.4	47.9	1.4	2.10	0.85	2.82	16.6	0.58	1.52	0.22	2.50	0.45	1.73	0.25	42.00	3.17	1.13	0.99
ZK3002-18	矿化粗粒辉长岩	23.1	190	1.6	0.3	0.32	5.0	7.8	17.9	4.5	2.09	261	9.3	39.6	1.4	2.69	1.01	3.67	21.2	0.73	1.98	0.28	3.21	0.62	2.15	0.33	53.76	3.14	1.05	1.07
ZK3002-20	矿化细粒辉长岩	11.1	140	1.3	0.2	0.25	4.1	6.2	13.4	5.3	1.59	205	7.3	46.3	1.5	2.10	0.72	2.95	16.6	0.58	1.62	0.23	2.54	0.47	1.72	0.26	41.68	3.02	0.95	1.02
ZK21301-1	辉绿岩	13.3	420	2.1	0.5	1.04	17.1	18.0	38.6	7.5	5.28	429	23.3	111.0	3.1	5.51	1.99	5.10	23.6	0.96	2.23	0.32	5.70	0.94	2.61	0.37	110.91	5.08	1.08	0.96
K-8	辉绿岩	2.9	30	0.6	0.2	0.46	7.0	6.1	15.5	1.9	1.94	106.5	8.5	69.1	2.0	2.42	0.95	2.95	16.7	0.57	1.49	0.19	2.91	0.54	1.64	0.24	45.94	3.36	1.09	1.10
K-14	辉绿岩	3.0	60	0.6	0.2	0.42	6.5	6.2	13.8	0.7	1.80	53.5	8.1	48.5	1.5	2.09	0.81	2.54	13.8	0.55	1.26	0.16	2.60	0.45	1.41	0.21	41.98	3.57	1.06	1.00
K-41	辉绿岩	17.3	20	0.7	0.2	0.49	7.6	6.6	15.3	1.9	1.82	89.1	7.6	50.3	1.6	2.12	0.86	2.61	14.4	0.53	1.24	0.19	2.41	0.49	1.50	0.19	43.46	3.74	1.16	1.06
K-244	辉绿岩	0.8	20	0.6	0.2	0.41	5.9	6.5	13.3	1.5	2.00	38.8	8.9	55.0	1.7	2.43	0.87	2.80	14.8	0.55	1.31	0.18	3.00	0.46	1.60	0.21	44.11	3.36	0.98	0.90
K-13	苦橄岩	10.5	230	0.7	0.2	0.48	7.2	7.5	17.7	9.0	2.02	183	8.7	71.0	1.9	2.37	0.89	2.81	16.1	0.57	1.29	0.19	2.71	0.51	1.48	0.23	48.97	4.00	1.07	1.09
K-15	苦橄岩	8.2	230	0.7	0.2	0.50	7.6	7.7	16.8	3.9	2.18	183	9.7	75.5	2.0	2.61	1.04	3.09	16.8	0.66	1.50	0.20	0.0	0.0	0.0	0.0	40.56	3.65	1.05	1.10
K-18	苦橄岩	5.8	190	0.6	0.2	0.38	5.7	5.7	14.2	2.6	1.72	188	7.4	66.9	1.8	2.05	0.77	2.38	13.7	0.50	1.17	0.17	2.43	0.44	1.43	0.20	47.29	3.68	1.06	0.95
K-246-2	苦橄岩	4.1	70	0.6	0.2	0.41	5.8	7.5	15.3	3.3	2.01	194	9.0	64.2	1.8	2.46	0.92	2.84	14.5	0.56	1.38	0.20	2.86	0.47	1.56	0.23	47.49	3.61	0.97	0.86
K-246-3	苦橄岩	5.1	140	0.6	0.2	0.43	6.2	7.7	14.5	4.4	2.14	257	9.4	62.1	1.9	2.55	0.89	2.90	14.7	0.55	1.32	0.19	3.06	0.48	1.59	0.22	44.29	3.47	1.08	0.88
K-171	苦橄岩	8.8	110	0.5	0.2	0.39	5.7	7.6	13.8	4.1	1.80	170	8.1	61.1	1.7	2.22	0.87	2.84	14.2	0.56	1.35	0.20	2.72	0.47	1.53	0.23	108.60	5.21	1.10	0.94

注:分析数据由澳实分析检测(广州)有限公司测定。

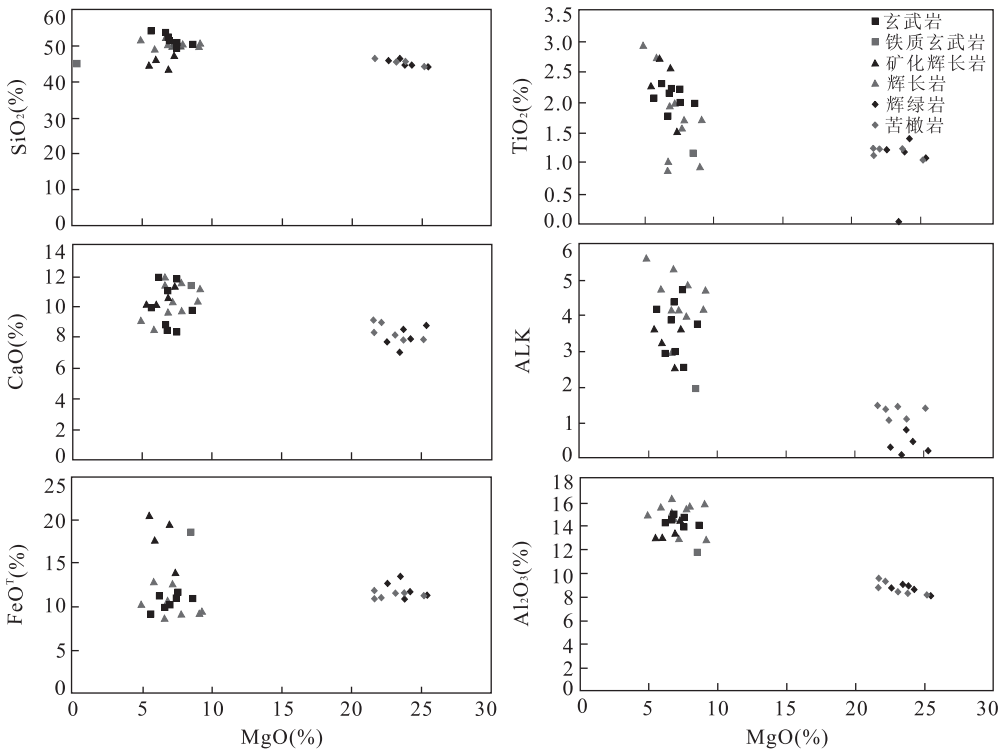


图 3 平川地区镁铁质—超镁铁质岩 Harker 图解

Fig. 3 Harker diagram of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

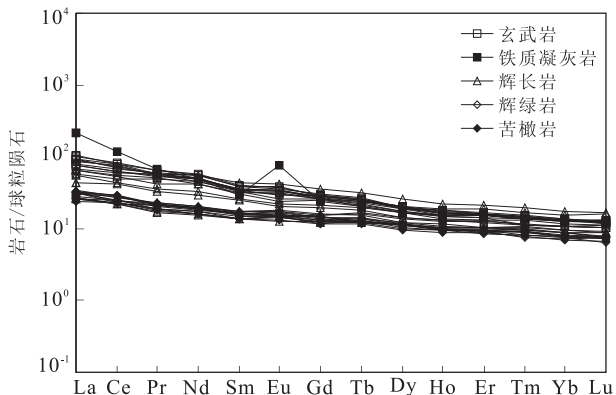


图 4 平川地区镁铁质—超镁铁质岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

30~160 μm , 长宽比为 1.2 : 1~3 : 1, 锆石颗粒以柱状晶形为主, 少数为等粒状。所有锆石颗粒内部结构清晰, 环带较宽(图 2), 具有典型的基性岩浆振荡环带。所有锆石颗粒的 Th/U 比值均大于 0.1, 且绝大多数比值大于 1.0(表 3), 明显区别于变质锆石的 Th/U 比值(一般小于 0.1)(Belousova *et al.*, 2002; Hoskin *et al.*, 2003; Griffin *et al.*, 2003)。锆石稀土元素球 HREE 富集, 强 δCe 正异常和弱 δEu 负异常的稀土配分特征(图 6)。这些特征表明大树辉长

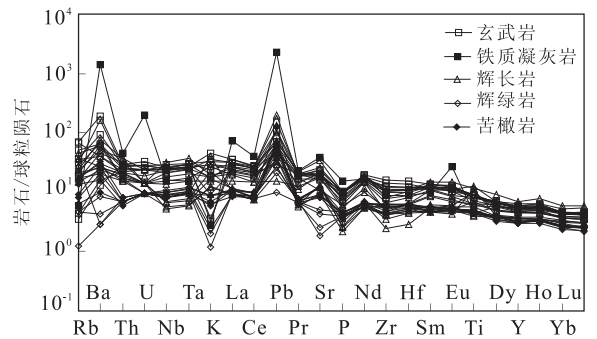


图 5 平川地区镁铁质—超镁铁质岩微量元素原始地幔标准化配分曲线

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element partition curves of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

岩中的锆石为典型的岩浆成因锆石(杨高学等, 2010;王春光等, 2011)。

大杉树辉长岩的 25 个分析点均获得了有效的年龄数据, 锆石年龄协和图如图 8。该样品所获得的锆石年龄数据可明显分为两个群体, 且每一个群体都较为集中, 年龄较大的一组锆石数量较少, 说明其为岩浆捕获锆石, 但年龄相差并不大, 可能为捕获的稍早阶段形成的岩浆锆石, 两组锆石的稀土组成及配分模式均没有明显的区别也证实了其可能为侵位时间相近的岩浆活动形成的锆石。岩浆侵位结晶锆

表 3 平川地区镁铁质—超镁铁质岩锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 3 The analysis results of zircon U-Pb dating of mafic-ultramafic rock in Pingchuan region

分析点	含量(10 ⁻⁶)		Th/U	U-Th-Pb 同位素比值±1σ				同位素年龄±1σ(Ma)		
	U	Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th
DSS										
01	764	946	1.24	0.051 4±0.001 5	0.291 3±0.008 6	0.041 0±0.000 4	0.011 3±0.000 2	258.91±2.50	259.55±6.76	227.08±3.46
02	649	1 076	1.66	0.054 2±0.001 7	0.307 8±0.009 3	0.041 1±0.000 4	0.011 1±0.000 2	259.84±2.41	272.44±7.26	222.77±4.09
03	623	856	1.37	0.050 9±0.001 6	0.288 8±0.008 9	0.041 0±0.000 4	0.011 3±0.000 2	259.25±2.45	257.59±7.02	227.56±4.45
04	470	862	1.83	0.053 7±0.001 8	0.305 4±0.010 4	0.041 1±0.000 4	0.011 7±0.000 2	259.58±2.53	270.64±8.09	234.66±4.63
05	563	783	1.39	0.052 1±0.001 7	0.295 1±0.009 5	0.041 0±0.000 4	0.011 5±0.000 2	259.30±2.71	262.58±7.49	230.70±4.29
06	421	525	1.25	0.050 6±0.001 9	0.285 7±0.010 6	0.041 1±0.000 4	0.011 3±0.000 2	259.69±2.77	255.15±8.40	226.73±4.99
07	746	1 300	1.74	0.054 6±0.001 6	0.310 8±0.008 6	0.041 2±0.000 4	0.011 5±0.000 2	260.31±2.35	274.79±6.66	231.97±4.81
08	387	418	1.08	0.051 2±0.001 9	0.291 0±0.010 8	0.041 1±0.000 4	0.011 6±0.000 3	259.90±2.63	259.38±8.46	232.48±5.54
09	340	484	1.43	0.049 4±0.002 2	0.279 9±0.012 5	0.041 1±0.000 4	0.011 4±0.000 3	259.38±2.76	250.60±9.88	229.50±5.60
10	152	119	0.78	0.053 6±0.002 8	0.302 6±0.016 0	0.041 1±0.000 6	0.010 9±0.000 4	259.63±3.93	268.45±9.49	218.88±8.29
11	632	607	0.96	0.050 1±0.001 6	0.283 8±0.008 8	0.041 1±0.000 4	0.011 3±0.000 3	259.84±2.38	253.70±6.99	227.63±5.18
12	523	641	1.23	0.049 9±0.001 7	0.281 1±0.009 1	0.040 9±0.000 4	0.011 5±0.000 2	258.56±2.70	251.56±7.22	230.56±4.80
13	673	1 067	1.59	0.052 8±0.001 6	0.298 1±0.009 0	0.041 0±0.000 5	0.011 5±0.000 2	258.88±2.93	264.89±7.06	230.30±4.89
14	274	291	1.06	0.052 0±0.002 5	0.292 4±0.014 2	0.041 0±0.000 5	0.011 2±0.000 3	258.82±3.35	260.47±8.17	224.68±5.59
15	559	749	1.34	0.048 7±0.001 6	0.278 4±0.009 4	0.041 2±0.000 4	0.011 5±0.000 3	260.55±2.76	249.41±7.50	230.14±5.31
16	389	553	1.42	0.051 4±0.001 7	0.293 2±0.010 3	0.041 1±0.000 4	0.011 4±0.000 3	259.73±2.72	261.07±8.05	229.73±5.06
17	694	1 253	1.81	0.051 0±0.001 6	0.291 2±0.008 8	0.041 2±0.000 4	0.011 7±0.000 2	260.52±2.27	259.47±6.92	235.95±4.30
18	505	795	1.57	0.052 9±0.001 7	0.299 1±0.009 3	0.041 1±0.000 5	0.010 9±0.000 2	259.39±3.27	265.68±7.27	219.70±4.12
19	303	422	1.39	0.047 7±0.002 0	0.272 5±0.011 5	0.041 2±0.000 4	0.012 2±0.000 3	260.10±2.75	244.65±9.15	244.29±5.59
20	502	612	1.22	0.051 9±0.001 8	0.293 4±0.009 6	0.041 2±0.000 5	0.011 3±0.000 2	260.24±3.29	261.21±7.50	226.39±4.69
21	1 189	1 355	1.14	0.050 5±0.001 2	0.300 1±0.007 8	0.042 7±0.000 4	0.011 8±0.000 2	269.82±2.27	266.47±6.06	236.15±4.33
22	254	367	1.44	0.104 0±0.003 6	0.612 5±0.021 2	0.042 7±0.000 5	0.014 6±0.000 3	269.26±3.05	485.11±9.35	293.61±5.54
23	2 869	2 369	0.83	0.051 4±0.001 0	0.305 0±0.006 5	0.042 7±0.000 4	0.011 8±0.000 2	269.73±2.74	270.30±5.03	237.35±4.38
24	2 382	4 269	1.79	0.050 6±0.001 1	0.299 9±0.006 9	0.042 7±0.000 4	0.011 9±0.000 2	269.80±2.63	266.32±5.40	239.70±4.77
25	634	1 049	1.66	0.064 6±0.002 0	0.382 9±0.011 9	0.042 8±0.000 5	0.012 1±0.000 2	270.47±3.06	329.17±8.77	243.22±4.77
KI-8										
01	1 329	688	0.52	0.047 3±0.002 2	0.070 3±0.003 1	0.010 8±0.000 1	0.003 6±0.000 1	69.6±0.8	69.0±3.0	72.4±2.1
04	778	466	0.60	0.051 1±0.001 7	0.277 9±0.009 4	0.039 2±0.000 4	0.012 3±0.000 4	248.1±2.8	249.0±7.5	247.2±7.2
05	734	415	0.57	0.051 7±0.002 1	0.279 6±0.011 2	0.039 0±0.000 4	0.013 2±0.000 4	246.6±2.3	250.4±8.9	265.0±8.3
KI-18										
01	1 568	1 202	0.77	0.083 1±0.003 2	0.115 3±0.004 4	0.010 0±0.000 1	0.003 6±0.000 1	64.3±0.8	110.8±4.0	73.0±2.2
03	308	664	2.16	0.099 0±0.004 0	0.531 6±0.021 3	0.039 2±0.000 6	0.007 2±0.000 3	248.1±3.8	264.0±7.0	221.0±6.6
04	366	185	0.50	0.058 9±0.001 9	0.632 7±0.019 0	0.078 0±0.000 9	0.022 4±0.000 6	484.0±5.6	497.8±11.8	446.9±12.2
05	203	208	1.02	0.073 1±0.002 7	0.784 2±0.031 2	0.078 1±0.001 1	0.023 6±0.000 8	484.5±6.7	587.9±17.7	471.3±15.4
06	374	119	0.32	0.060 2±0.001 8	0.657 2±0.020 2	0.078 7±0.000 9	0.023 2±0.000 7	488.3±5.4	512.9±12.4	463.0±13.7
07	253	235	0.93	0.098 6±0.002 4	3.599 6±0.089 7	0.263 3±0.003 5	0.064 1±0.001 4	15 06.5±17.7	1 549.4±19.8	1 255.0±26.8
08	161	146	0.90	0.095 3±0.002 5	3.643 7±0.093 5	0.276 4±0.003 2	0.074 6±0.001 8	1 573.0±16.3	1 559.1±20.4	1 454.9±33.1
09	258	262	1.02	0.099 9±0.002 1	3.831 7±0.088 4	0.277 7±0.004 0	0.064 7±0.001 4	1 579.6±20.4	1 599.4±18.6	1 266.7±26.4

注:分析测试工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测定。

石的 20 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 258.56 ± 2.70 Ma~260.55 ± 2.76 Ma 之间,年龄数据十分集中,加权平均年龄为 259.7 ± 1.2 Ma (MSDW = 0.47)(图 8a),与王萌等(2011)应用 LA-ICP-MS 获得的苏长辉长岩的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致,捕获岩浆锆石的 5 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 269.26 ± 3.05 Ma~270.47 ± 3.06 Ma 之间,年龄数据也十分集中,加权平均年龄为 269.8 ± 2.4 Ma(MSDW=0.89)(图 8b)。

矿山梁子近矿辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩也获得了一部分同位素地质年龄,从表 3 可以看出, KI-8 和 KI-18 获得了 67 ± Ma 的明显晚于成岩年龄的同位素年龄,这些锆石颗粒阴极发光具有变质锆石的特征,明显受到后期地质作用的扰动。2 个样品同时也获得了与成岩阶段大致相当的 248 ± Ma 的同位素年龄,尽管由于分析点太少,数据可靠性不高,但据实际地质情况判断其具有参考价值,大致代表了岩浆侵位时间,与矿山梁子矿段道坪子磁铁矿中磷

表 4 平川地区大杉树辉长岩锆石稀土分析结果

Table 4 The analysis results of zircon REE of Dashanshu gabbro in Pingchuan region

分析点	元素(10 ⁻⁶)														LREE/HREE	δEu	δCe
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
01	0.009 2	34.90	0.09	1.43	3.08	1.33	21.62	11.26	157.62	65.67	323.46	76.32	759.13	129.94	0.03	0.36	105.52
02	0.000 0	27.54	0.12	1.79	4.18	1.17	21.80	10.71	132.70	52.16	221.94	48.30	455.14	73.12	0.03	0.30	63.41
03	0.005 0	42.82	0.09	2.15	5.26	1.54	26.27	14.09	189.26	79.84	368.47	83.82	819.12	133.59	0.03	0.33	139.59
04	0.100 3	24.44	0.46	7.26	13.99	5.00	87.08	36.38	435.58	158.82	683.81	144.48	1364.94	215.60	0.02	0.33	13.94
05	0.016 3	44.48	0.16	2.60	5.73	1.48	31.42	15.81	209.74	82.38	379.41	83.80	804.10	131.03	0.03	0.27	78.12
06	0.000 0	27.92	0.09	1.38	3.92	1.17	19.61	10.12	143.30	58.62	287.90	67.06	681.36	115.61	0.02	0.33	93.24
07	0.097 8	34.97	0.53	8.07	18.09	5.36	90.56	39.55	470.83	173.93	750.13	165.51	1557.64	249.51	0.02	0.33	17.65
08	0.063 5	29.49	0.21	2.91	5.90	1.51	32.22	15.35	194.75	79.12	358.21	80.99	790.04	124.81	0.02	0.27	36.52
09	0.000 0	18.84	0.19	4.44	9.89	2.20	45.90	19.90	228.14	84.08	360.77	77.76	733.30	113.78	0.02	0.26	28.47
10	0.013 9	12.31	0.05	0.86	2.71	0.55	13.32	6.72	84.84	34.95	164.51	38.34	386.28	66.08	0.02	0.23	61.98
11	0.052 9	29.64	0.05	1.83	3.60	1.19	20.14	10.66	149.18	61.29	290.88	66.07	661.86	107.02	0.03	0.34	115.23
12	0.046 4	42.45	0.16	2.23	6.73	1.48	35.03	16.54	223.37	90.59	414.22	92.97	895.55	142.99	0.03	0.24	67.51
13	0.054 5	40.63	0.39	6.42	13.35	3.60	69.48	29.53	361.78	129.67	557.11	118.41	1072.94	168.56	0.03	0.29	28.14
14	0.014 5	15.82	0.10	1.79	3.05	1.00	17.67	7.92	107.12	44.55	210.12	49.19	484.44	85.38	0.02	0.33	43.36
15	0.046 0	22.48	0.36	6.88	12.12	2.68	58.28	25.39	294.42	108.22	460.19	99.14	930.72	142.63	0.02	0.25	17.16
16	0.000 0	20.36	0.18	4.79	7.25	2.41	38.89	17.20	210.42	77.92	350.77	78.58	767.70	122.09	0.02	0.35	32.20
17	0.133 3	42.41	0.52	9.42	24.11	6.30	120.51	49.27	575.26	204.58	850.92	180.25	1654.82	245.62	0.02	0.29	21.38
18	0.019 2	22.06	0.37	4.91	11.44	2.60	59.31	28.29	350.92	132.60	577.49	122.86	1134.99	178.77	0.02	0.25	16.59
19	0.019 4	15.38	0.29	4.77	8.52	2.14	46.19	20.50	245.44	89.35	382.46	83.29	778.75	120.58	0.02	0.26	14.58
20	0.039 6	20.02	0.21	4.04	7.42	1.87	40.21	16.97	217.08	86.48	384.21	84.26	799.30	132.11	0.02	0.26	24.97
21	0.013 6	3.41	0.07	1.42	3.46	1.57	15.93	7.80	99.53	41.14	197.15	49.38	549.88	100.54	0.01	0.54	12.28
22	0.047 7	14.43	0.19	3.55	9.10	2.67	45.89	19.72	229.23	84.99	363.72	78.35	727.83	117.92	0.02	0.32	19.89
23	0.025 4	19.92	0.12	1.84	4.83	1.77	26.31	12.18	163.87	67.30	321.23	76.78	812.31	146.50	0.02	0.38	42.60
24	0.041 0	50.80	0.17	1.13	3.75	1.78	25.77	13.19	182.01	77.44	386.06	94.43	988.67	172.94	0.03	0.41	77.19
25	0.014 9	42.62	0.19	2.95	4.95	1.26	28.76	13.72	161.79	63.03	283.36	61.02	580.10	92.22	0.04	0.25	62.42

注:分析测试工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测定。

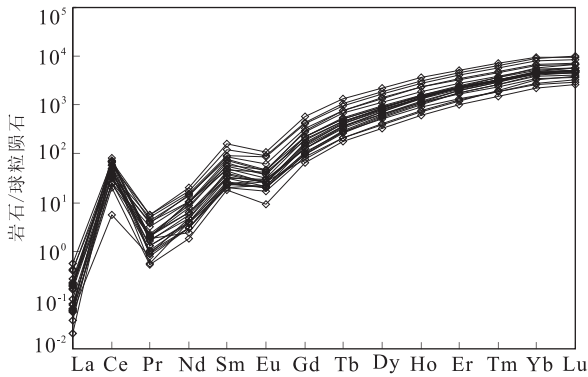


图 6 平川地区大杉树辉长岩锆石稀土元素球粒陨石配分曲线

Fig. 6 Zircon chondrite-normalized REE distribution patterns of Dashanshu gabbro in Pingchuan region

灰石 U-Pb 年龄 241 ± 16 Ma (MSWD = 0.71, $n = 17$) (刘文浩, 2011) 相一致。此外, 苦橄(玢)岩样品还获得了约 485 Ma 和 1 550 Ma 两组捕获锆石的年龄。

平川地区的镁铁质—超镁铁质岩的产出地质特征表明其为晚二叠世—早三叠世岩浆活动的产物,

黄草坪辉长岩、大坪子苏长辉长岩、辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩等次火山岩顺次演化侵位, 本文获得的年代学数据与区内地质事实相吻合。区域上海西—印支期发生大规模岩浆活动的时间大致在 $259 \pm$ Ma, 岩浆活动具有爆发性特点, 本文获得的辉长岩的年龄数据与区域上大规模岩浆活动时间相近。王萌等 (2011) 获得了大板山复合岩床苏长辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 259.69 ± 0.61 Ma, 与本文获得的大杉树辉长岩的侵位年龄相当。这些地质事实表明本文获得的同位素年龄在地质上是可信的。

5 地质意义讨论

5.1 岩浆源区及其演化

岩石产出构造环境判别和岩石系列属性划分对成岩—成矿作用研究至关重要, 本文选取研究区广泛发育的玄武岩为代表来探讨镁铁质—超镁铁质岩的产出构造环境和岩石系列属性。从火山岩产出构造环境判别图解可以看出(图 7), 平川地区的玄武岩产出岩相环境主要为板内大陆及大陆裂谷环境,

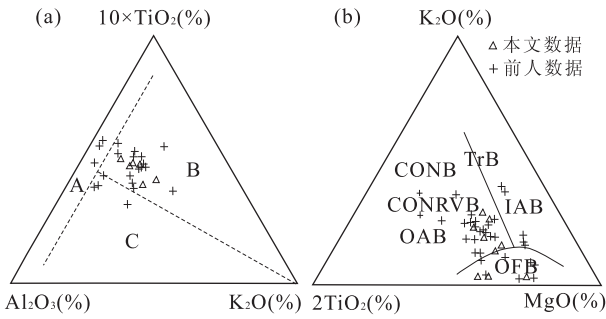


图 7 平川地区火山岩构造环境判别图解(底图 a 仿赵崇贺等, 1989; 底图 b 仿莫宣学等, 1993; 前人数据引自①③)

Fig. 7 Volcanic tectonic discrimination in Pingchuan

A. 大洋玄武岩区; B. (CONRVB)玄武岩; IAB, 岛弧玄武岩; TrB, 过渡型玄武岩; OAB, 大洋碱性玄武岩; CONB, 大陆玄武—大陆裂谷型玄武岩; C. 岛弧造山带玄武岩; OFB, 大洋岩

同时也表现出局部受大洋环境影响的特点, 这与攀西地区玄武岩喷发时期攀西地区的古地理格局及演化密切相关. 从火山岩岩石系列划分图解来看(图 9), 平川地区的玄武岩岩石系列属于拉斑玄武岩岩石系列, 岩石钠质含量高, 属于钠质岩石类型, 为有利于铁矿化的岩石建造. 由此可以推断, 平川地区的镁铁质—超镁铁质岩的岩浆源区构造环境为大陆及大陆裂谷环境, 岩石系列属于富钠质拉斑玄武岩岩石系列.

不相容元素的比值可以用来指示岩浆源区的特点, 从图 10 可以看出平川地区的镁铁质岩—超镁铁质岩的岩浆熔融作用主要发生在尖晶石稳定域内, 熔融程度达 10% 左右. 南天沟二辉橄榄岩中含有难熔残留相铁镁尖晶石捕掳晶, 可能暗示了平川地区镁铁质—超镁铁质岩的岩浆源岩为上地幔尖晶石相二辉橄榄岩. 此外, 在平川铁矿磁铁矿中发育尖晶石

与磁铁矿的固溶体分离结构, 常见尖晶石呈尘埃状散布在磁铁矿中, 经测定其成分与二辉橄榄岩中的铁镁尖晶石相近(杨时惠等, 1987), 暗示了不同物相中尖晶石的同源性. 地质—地球化学特征表明, 平川地区的镁铁质—超镁铁质岩岩浆源区可能来自上地幔尖晶石二辉橄榄岩相.

源区岩浆的演化是否受到外来物质的混染引人关注, 区内镁铁质—超镁铁质岩微量元素组成配分型式表明(图 5), 源区岩浆的演化与消减作用无关, 岩浆演化受到了地壳物质的混染. Ce/Pb 比值常被用来指示岩浆演化是否受到外来物质的混染作用, 平川地区镁铁质—超镁铁质岩的 Ce/Pb 比值介于 0.5~19.7 之间, 集中在 3~9 之间, 明显低于典型地幔的 Ce/Pb 比值, 结合大离子亲石元素表现出明显正异常, K 强烈贫化等微量元素特征, 暗示了源区岩浆的演化受到了地壳物质的混染. 从 (Th/Ta)_{PM} 和 (La/Nb)_{PM} 图解(图 11) 可以看出, 混染作用主要来自下地壳, 同时矿化辉长岩和铁质玄武岩等少数样品表现出受上地壳混染的特征, 这可能与这些样品受分离结晶作用影响更为强烈有关.

上述地质—地球化学特征表明, 平川地区的镁铁质—超镁铁质岩具有相同的岩浆源区, 玄武岩、辉长岩、辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等为同源岩浆演化的异相产物, 共同构成了一个岩浆演化系列, 产出于大陆裂谷构造环境, 岩浆源区可能来自上地幔尖晶石相二辉橄榄岩, 在岩浆演化过程中受到了地壳物质的混染, 为一套富钠质拉斑玄武质岩石系列, 有利于铁矿化的形成.

5.2 同位素年龄地质意义

从平川地区成岩演化系列来看, 晚二叠世峨眉

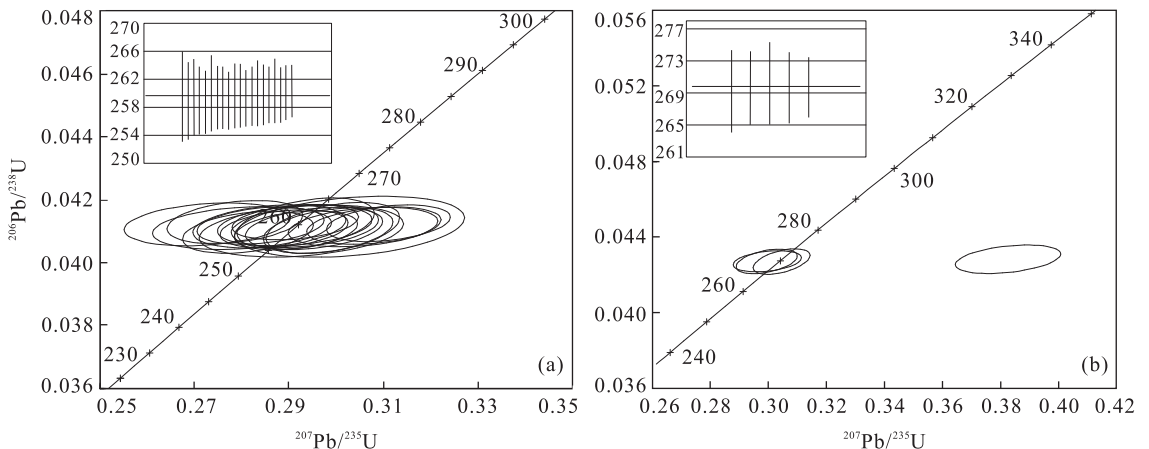


图 8 平川地区大杉树辉长岩锆石 U-Pb 协和图

Fig. 8 U-Pb concordia plots for zircons of Dashanshu gabbro in Pingchuan region

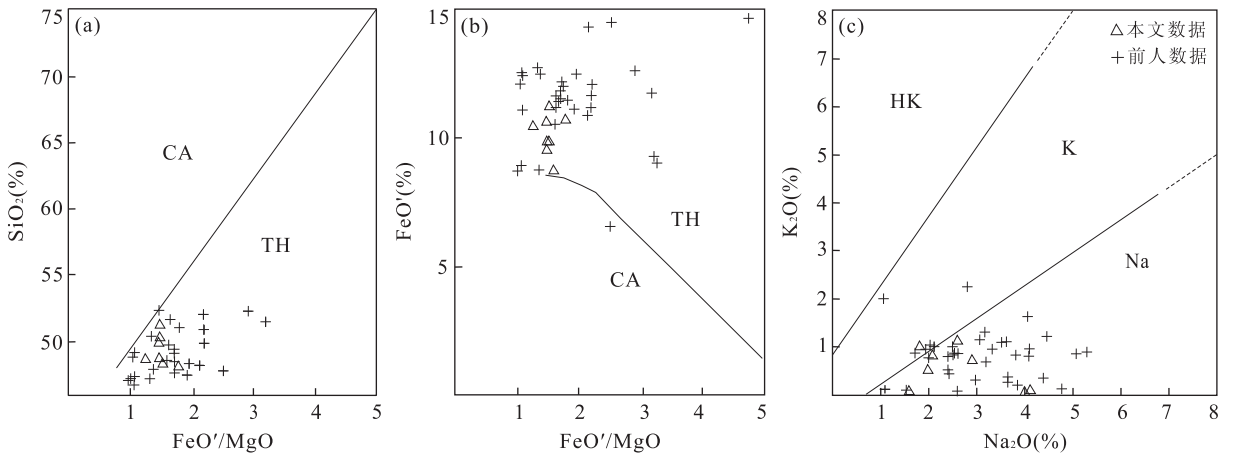


图 9 平川地区火山岩岩石系列划分图解(前人数据引自①③)

Fig. 9 Volcanic rock series in Pingchuan region

TH. 拉斑玄武岩系列;CA. 钙碱性玄武岩系列; HK. 高钾类型;K. 钾质类型;Na. 钠质类型

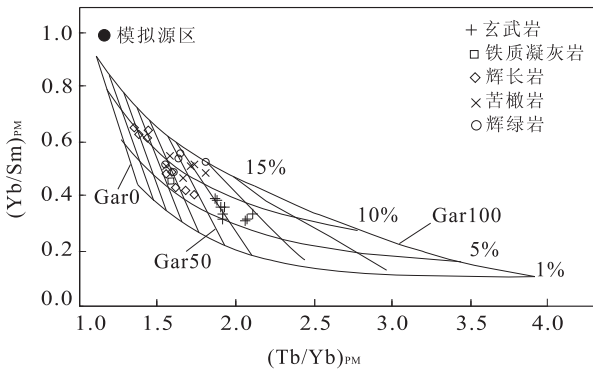


图 10 $(Tb/Yb)_{PM}$ 和 $(Yb/Sm)_{PM}$ 图解(底图据张招崇等, 2006)

Fig. 10 Relation of $(Tb/Yb)_{PM}$ and $(Yb/Sm)_{PM}$

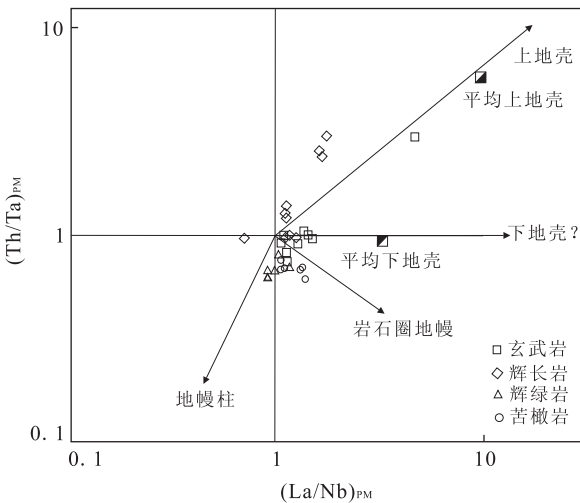


图 11 $(Th/Ta)_{PM}$ 和 $(La/Nb)_{PM}$ 图解(底图据 Neal *et al.*, 2002)

Fig. 11 Relation of $(Th/Ta)_{PM}$ and $(La/Nb)_{PM}$

山玄武岩喷发时间与黄草坪辉长岩侵位时间大致相当, 辉长岩的侵位年龄与玄武岩喷发时间趋于一致. 黄草坪辉长岩为平川地区海西—印支期侵位最早的岩浆岩, 随后依次为大坪子苏长辉长岩和南天沟二辉橄榄岩及同期侵位的辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩等次火山岩. 大杉树辉长岩锆石 U-Pb 年龄 259.7 ± 1.2 Ma 代表了平川地区黄草坪辉长岩侵位的年龄, 其与区域上大规模的镁铁质—超镁铁质岩浆活动发生的时间趋于一致(宋谢炎等, 2001; Zhou *et al.*, 2002; 陶琰等, 2004; 钟宏等, 2004, 2009; 刘红英, 2005; 侯增谦等, 2006; 石贵勇等, 2006; 王登红等, 2010). 辉长岩中捕获岩浆锆石的 269.8 ± 2.4 Ma 的 U-Pb 年龄表明区内岩浆活动起始时间早于区域上大规模岩浆活动. 峨眉山地幔柱活动早二叠世在盐源—丽江陆缘区活动, 晚二叠世进入攀西裂谷及其以东岩区(宋谢炎等, 1998), 表明区内海西—印支期岩浆活动孕育较早, 将捕获岩浆锆石的 U-Pb 年龄解释为早期岩浆岩的结晶时间在地质上可信. 因而, 捕获岩浆锆石同位素地质年龄指示了区域性海西—印支期大规模岩浆活动在平川地区开始孕育的时间不晚于 269.8 ± 2.4 Ma. 矿山梁子辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩锆石 U-Pb 年龄 $248 \pm$ Ma 大致代表了矿山梁子地区辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等次火山岩的参考成岩年龄, 所获得的成岩时间与区内基本地质事实吻合. 因此, 认为其同位素年龄具有参考意义. 从本次实验所获得的锆石 U-Pb 年龄和区域上发生大规模岩浆活动的时间来看, 包括平川地区在内的整个攀西地区的岩浆活动是在很短的时间内完成的, 岩浆活动具有爆发性特点, 玄武岩的喷发(溢)

和镁铁质—超镁铁质岩的侵位具有同步性,而非前人认为的侵入岩形成于成穹阶段(骆耀南,1985)。本文获得的黄草坪辉长岩的侵位年龄与王萌等(2011)获得的大坪子苏长辉长岩的侵位年龄十分接近,表明区内岩浆活动的爆发性特征突出, 259.7 ± 1.2 Ma 的锆石 U-Pb 年龄不仅代表了黄草坪辉长岩的侵位年龄,同时也约束了平川地区复合岩床辉长岩建造的就位时间。

此外,苦橄(玢)岩中捕获锆石 U-Pb 年龄 485 ± 5 Ma 和 1550 ± 5 Ma, 暗示了区内岩浆在侵位过程中与元古代基底和早古生代盖层发生了围岩混染作用。辉绿(玢)岩和苦橄(玢)岩中变质锆石 U-Pb 年龄 67 ± 5 Ma, 可能指示了区内在晚白垩—古新世发生的构造运动,为构造运动发生时间的记录,与平川地区经历了喜马拉雅陆内褶皱造山运动的地质事实相吻合(滕吉文等,1987)。道坪子磷灰石裂变径迹热年代学也获得了 58.2 ± 5.3 Ma 的裂变径迹年龄(刘文浩,2011),其与本文变质锆石获得的同位素年龄相当,进一步佐证了研究区陆内褶皱造山作用时间发生在晚白垩—古新世。

区内成矿作用与成岩作用是同一岩浆作用作用的不同表现形式,铁矿化表现出矿化类型多样、成矿演化史复杂、矿化类型与岩浆建造类型表现出时空一致性等特点,所获得的同位素年龄对成矿时限具有约束性。从所获得的锆石 U-Pb 年龄来看,本次工作初步厘定了平川地区海西—印支期成矿演化的年代学格架,259 Ma 的锆石 U-Pb 年龄大致限定了赋存于辉长岩建造中的岩浆分异型矿化以及赋存于玄武岩建造中的火山喷发(溢)沉积型矿化的就位时间,辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩等次火山岩的参考成岩年龄以及磁铁矿中磷灰石 U-Pb 年龄指示次火山热液型矿化的就位与次火山岩的侵位在时间上趋于同步,地质特征指示矿体就位略晚于次火山岩侵位。上述地质—地球化学特征表明平川地区的成矿作用具有爆发性、阶段性和专属性等特点,铁矿化形成时间与区域海西—印支期大规模成矿作用发生的时间相吻合(Zhou *et al.*, 2002; 陶琰等, 2004; 钟宏等, 2004, 2009; 石贵勇等, 2006; 王登红等, 2010), 矿化主体形成时间略晚于攀西地区的铜镍硫化物—铂族矿化和“攀枝花”式钒钛磁铁矿,其与地质认识非常吻合。

变质锆石 U-Pb 年龄和磷灰石裂变径迹年龄反映了平川地区在经历了区域性海西—印支期成岩—成矿作用后,平川地区又遭受了喜马拉雅期的后生

陆内造山改造作用。

5.3 成岩—成矿地球动力学背景

伴随海西—印支期区域构造热事件作用,攀西地区发生了大规模的成岩—成矿作用。峨眉山地幔柱是导致攀西地区大规模成矿作用的根本原因,由地幔柱作用引起的大量幔源岩浆活动和流体作用可能是我国西南地区发生大规模成矿作用的重要原因(王登红等,1998,2001)。平川地区镁铁质—超镁铁质岩的成岩年龄与攀西地区的其它镁铁质—超镁铁质岩十分接近,结合其源区特征可能暗示了平川地区镁铁质—超镁铁质岩与峨眉山地幔柱作用有关。张招崇等(2006)对丽江苦橄岩研究后认为其代表了岩石圈大规模减薄前峨眉山大火成岩省喷发的早期阶段,岩浆源区来自石榴子相二辉橄榄岩,其岩石圈厚度约 140 km,而平川地区的镁铁质—超镁铁质岩岩浆源区来自上地幔尖晶石相二辉橄榄岩,暗示了其浅源区特征(此时岩石圈厚度 < 80 km),指示了平川地区镁铁质—超镁铁质岩形成时攀西地区地幔柱与岩石圈的相互作用已导致了岩石圈的大规模减薄。年代学研究表明,包括川南平川地区在内的整个攀西地区的镁铁质—超镁铁质岩成岩年龄非常接近,暗示了岩石圈的大规模减薄作用是在短时间内完成的,其与地幔柱理论模型相吻合(Griffiths and Campbell, 1991)。

攀西地区海西—印支期的成岩—成矿作用受控于统一的深部地球动力学背景,峨眉山地幔柱与岩石圈的相互作用导致了岩石圈在短时间内大规模减薄可能是导致攀西地区爆发性成岩—成矿作用的根本原因。不同岩石系列和成矿系列的形成是岩浆演化方式、侵位深度及方式、浅部构造环境以及原始岩浆成分属性差异等因素耦合的结果,攀西地区的成岩—成矿作用为同源岩浆演化的异相产物。伴随大规模的玄武岩喷发(溢)和镁铁质—超镁铁质岩的侵位,攀西地区发育了一套幔源镁铁质岩浆源的内生矿产组合,由铜镍硫化物—铂族成矿系列类型和铁矿成矿系列类型构成了其独具特色的基性—超基性岩浆岩成矿系列组,孕育了众多规模大小不一的内生矿床。

平川地区是攀西成岩—成矿带的重要组成部分,成岩—成矿作用受区域成岩—成矿作用统一的地球动力学背景控制,伴随海西—印支期攀西地区大规模的裂谷岩浆活动,平川地区在晚二叠世—早三叠世也发生了规模性的喷发(溢)—侵入岩浆热事件,形成了一套镁铁质—超镁铁质岩岩石系列组合

及其与之相关的铁矿化和铜镍硫化物矿化。

6 结论

(1)地质—地球化学特征表明,平川地区的镁铁质—超镁铁质岩为同源岩浆演化的异相产物,岩浆源区来自上地幔尖晶石相二辉橄榄岩,岩浆演化受到了地壳物质的混染,为一套产出于大陆裂谷环境的有利于铁矿化形成的富钠质拉斑玄武质岩石系列。

(2)在川南平川地区获得了高精度的年代学数据,首次厘定了平川地区成岩—成矿作用的时间序列,进一步完善了攀西地区的成岩—成矿年代学格架。捕获岩浆锆石同位素地质年龄表明平川地区海西—印支期岩浆活动开始孕育的时间不晚于 269.8 ± 2.4 Ma, 259.7 ± 1.2 Ma 的锆石 U-Pb 年龄限定了平川地区复合岩床辉长岩建造的侵位年龄及玄武岩喷发(溢)在区内的活动时间,约束了平川地区辉长岩建造中岩浆分异型矿化和赋存于玄武岩建造中的火山喷发(溢)沉积型铁矿化的成矿时间,辉绿(玢)岩、苦橄(玢)岩 $248 \pm$ Ma 的参考成岩年龄代表了次火山岩的侵位年龄,同时也初步限定了与次火山岩具有密切成因及时空关系的次火山热液型铁矿化的成矿时间,变质锆石 U-Pb 年龄记录了平川地区经历了喜马拉雅期陆内造山作用。地质—地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄表明,平川地区的构造岩浆活动具有爆发性、阶段性和成矿专属性等特点,在成岩—成矿时间上与区域大规模成岩成矿作用趋于一致,矿化主体形成时间略晚于攀西地区的铜镍矿和“攀枝花”式钒钛磁铁矿。

(3)平川地区镁铁质—超镁铁质岩的形成可能与地幔柱与岩石圈的相互作用导致岩石圈的大规模减薄作用有关,其与攀西地区其它镁铁质—超镁铁质岩形成时间相当,成岩—成矿作用受制于区域统一的地球动力学背景,包括平川地区在内的攀西地区海西—印支期的成岩成矿作用为同源岩浆在深部地球动力学背景约束下演化的异相产物。

致谢:本文在资料收集及野外调研期间得到了平川铁矿韩定伟副总工程师等领导和员工的大力帮助,在样品测试过程中得到了中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(武汉)胡兆初老师、陈露和王晓红硕士的帮助和指导,在数据处理过程中得到了中国地质大学(武汉)刘锐老师、邓晓东博士、刘申杰硕士等人的帮助,在此表示感谢!

References

- Belousova, E. A., Griffin, W. L., 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. doi: 10.1007/s00410-002-0346-7
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S., 2004. Crustal Evolution in the Northern Yiliarn Craton: U-Pb and Hf Isotope Evidence from Detrital Zircon. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231—282.
- Griffiths, R. W., Campbell, I. H., 1991. Internation of Mantle Plume Hends with the Earth's Surface and Onset of Small-Scale Convection. *Journal of Geophysical Research*, 96(18): 295—310.
- He, Z., 1986. The Metallogenetic Series for Alkalic Complexes in Panzihua-Xichang Rift. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 11(6): 652—658 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 3: 27—62. doi: 10.2113/0530027
- Hou, Z. Q., Cheng, W., Lu, J. R., 2006. 259 Ma Continental Flood Basalt Events, Sichuan Emei Large Igneous Province: Evidence from the Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating. *Acta Geologica Sinica*, 8: 1130 (in Chinese).
- Lin, Q. C., Xia, B., Zhang, Y. Q., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Cida Alkali Complex in the Dechang Area, Southern Sichuan, China. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 398—401 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Y., 2005. Geochronological Study of Alkaline Rocks in Panxi, SW China and Its Geological Implications. The Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. D., Zhang, C. J., Liu, X. F., et al., 2004. Metallogenic Regularity and Prospecting of Southwestern Margin of the Yangtze Platform. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Lo, C. H., Chung, S. L., Lee, T. Y., et al., 2002. Age of the Emeishan Flood Magmatism and Relations to Permian-Triassic Boundary Events. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198:

- 449—458. doi:10.1016/S0012-821X(02)00535-6
- Lu, J. R., Zhang, G. D., Zhang, C. X., et al., 1987. Magmatic Types and Geneses of the Layered Intrusions in Panzhihua-Xichang Area. *Mineral Deposits*, 6(2): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for ISOPLOT 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Luo, Y. N., 1985. Understanding and Progress of the Panzhihua-Xichang Ancient Rift Research. *Geology in China*, 1: 27—32 (in Chinese).
- Mei, H. J., 1973. The Relationship between the Petrochemical Characteristics of Two Trap Series in Southwestern China and Related Iron and Nickel Mineralizations. *Geochimica*, 4: 219—253 (in Chinese with English abstract).
- Neal, C. R., Mahoney, J. J., Chazey III, W. J., 2002. Mantle Sources and the Highly Variable Role of Continental Lithosphere in Basalt Petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: Results from Odfleg 183. *Journal of Petrology*, 43(7): 1177—1205. doi:10.1093/ptrology/43.7.1177
- Oven, A., Pasteels, P., Punzalan, L. E., 2002. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronological Constraints: The Age and Evolution of the Permo-Triassic Emeishan Volcanic Province, Southwest China. *Asian Earth Sciences*, 20: 157—175.
- Shen, S., Jin, M. X., Lu, Y. F., 1988. Mineralization Deposits in Laws and Prospect for Main Ore Deposits in the Xichang-Central Yunnan Area. Chongqing Press, Chongqing (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. Y., Sun, X. M., Wang, S. W., et al., 2006. Re-Os Isotope Dating and Its Geological Implication of Baimazhai Cu-Ni Sulphide Deposit, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2451—2456 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. Y., Hou, Z. Q., Cao, Z. M., et al., 2001. Geochemical Characteristics and Period of the Emei Igneous Province. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 498—506 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. Y., Wang, Y. L., Cao, Z. M., et al., 1998. Emeishan Basalts, Emei Taphrogeny and Mantle Plume. *Geology Geochemistry*, 1: 47—52 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. Y., Zhang, C. J., Hu, R. Z., et al., 2005. Genetic Links of Magmatic Deposits in the Emeishan Large Igneous Province with Dynamics of Mantle Plume. *J. Mineral. Petrol.*, 25(4): 35—44 (in Chinese with English abstract).
- Tao, Y., Luo, T. Y., Gao, Z. M., et al., 2004. The Relation between Emeishan Continental Flood Basalts and Cu-Ni-PGE Deposits of Southwestern China Trap—A Case Study on Jinbaoshan Mafic-Ultramafic Intrusion, Yunnan. *Geological Review*, 50(1): 9—16 (in Chinese with English abstract).
- Teng, J. W., Wei, S. Y., 1987. The Formation, Evolution and Classification of the Panzhihua-Xichang (Pan-Xi) Tift. *Geotectonica et Metallogenia*, 11(1): 77—90 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J. Y., Hu, X. R., 1986. Mineralization of Panzhihua-Type Vanadio-Titanomagnetite Ore Deposits and Its Tectonic Setting. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 11(6): 638—644 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. G., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2011. Petrogenesis of the Early Cretaceous Xi'anli Hornblende-Gabbros from the Southern Taihang Mountains: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope and Whole-Rock Geochemistry. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(3): 471—482 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2011.049
- Wang, D. H., 1998. Mantle Plume and Its Mineralization. Earthquake Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, D. H., 2001. Basic Concept, Classification, Evolution of Mantle Plume and Large Scale Mineralization Probe into Southwestern China. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 67—72 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Chen, Z. H., Chen, Y. C., et al., 2010. New Data of the Rock-Forming and Ore-Forming Chronology for China's Important Mineral Resources Areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1030—1040 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Zhang, Z. C., Hou, T., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of the Dabanshan Intrusion in Panxi District and Its Constraints on the Metallogenesis of Cu-Ni Sulfide Deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2665—2678 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. Y., 1997. Tectonic Evolution of Panzhihua-Xichang Paleorift during Late Palaeozoic. *Journal of Chengdu University of Technology*, 24(2): 48—53 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Liu, H. Y., Zhang, Y. Q., 2004. SHRIMP Dating of Aegirite Alkaline Rocks in Panxi Rift Zone and Its Geological Implications—Examples for Hongge, Baima and Jijie Rock Bodies. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2): 149—154 (in Chinese with English Abstract).
- Xiao, L., Franco, P., He, Q., 2007. A Preliminary Discussion

- on Large Igneous Provinces and Associated Ore Deposits. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 148—160 (in Chinese with English Abstract).
- Yang, G. X., Li, Y. J., Si, G. H., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Kubusunan Granodiorite and the Enclaves from Kalamaili Area in Eastern Junggar, Xinjiang, and Its Geological Implications. *Earth Science—Journal of Geosciences*, 35(4): 597—610 (in Chinese with English Abstract).
- Yang, S. H., Que, M. Y., 1987. Magnetite Characteristics of Magnetite from Pay Iron Deposits and the Genesis of the Deposits. Chongqing Press, Chongqing (in Chinese with English Abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Geostandard Research*, 28: 353—370. doi:10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x
- Zeng, L. G., 2011. A Study on Metallogenic Regularity of Pingchuang Iron Deposit in Yanyuan County, Sichuan Province, China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Y. X., Luo, Y. N., Yang, C. X., 1988. Panxi Rift. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, C. J., Liu, J. D., Liu, X. F., et al., 2004. Primary Discussion on Ore-Forming Effect of Emei Igneous Province. *J. Mineral. Petrol.*, 24(1): 5—9 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Z. C., Wang, F. S., 2003. Sr, Nd And Pb Isotopic Characteristics of Emeishan Basalt Province and Discussion on Their Source Region. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 431—439 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Z. C., Mahoney, J. J., Wang, F. S., et al., 2006. Geochemistry of Picritic and Associated Basalt Flows of the Flood Province, China; Evidence for a Plume-Head Origin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538—1552 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Z. C., Li, Y., Zhao, L., et al., 2007. Geochemistry of Three Layered Mafic-Ultramafic Intrusions in the Panxi Area and Constraints on Their Sources. *Acta Petrologica Sinica*, 10: 2339—2352 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Z. C., 2009. A Discussion on Some Important Problems Concerning the Emeishan Large Igneous Province. *Geology in China*, 36(3): 634—646 (in Chinese with English Abstract).
- Zhang, Z. C., Mahoney, J. J., Mao, J. W., et al., 2006. Geochemistry of Picritic and Associated Basalt Flows of the Western Emeishan Flood Basalt Province, China. *Journal of Petrology*, 47: 1997—2019. doi:10.1093/ptrology/eg1034
- Zhong, H., Xu, G. W., Zhu, W. G., et al., 2009. Petrogenesis of the Taihe Granites in the Emeishan Large Igneous Province and Its Tectonic Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(2): 99—110 (in Chinese with English Abstract).
- Zhong, H., Zhu, W. G., Hu, R. Z., et al., 2004. The Relationship of Geochronology, Geochemistry and Emeishan Basalts of Hongge Rock in Panxi. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(Supplement): 105 (in Chinese).
- Zhou, M. F., Malpas, J., Song, X. Y., 2002. A Temporal Link between the Emeishan Large Igneous Province (SW China) and the End-Guadalupe Plan Mass Extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3—4): 113—122. doi:10.1016/S0012-821X(01)00608-2

附中中文参考文献

- 和昭, 1986. 与攀西裂谷碱性杂岩有关的成矿系列. *地球科学——武汉地质学院学报*, 11(6): 652—658.
- 侯增谦, 陈文, 卢记仁, 2006. 四川峨嵋大火成岩省 259 Ma 大陆溢流玄武岩喷发事件: 来自激光⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年证据. *地质学报*, 1130.
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉, 2006. 川南德昌地区茨达碱性岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 25(3): 398—401.
- 刘红英, 2005. 攀西地区碱性岩的年代学研究及其地质意义 (博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 刘家铎, 张成江, 刘显凡, 等, 2004. 扬子地台西南缘成矿规律及找矿方向. 北京: 地质出版社.
- 卢记仁, 张光弟, 张承信, 等, 1987. 攀西层状基性超基性岩体岩浆类型及成因. *矿床地质*, 6(2): 1—15.
- 骆耀南, 1985. 攀西古裂谷研究中的认识和进展. *中国地质*, (1): 27—32.
- 梅厚均, 1973. 西南暗色岩深源分异两个系列的岩石化学特征与铁镍矿化的关系. *地球化学*, (4): 219—253.
- 沈苏, 金明霞, 陆元法, 1988. 西昌—滇中地区主要矿产成矿规律及找矿方向. 重庆: 重庆出版社.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等, 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(10): 2451—2456.
- 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 等, 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限. *地质学报*, 75(4): 498—506.
- 宋谢炎, 王玉兰, 曹志敏, 等, 1998. 峨眉山玄武岩、峨眉地裂运动与地幔柱. *地质地球化学*, (1): 47—52.
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 等, 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床

- 成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系. 矿物岩石, 25(4): 35—44.
- 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 等, 2004. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系——以云南金宝山岩体为例. 地质论评, 50(1): 9—16.
- 滕吉文, 魏斯禹, 1987. 中国四川攀枝花—西昌(攀西)裂谷的形成、演化与裂谷分类. 大地构造与成矿学, 11(1): 77—90.
- 田竞亚, 胡秀蓉, 1986. 攀枝花(式)铁矿成矿机理与生成环境初探. 地球科学——武汉地质学院学报, 11(6): 638—644.
- 王春光, 许文良, 王枫, 等, 2011. 太行山南段西安里早白垩世世角闪辉长岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和岩石地球化学证据. 地球科学——中国地质大学学报, 36(3): 471—482.
- 王登红, 1998. 地幔柱及其成矿作用. 北京: 地震出版社.
- 王登红, 2001. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨. 地学前缘, 8(3): 67—72.
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 等, 2010. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据. 地质学报, 84(7): 1030—1040.
- 王萌, 张招崇, 侯通, 等, 2011. 攀西地区大板山岩体的年代学、元素地球化学及其对铜镍硫化物矿床成因的约束. 岩石学报, 27(9): 2775—2678.
- 吴根耀, 1997. 攀枝花—西昌古裂谷晚古生代的演化. 成都理工大学学报, 24(2): 48—53.
- 夏斌, 刘红英, 张玉泉, 2004. 攀西古裂谷钠质碱性岩锆 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义——以红格、白马和鸡街岩体为例. 大地构造与成矿学, 28(2): 149—154.
- 肖龙, Franco Pirajno, 何琦, 2007. 试论大火成岩省与成矿作用. 高校地质学报, 13(2): 148—160.
- 杨高学, 李永军, 司国辉, 等, 2010. 东准库布苏南岩体和包体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 35(4): 597—610.
- 杨时惠, 阙梅英, 1987. 西昌—滇中地区磁铁矿特征及其矿床成因. 重庆: 重庆出版社.
- 曾令高, 2011. 四川盐源平川铁矿床成矿规律研究(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张云湘, 罗耀南, 杨崇喜, 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社.
- 张成江, 刘家铎, 刘显凡, 等, 2004. 峨眉火成岩省成矿效应初探. 矿物岩石, 24(1): 5—9.
- 张招崇, 王福生, 2003. 峨眉山玄武岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其物源探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4): 431—439.
- 张招崇, John J Mahoney, 王福生, 等, 2007. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据. 岩石学报, 22(06): 1538—1552.
- 张招崇, 李莹, 赵莉, 等, 2007. 攀西三个镁铁—超镁铁质岩体的地球化学及其对源区的约束. 岩石学报, 23(10): 2339—2352.
- 张招崇, 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论. 中国地质, 36(3): 634—646.
- 钟宏, 朱维光, 胡瑞忠, 等, 2004. 攀西地区红格岩体的年代学、地球化学特征及其与峨眉山玄武岩的联系. 矿物岩石地球化学通报, 23(增刊): 105.
- 钟宏, 徐桂文, 朱维光, 等, 2009. 峨眉山大火成岩省太和花岗岩的成因及构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 28(2): 99—110.