

青藏高原 Pb 同位素地球化学及其意义

赵志丹^{1,2}, 莫宣学^{1,2}, 董国臣^{1,2}, 周 肃^{1,3}, 朱弟成⁴, 廖忠礼⁴, 孙晨光^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083
3. 中国地质大学 地质实验中心, 北京 100083 4. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 根据青藏高原不同构造单元基底片麻岩、花岗岩类和火山岩等不同类型岩石的 486 套 Pb 同位素数据的整理和分析, 发现青藏高原岩石圈存在 3 种主要类型, 即亏损 Pb 同位素的特提斯洋地幔域端元、富集 Pb 同位素的喜马拉雅成熟大陆地壳端元和青藏高原北部的过渡型 Pb 同位素的地幔端元。这 3 类地球化学端元与前人通过 Sr-Nd 同位素研究获得的 3 类端元一致。拉萨地块内部不同类型岩石的 Pb 同位素地球化学特征指示出两类岩浆作用, 一类是特提斯洋岩石圈俯冲消减再循环和亏损地幔物质注入导致的亲特提斯洋型岩浆作用, 另一类是与类似于喜马拉雅大陆地壳物质加入导致的富集地幔源区有关的超钾质岩浆作用。岩浆作用的 Pb 同位素地球化学记录了特提斯洋俯冲消减作用和随后发生的印度大陆向北拼合、碰撞和俯冲过程, 也记录了大规模的壳幔相互作用对高原岩石圈演化与隆升的贡献。

关键词: Pb 同位素; 地球化学; 花岗岩; 火山岩; 青藏高原

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8527(2007)02-0265-10

Pb Isotopic Geochemistry of Tibetan Plateau and Its Implications

ZHAO Zhidan^{1,2}, MO Xuan-xue^{1,2}, DONG Guo-chen^{1,2}, ZHOU Su^{1,3},
ZHU Dì-cheng⁴, LIAO Zhong-li⁴, SUN Chen-guang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. Geological Analysis Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
4. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610082, China)

Abstract Pb isotopic compositions of basement granitoids and volcanic rocks in Tibetan Plateau, with a total data sets of 486, were compiled and analyzed. Three different types of main geochemical crustal or mantle geochemical end-members were identified by their Pb characteristics. The first one is the Neo-Tethyan mantle reservoir represented by Yarlung Zangpo ophiolite, showing low Pb features; the second one is the Himalayan continental crust represented by the basement and granitoids from Tethyan and Higher Himalayas with the most enriched Pb compositions; the third one is the North Tibetan Plateau enriched mantle source region, with a medium enriched Pb compositions. These three end-members classification is very consistent with the former result by Sr-Nd isotopic studies. A detailed discrimination for the rocks from Lhasa block allowed us to separate them into two groups. The first group, including the I-type Gangdese granitoid plutons, Linzizong volcanic rocks and adakitic ore-bearing porphyries, etc., shows strong Tethyan oceanic crust affinity, with significant source contribution of the recycled Tethyan oceanic crust or depleted mantle. The second group, solely represented by the ultrapotassic volcanics found in western Lhasa block, exhibits an obvious input of the Himalayan continental crust to the mantle source regions. In Lhasa block, the main processes of Tethyan subduction and thereafter India-Asia collision

收稿日期: 2007-04-08; 改回日期: 2007-05-09; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412603); 国家自然科学基金项目 (40473020, 40103003, 40503005, 40572048, 40672044); 中国地质调查局综合研究项目 (1212010610104); 高等学校学科创新引智计划 (E07011); 中国科学院广州地球化学研究所同位素开放实验室基金项目。

作者简介: 赵志丹, 男, 教授, 博士生导师, 1968 年出生, 岩石学和地球化学专业, 主要从事青藏高原及邻区岩石圈地球化学研究。Email: zlzhaod@cugb.edu.cn

were all recorded by Pb isotopic geochemistry in magmatism during different stages. The crust-mantle interaction among the above end-members has played an important role in the evolution and uplift of the Tibetan Plateau.

Key words Pb isotope; geochemistry; granitoid; volcanic rocks; Tibetan Plateau

0 引言

将不同规模的大洋和大陆的地球化学特征进行对比来鉴别不同块体的属性,是地球化学参与大地构造研究的一种重要方法,也是研究古大陆再造和揭示全球大陆与大洋化学不均一性的重要方法之一^[1-5],被广泛用于块体地球化学属性的鉴别,其中尤其是Pb同位素体系,因其能够明显表现出块体内部壳—幔Pb同位素成分的耦合性和块体之间特征的差异性,而被认为是进行块体划分与鉴别的最好指标之一,已经在全球和中国大陆被广泛使用^[6]。

在中国东部地区最早开始的Pb同位素地球化学研究(也称Pb同位素填图)及其之后扩大到整个中国大陆和邻区各个重要块体属性研究,主要选择代表地壳的岩石(花岗岩全岩或者长石、麻粒岩和其他基底岩石)、代表地幔的岩石(幔源火山岩)和矿石来代表块体内部不同层次Pb同位素特征。已有研究较好地确定了中国大陆和亚洲地区主要块体的地球化学归属,将中国大陆划分出华夏、东北、华北、扬子等Pb地球化学省,并且确定了各地球化学省之间存在的明显的地球化学边界,并应用于大型—超大型金属矿集区、大型油田以及环境和灾害研究中^[5-8]。在尺度略小的造山带地区也开展了十分有意义的研究,例如在秦岭造山带及其邻区的研究中,Pb同位素不仅用来鉴别块体属性,还能更好地解释造山带演化历史和造山带内部块体之间俯冲和叠置关系^[9-11];在云南三江、大别造山带等地区也成功地开展了类似的研究,用来解决块体属性和成矿带的划分,收到很好的效果^[12-17]。

而对于中国西南部的青藏高原及其邻区的此类研究尚未系统开展,这主要是由于中国西部地区整体的研究程度低,同位素地球化学数据积累不足。在讨论中国大陆同位素地球化学分区的有关文献中^[15-6,18],也有少量对西藏地区的讨论,但是涉及较少。就青藏高原的具体情况看,其内部各个构造单元之间存在复杂的演化历史和多种成因类型的岩浆作用,因此需要在年代学、岩石学

与地球化学的多种鉴别方法基础上,讨论高原的块体性质与演化,这将有助于了解块体之间相互作用和印度与亚洲大陆之间碰撞与俯冲的岩石圈结构。

对青藏高原中部冈底斯地区和南部喜马拉雅地区的花岗岩和基底岩石的Pb同位素研究最为系统和丰富的数据是Garjépý等^[19]发表的,包括了6个花岗岩带的80个钾长石的Pb同位素资料,该研究很好地揭示了拉萨地块和印度地盾(喜马拉雅带)的差异,并且最早提出它们应分属于两个性质迥异的Pb同位素省,起源于冈瓦纳大陆的不同部分,这是开创性的工作。之后Clift等^[20-21]进行了印度河沉积物的Nd和碎屑钾长石的Pb同位素的研究,以及印度河磨拉石中碎屑钾长石Pb同位素研究,鉴别沉积物剥蚀源区属性、探讨青藏高原西构造结地区隆升与剥蚀历史。但是这些研究,没有涉及青藏高原北部的羌塘、可可西里和昆仑构造带等地区 and 雅鲁藏布江蛇绿岩带,从我们获得的研究结果并且结合已有的数据发现,对整个高原地区,包括西藏南部的喜马拉雅带、中部的雅鲁藏布江蛇绿岩和冈底斯带(拉萨地块)、北部的羌塘、松潘甘孜—可可西里带和昆仑带的详细划分将可以更全面地研究高原的岩石圈性质和构造演化历史。例如高原内部不同单元的地幔和地壳的地球化学特征、块体的起源与生长历史、冈底斯带的地壳结构、印度板块向北部俯冲到冈底斯带之下部等问题。最近莫宣学等^[22]应用SrNd同位素进行了青藏高原主要地球化学端元的鉴别,是一种同位素地球化学分区的一次成功尝试。

本文主要利用近年来已经发表的和我们自己积累的Pb同位素数据,试图鉴别青藏高原不同构造单元的性质,并且着重研究拉萨地块南部不同类型岩浆作用特征及其意义。

1 青藏高原主要构造单元划分及研究进展

本文进行的Pb同位素地球化学研究主要包括的构造单元是青藏高原南部的冈底斯带(也称拉萨地块)和喜马拉雅带,高原北部的羌塘地块、可可

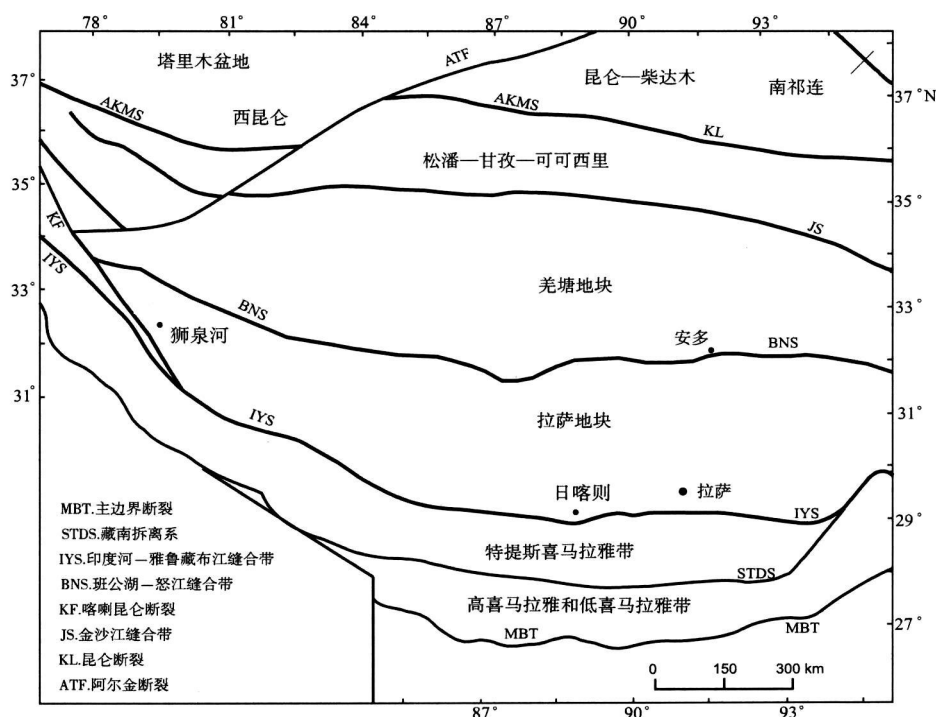


图 1 青藏高原构造分区简图 (据莫宣学等^[22]修改)

Fig. 1 Tectonic map of the Tibetan Plateau showing the main tectonic units (modified after Mo et al^[22])

西里和西昆仑地区 (图 1)。以下按照构造单元从南向北顺序介绍各个单元的基本特征和地球化学研究的现状。

1.1 喜马拉雅带

对喜马拉雅带的研究是国际上持续近百年的研究热点^[23]。喜马拉雅带在东西延长超过 1 000 km 的范围内, 大致显示了南北向的分带, 最北带是以印度河—雅鲁藏布江缝合带作为北界、藏南拆离系 (STDS) 为南界的特提斯喜马拉雅, 该带主要是古生代以来的沉积地层和规模不大的侵入体。在 STDS 以南, 到主中央断裂 (MCT) 之间是高喜马拉雅带, 主要是变质岩系 (又被称为高喜马拉雅结晶岩系) 和淡色花岗岩为主的侵入岩。在 MCT 以南到主边界断裂 (MBT) 之间为低喜马拉雅带, MBT 向南为次喜马拉雅的西瓦里克磨拉石沉积带。对喜马拉雅带积累了大量的年代学和 Sr-Nd 同位素地球化学资料, 尤其是高喜马拉雅和低喜马拉雅具有明显不同的年龄和 Nd 同位素特征, 其中高喜马拉雅结晶岩系年龄为 1.1~1.7 Ga ϵ_{Nd} 为 -15~-19, 低喜马拉雅岩系年龄为 1.9~2.6 Ga ϵ_{Nd} 为 -21~-26, 而特提斯喜马拉雅主体年龄为 0.5~1.1 Ga, 其 Nd 同位素特征与高喜马拉雅无法区分, 因此低喜马拉雅和高喜马拉雅明显属于不同

的块体, 它们是大陆碰撞发生之后沿着 MCT 由于造山作用拼合在一起的 (文献 [24] 及其中的文献), 喜马拉雅带内部不同构造单元同位素特征的差异为鉴别高原剥蚀和隆升提供了基本的地球化学端元^[20-21]。

1.2 拉萨地块

拉萨地块也被称为念青唐古拉—冈底斯构造带。它是介于印度河—雅鲁藏布江缝合带与北部的班公湖—怒江缝合带之间的块体, 其研究程度相对较高, 尤其是冈底斯带的中部地区。潘桂棠等^[25]研究认为, 冈底斯带可划分为 6 类不同的构造单元和 18 个次级单元, 冈底斯带不是简单的地块、陆块或地体, 而很可能是以隆格尔—念青唐古拉为主轴, 经历石炭纪—二叠纪、早中三叠世、晚三叠世、早中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世—始新世 6 次造弧增生作用和相关的弧—陆、陆—陆碰撞作用并最终定型于新生代晚期的复合造山带。本文在冈底斯带开展研究和收集的资料最多, 具体包括了拉萨地块西部狮泉河江巴—邦巴—雄巴一带的晚侏罗纪花岗岩类、安多地区基底片麻岩、与大陆碰撞有关的林子宗火山岩和同时代的曲水岩基、碰撞后的钾质和超钾质岩石以及与斑岩矿床有关的埃达克质岩石^[22]。从

碰撞后钾质与超钾质岩石的地球化学研究入手,赵志丹等人认为冈底斯带东西向存在地壳结构的差异,并认为这种差异是印度大陆在冈底斯带之下的差异俯冲导致的^[22-26],侯增谦等人^[27]则从航磁异常、地质构造、岩浆作用、矿床分布等综合特征上,提出冈底斯带在大陆碰撞以来,存在系统的东西向分带性。本文充分注意到上述研究结果,试图从 Pb 同位素方面做进一步的分析。

1.3 雅鲁藏布江蛇绿岩

雅鲁藏布江蛇绿岩断续分布于拉萨地块南缘和特提斯喜马拉雅带的北缘,是东西向延伸超过 2 000 km 的新特提斯洋的残余,对其进行的包括地质学、古生物学、岩石学和地球化学等方面的研究历史可以追溯到上世纪 80 年代,奠定了该地区蛇绿岩研究的基础^[28-29]。近年来对这套蛇绿岩的研究不仅在岩石学、地球化学和同位素年代学方面取得了新进展,较好地探讨了蛇绿岩的成因和演化^[30-33],而且出现了新趋势,强调研究蛇绿岩中基性岩石的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学,发现特提斯地幔域与现今印度洋大洋中脊玄武岩的地球化学特征相似,且特提斯地幔域自 550 Ma 以来就具有印度洋 MORB 型同位素组成特征,特提斯闭合后,它的地幔域特征被印度洋洋幔所继承^[34-41]。由于拉萨地块南部是新特提斯大洋岩石圈俯冲消亡的前缘地区,大量岛弧型岩浆作用(如冈底斯岩基、林子宗火山岩、埃达克质岩石等)都明显具有特提斯洋岩石圈的 Sr-Nd 同位素印记^[22],已经消亡的特提斯大洋岩石圈发生了大规模的再循环作用,导致了拉萨地块南部地壳的增生作用^[42]。

1.4 青藏高原北部主要构造单元

青藏高原北部主要构造单元在构造区域上包括青藏高原北部的羌塘地块、松潘—甘孜—可可西里、西昆仑地区,莫宣学等^[21]将其称为藏北地球化学省。这些单元内部产出的碰撞后岩浆岩分布广、时代跨度大,但是其同位素特征却十分均匀,其岩石圈在 Nd-Sr 同位素地球化学特征上已经构成统一的整体,可以代表印度—亚洲大陆碰撞前青藏高原原有的岩石圈地球化学组分。本文主要探讨这些岩石在 Pb 同位素特征上的特殊性。

2 Pb 同位素数据来源和处理

本文 Pb 同位素数据来源于本文研究结果和文献发表的数据,包括喜马拉雅带各带的片麻岩和花岗岩和少量火山岩,拉萨地块的花岗岩类、火

山岩和含矿埃达克岩,雅鲁藏布江蛇绿岩中的基性岩石(玄武岩和辉长岩/辉绿岩),青藏高原北部羌塘、可可西里、西昆仑的火山岩。所有 Pb 同位素原始数据合计 486 套,由于样品数量多,限于篇幅这里没有列出所有原始数据。另外,在 Pb 同位素数据投点作图的处理中,为了避免原始数据过多造成投点区域重叠,不利于区分;同时考察各个地质单元内部数据比较均匀、数据分布范围窄,表明这些单元内的 Pb 同位素成分比较均一,因而本文对每个地质单元或者每个研究者的 Pb 数据计算列出了平均值,再对这些平均值进行同位素成分投点和分析,这样显示的规律性更加明显和清晰。Pb 同位素平均值结果列于表 1 和表 2 中,所有样品投点在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中(图 2 和图 3)。

3 研究区各构造单元 Pb 同位素特征

青藏高原各类岩石的 Pb 同位素成分总体显示出线性分布特征(图 2),在线性分布的两个端元分别是雅鲁藏布江蛇绿岩和喜马拉雅带。其中,雅鲁藏布江蛇绿岩的玄武岩和辉长—辉绿岩的 Pb 同位素成分是青藏高原最低的地球化学端元,其平均值分布范围分别是, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.707~18.164, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.415~15.543, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.396~38.222。这一范围表明已经俯冲消亡的新特提斯洋的地幔域是一个亏损 Pb 的源区,它与现今印度洋大洋中脊玄武岩(MORB)成分一致。

青藏高原 Pb 同位素最富集的端元是喜马拉雅造山带,其内部各个单元都显示了富集 Pb 同位素的特征。其中,高喜马拉雅片麻岩 Pb 成分最高,其 3 个 Pb 同位素比值分别是, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 19.500~19.736, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.833~15.843, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 40.212~40.241,而被认为属于高喜马拉雅片麻岩重熔形成的淡色花岗岩和特提斯喜马拉雅的花岗岩都显示了与片麻岩接近的 Pb 成分。喜马拉雅带总体显示了富集 Pb 的成熟大陆地壳的特征,这与 Sr-Nd 同位素结果一致^[22]。

青藏高原北部各个构造带(简称为藏北)发育的钾质和超钾质岩石(其年龄为 0~39 Ma)具有高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.662~18.996)、中等 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.575~15.716) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (38.712~39.374) 成分(图 2 和图 3),明显区别于前述的特提斯地幔域和喜马拉雅地壳,也区别于拉萨地块的各类岩石,说明藏北地区为一个特殊的富集型地幔域。此

表 1 青藏高原火山岩 Pb 同位素成分
Table 1 Pb isotopic compositions of the volcanic rocks from Tibetan Plateau

构造单元、地点	岩性	年龄 / M a	样品数	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	数据来源
拉萨地块南缘中段岛弧型火山岩	尼木县麻江	钾玄质火山岩	10~ 16	5	18. 577	15. 628	38. 848 文献 [43]
	当雄县羊应	钾玄质火山岩	9~ 11	3	18. 631	15. 729	39. 339 本文, 文献 [44]
	南木林乌郁盆地	花岗斑岩	11	5	18. 499	15. 603	39. 021 文献 [45]
	南木林乌郁盆地	英安岩	12~ 14	9	18. 520	15. 614	38. 983 本文
	达孜一甲马次火山岩	玄武岩和玄武安山岩	38~ 42	9	18. 458	15. 598	38. 650 文献 [46]
	林子宗火山岩	中酸性火山岩	43~ 65	13	18. 653	15. 599	38. 751 文献 [47]
拉萨地块西部钾质超钾质火山岩	措勤县扎布耶茶卡	超钾质粗安岩	16. 0~ 16. 2	6	18. 813	15. 759	39. 548 本文, 文献 [44]
	狮泉河	钾质和超钾质火山岩		2	18. 707	15. 775	39. 654 文献 [43]
	阿里革吉县邦巴	钾质火山岩	18~ 23	6	18. 588	15. 712	39. 489 文献 [48]
	尼玛县文布	粗面岩和响岩	23	5	18. 531	15. 726	39. 363 文献 [49]
	昂仁县查孜	粗安岩和粗面岩	13	5	18. 864	15. 741	39. 531 文献 [49]
	拉萨地块西部火山岩	超钾质岩石	11~ 17	14	18. 748	15. 767	39. 736 本文
青藏高原北部钠质火山岩	西羌塘岩省邦达错	钠质玄武岩	44	2	18. 416	15. 522	38. 692 文献 [50]
	西羌塘岩省邦达错	钠质, 夏威夷岩	45~ 60	3	18. 338	15. 501	38. 534 文献 [49]
	可可西里岩省鲸鱼湖	钠质安粗岩类		6	18. 613	15. 612	37. 510 文献 [51]
	拉嘎拉 羌塘	钠质橄榄玄武岩	60	2	18. 851	15. 581	38. 927 文献 [49, 52]
青藏高原北部钾质和超钾质岩石	中昆仑羊湖和羌巴欠	安粗岩类	15. 0~ 16. 5	4	18. 701	15. 688	39. 075 文献 [43, 50]
	西昆仑岩省黑石北湖	安粗岩	0. 07	2	18. 713	15. 671	38. 992 文献 [43, 50]
	西昆仑岩省于田普鲁	钾质岩石	1. 0~ 1. 4	9	18. 662	15. 644	38. 758 文献 [53, 54, 55]
	西昆仑阿什库勒	粗安岩	0. 1~ 2. 8	7	18. 779	15. 674	39. 065 文献 [56]
	西昆仑岩省泉水沟	安粗岩和碱玄岩	3. 6~ 5. 6	9	18. 745	15. 690	39. 106 文献 [57]
	可可西里	安粗岩		9	18. 735	15. 695	39. 173 文献 [43]
	松潘—甘孜带	钾质和超钾质岩石	0. 3~ 17. 0	14	18. 735	15. 678	38. 926 文献 [55]
	羌塘 鱼鳞山	超钾质岩石	30	19	18. 986	15. 716	39. 374 文献 [49, 52]
	羌塘 U lugh M uztagh	酸性岩类	4~ 16	13	18. 996	15. 647	35. 779 文献 [58]
	北羌塘	钾质和超钾质岩石	27~ 45	16	18. 896	15. 710	39. 205 文献 [43, 55]
特提斯喜马拉雅火山岩	北羌塘	高钾钙碱性岩石	39~ 42	17	18. 749	15. 667	38. 999 文献 [59]
	特提斯喜马拉雅	玄武岩	三叠纪—侏罗纪	13	18. 416	15. 560	38. 558 文献 [61]
	特提斯喜马拉雅	流纹英安岩	133	3	19. 239	15. 730	40. 295 文献 [61]

注: 本文样品测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所。

外, 藏北地区钠质火山岩 (年龄为 44~ 60 M a) 显示了不同的 Pb 同位素特征, 应为一个存在时间早于富集地幔的亏损地幔源区。

拉萨地块各类岩石的 Pb 同位素成分介于上述的雅鲁藏布江亏损地幔端元和喜马拉雅富集陆壳端元之间, 显示了过渡的特征 (图 2)。放大后的图 3 更清楚地显示出这些岩石可以划分为 2 种类型。第 1 种类型是拉萨地块南部与特提斯洋岩石圈俯冲消减有关的岛弧型岩浆作用形成的岩石

(其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18. 338 \sim 18. 631$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15. 501 \sim 15. 669$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38. 391 \sim 39. 101$), 它们的成分趋于靠近特提斯洋地幔, 这类岩石包括了林子宗群和南木林—当雄一带的火山岩、曲水岩体为代表的侵入岩以及近年来发现的埃达克质含矿斑岩。拉萨地块的第 2 种岩石是分布于西部的超钾质岩石, 它们的 Pb 成分 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18. 531 \sim 18. 864$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15. 712 \sim 15. 775$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39. 363 \sim 39. 736$) 甚至高于拉萨地块

表 2 青藏高原拉萨地块和喜马拉雅带、雅鲁藏布江蛇绿岩的 Pb同位素成分

Table 2 Pb isotopic compositions of the basement and granitoid from Lhasa block and Himalayan belts basic rocks from Yalung Zangpo ophiolite Tibetan Plateau

构造单元、地点与岩性(年龄)		矿物/全岩	样品数	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	数据来源
拉萨地块东部基底片麻岩	羊八井片麻岩	钾长石	3	18.713	15.698	39.325	文献[19]
	安多片麻岩	钾长石	4	18.603	15.750	39.043	文献[19]
拉萨地块中部壳源花岗岩	羊八井花岗岩	钾长石	7	18.607	15.701	39.087	文献[19]
	羊八井二云母花岗岩(53Ma K-Ar)	全岩	2	18.658	15.660	39.033	文献[61]
	班戈一谷露花岗岩	钾长石	12	18.664	15.738	39.095	文献[19]
	安多花岗岩	钾长石	10	18.513	15.754	39.101	文献[19]
	罗扎白云母花岗岩(116~127Ma U-Pb)	全岩	4	19.031	15.703	39.337	文献[61]
拉萨地块南部安第斯型花岗岩	曲水花岗闪长岩(41.1Ma U-Pb)	钾长石	7	18.518	15.669	38.784	文献[19, 62]
	曲水花岗闪长岩和花岗岩	钾长石和斜长石	8	18.471	15.608	38.544	文献[63]
	拉萨一带花岗岩类	钾长石	5	18.524	15.605	38.603	文献[19, 62]
	大竹卡闪长岩(67~94.2Ma U-Pb)	钾长石	3	18.403	15.588	38.391	文献[19, 62]
	仁布一曲水花岗岩类	全岩	11	18.536	15.564	38.533	本文
拉萨地块南部含矿斑岩		全岩	22	18.455	15.577	38.597	文献[64]
拉萨地块西部江巴、邦巴、雄巴花岗岩		全岩	11	18.803	15.708	39.294	本文
拉萨地块日喀则一曲水辉长-闪长质侵入岩		全岩	13	18.040	15.525	38.168	本文
特提斯喜马拉雅淡色花岗岩		钾长石和全岩	20	19.009	15.757	39.403	文献[19, 61, 65]
高喜马拉雅花岗岩	聂拉木混合花岗岩(17Ma U-Pb)	钾长石	08	19.062	15.814	39.715	文献[19, 65]
	珠穆朗玛峰花岗岩(14.3Ma U-Pb)	钾长石	8	19.068	15.813	39.692	文献[19, 65]
	Manash淡色花岗岩	钾长石	4	19.213	15.801	39.994	文献[19]
	Manash淡色花岗岩(17~24Ma)	全岩	11	18.780	15.758	39.406	文献[66, 67]
高喜马拉雅基底片麻岩		钾长石	04	19.736	15.833	40.212	文献[19];
		全岩	7	19.500	15.843	40.241	文献[67]
雅鲁藏布江蛇绿岩	日喀则,辉长岩(120Ma U-Pb)	全岩	11	17.607	15.426	37.413	文献[68]
	日喀则下鲁,辉长岩	全岩	6	17.716	15.415	37.396	文献[34]
	罗布莎辉长岩(177Ma Sm-Nd)	全岩/斜长石/辉石	5	17.795	15.482	37.681	文献[69]
	日喀则德村玄武岩和辉绿岩	全岩	6	17.862	15.469	37.581	文献[41]
	日喀则吉定玄武岩和辉长岩	全岩	6	17.994	15.513	37.885	文献[41]
	日喀则昂仁辉长岩	全岩	4	18.164	15.543	38.222	文献[41]
	当穷、达吉瓮、大竹卡等基性岩石	全岩	19	18.134	15.491	38.019	文献[35]

注: 本文样品在中国科学院地质与地球物理研究所测试。

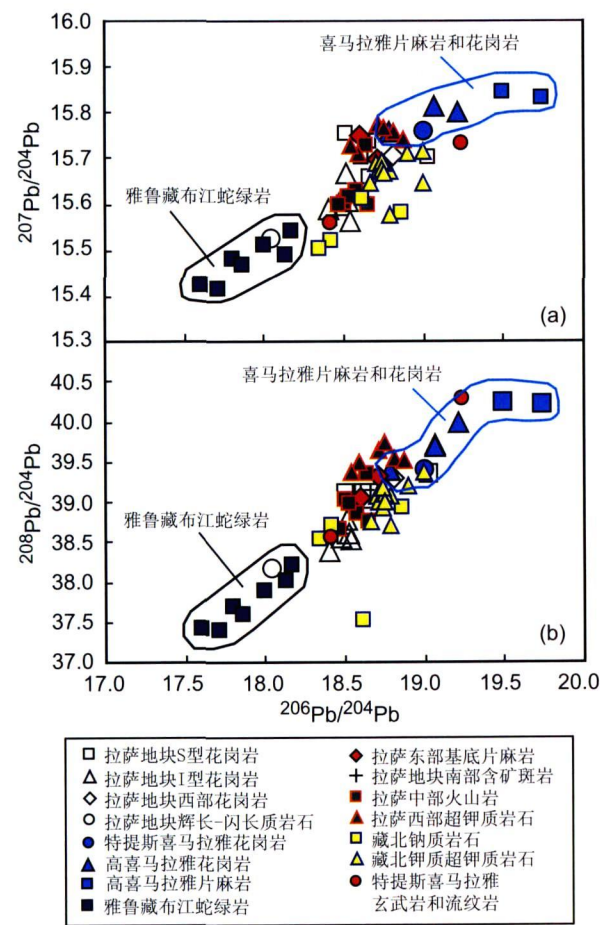
内部安以多群为代表的基底片麻岩, 且部分落入了喜马拉雅带 Pb成分区域, 超钾质岩石的地幔源区显示了与喜马拉雅成熟的大陆地壳物质的亲缘性。在拉萨地块除了上述 2 种主要类型外, 还有拉萨地块中部的安多群片麻岩和成分相同、具有成因联系的壳源 S 型花岗岩和拉萨地块西部狮泉河地区的花岗岩, 其成分略低于拉萨地块西部的超钾质岩石, 也区别于喜马拉雅和藏北岩石, 在拉萨地块中部和西部花岗岩没有显示明显的差异; 在冈底斯岩基中发现的辉长-闪长质岩石, 也显示了类似于雅鲁藏布江蛇绿岩的亏损型 Pb 特征, 这是大陆碰撞后亏损地幔物质加入到地壳导致拉萨地块南部地壳增生和岩浆混合作用的 Pb 同位素

证据。

4 青藏高原 Pb同位素差异及其意义

4.1 青藏高原主要地球化学端元的 Pb同位素特征

莫宜学等人^[22]在先前的研究中, 应用 Sr, Nd 同位素成分将青藏高原岩石圈划分为 3 种主要的地球化学端元, 即青藏高原北部地球化学省(包括羌塘、可可西里和西昆仑)代表的青藏原始岩石圈地幔地球化学端元、雅鲁藏布江蛇绿岩代表的新特提斯洋地幔端元(印度洋型地幔域)和喜马拉雅带地壳基底和花岗岩类显示的印度大陆北缘大陆地壳地球化学端元。上述对数据的分析所鉴别出



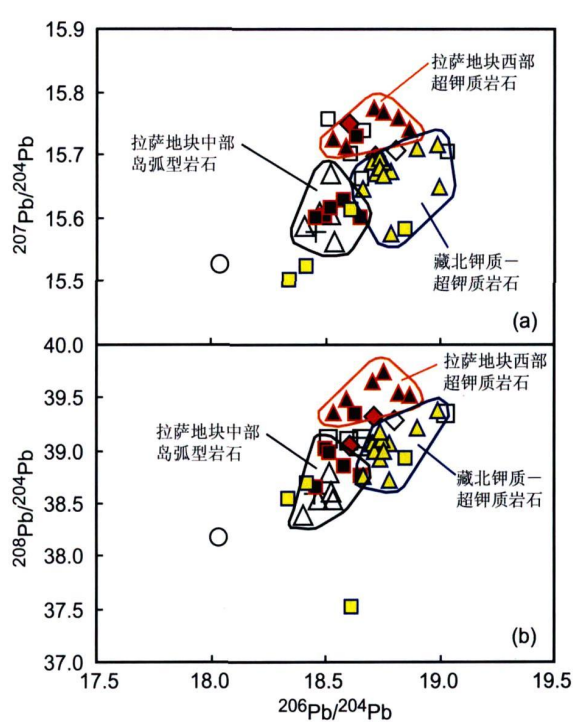
(a) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图; (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图
图 2 青藏高原各类岩石的 Pb 同位素成分图 (数据来源见表 1 和表 2)

Fig. 2 Pbts of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of the rocks from Tibetan Plateau (see Table 1 and 2 for data source)

来的 3 个 Pb 地球化学端元, 与应用 Sr、Nd 同位素成分划分的 3 个端元是一一对应的, 这进一步地支持青藏高原 3 种主要地球化学端元的划分。

4.2 青藏高原大陆特征对比

由于现有的数据缺少藏北地区沉积岩和花岗岩的 Pb 数据, 因此还无法鉴别藏北地区地壳 Pb 的特征及其与南部的拉萨地块和喜马拉雅带的联系。但是拉萨地壳物质 (基底片麻岩和拉萨地块中部和西部的花岗岩) 与同样来源于冈瓦纳大陆的印度大陆北缘的喜马拉雅大陆地壳没有显示很好的一致性。Gariépy 等人^[19]曾根据有限的发现拉萨地块与喜马拉雅带之间的明显区别, 认为它们虽然都起源于南部的冈瓦纳古陆, 但是应起源于冈瓦纳古陆不同的微陆块。本文结果表明, 拉萨地块仅在中部和北部地区出露的片麻岩, 显示了



(a) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图; (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

图 3 青藏高原拉萨地块和藏北地区各类岩石的 Pb 同位素成分图 (数据来源见表 1 和表 2, 图例同图 2)

Fig. 3 Pbts of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of the rocks from Lhasa block and northern Tibetan Plateau (see Table 1 and 2 for data source, symbols are same as those in Fig. 2)

富集 Pb 同位素的特征, 且与喜马拉雅带成分接近, 但存在地球化学的不均一性。在地幔源区对比方面, 尽管朱弟成^[60]获得了三叠纪-侏罗纪玄武岩和桑秀组的 Pb 成分, 但是数据依然有限, 无法全面评价喜马拉雅带的地幔特征。

4.3 青藏高原大陆碰撞过程中的壳幔相互作用和大陆俯冲

莫宜学等人^[22]依据 Sr-Nd 同位素研究揭示出, 拉萨地块在印度与亚洲大陆碰撞以来的岩浆作用中可以划分出 3 种地球化学类型, 即拉萨地块原地型、亲特提斯洋型和亲喜马拉雅型, 且这 3 种岩浆作用类型受控于上述 3 种地球化学端元在高原构造演化不同阶段的源区相互作用。前面已经述及, 这 3 种岩浆作用类型在 Pb 同位素特征上同样具有明显的差异。拉萨地块原地型在壳源岩浆作用中表现在 S 型花岗岩与安多群片麻岩具有相同的 Pb 同位素特征, 是拉萨地块内部地壳基底物质再循环的结果 (图 2)。亲特提斯洋型岩浆作用, 包括拉萨地块南部东西向带状展布的林子宗火山

岩和冈底斯花岗岩岩基, 以及乌郁群火山岩和麻江火山岩和埃达克质含矿斑岩, 它们的 Pb 同位素特征分布在指向和靠近特提斯洋地幔域端元, 表明源区受到新特提斯洋地幔端元或者一个新的亏损地幔端元的控制, 是新特提斯洋岩石圈向着青藏高原原始岩石圈俯冲及再循环或者幔源岩浆注入地壳的结果。幔源物质加入被认为是大陆碰撞之后导致地壳增生加厚和高原隆升的重要因素^[42], 冈底斯带南部岩基中大量辉长—闪长质侵入体的 Pb 同位素特征也属于类似于特提斯地幔域的亏损地幔端元(图 2)。特提斯洋俯冲消减作用和亏损地幔物质的加入对拉萨地块原有大陆基底产生大规模的改造作用, 具体体现在拉萨地块南缘的岛弧岩浆作用中, 反映的是大陆增生与洋壳物质的再循环。就拉萨地块来说, 总体的地壳基底与沉积岩出露面积有限, 仅在冈底斯中部的弧背断隆带出露^[25], 而在拉萨地块南部地区出露大面积的花岗岩岩基和以林子宗火山岩为代表的岛弧型火山岩, 都是洋壳消减和大陆碰撞过程中导致的拉萨地块陆壳增生, 这是高原隆升和岩石圈加厚的一种重要机制。

拉萨地块的亲喜马拉雅型岩浆作用主要是指拉萨地块西部的超钾质岩石, 它们的 Sr-Nd 同位素成分介于藏北地球化学省与喜马拉雅基底和花岗岩类岩石这两个地球化学端元之间, 显示了较好的双曲线型两端元源区混合趋势, 被认为可能作为印度大陆岩石圈俯冲到拉萨地块之下的岩浆作用证据^[22 26 70]。本文的 Pb 同位素组成, 也支持这样的结果, 这些超钾质岩石具有与喜马拉雅基底和花岗岩成分重叠的 Pb 同位素成分, 进一步支持具有高 Pb 的成熟大陆地壳物质已经加入到超钾质岩石的地幔源区、形成了青藏高原南部富集地幔源区这一观点。

5 结 论

对青藏高原不同构造单元 486 套 Pb 同位素数据的整理和分析表明, 青藏高原存在亏损 Pb 同位素的特提斯洋地幔域端元、富集 Pb 同位素的喜马拉雅成熟大陆地壳端元和藏北地区的过渡型 Pb 同位素地幔端元。在拉萨地块内部, 存在两类不同的岩浆作用类型, 一是与特提斯洋岩石圈俯冲消减再循环或者亏损地幔物质注入有关的亲特提斯洋型岩浆作用, 二是与成分类似于喜马拉雅大陆地壳的物质加入导致的富集地幔源区有关的拉萨

地块西部超钾质岩浆作用。拉萨地块作为特提斯洋和印度大陆向北先后俯冲消减的前缘地区, 记录了大规模的壳幔相互作用和高原岩石圈演化与隆升过程的信息。

谨以此文纪念尊敬的池际尚院士诞辰 90 周年。

参考文献:

- [1] Hart S. A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle [J]. *Nature*, 1984, 309: 753–757.
- [2] Aitchison S J, Hamon R S, Moorbath S, et al. Pb isotopes define basement domains of the Altiplano—central Andes [J]. *Geology*, 1995, 23(6): 555–558.
- [3] 欧阳自远, 张福勤, 林文祝, 等. 地球铅同位素早期不均一性及其起源 [J]. *科学通报*, 1995, 40(16): 1480–1482.
- [4] Connelly J N, Thrane K. Rapid determination of Pb isotopes to define Precambrian allochthonous domains: An example from West Greenland [J]. *Geology*, 2005, 33(12): 953–956.
- [5] 朱炳泉. 壳幔化学不均一性与块体地球化学边界研究 [J]. *地质前缘*, 1998, 5(1–2): 72–82.
- [6] 朱炳泉, 常向阳. 地球化学省与地球化学边界 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 153–162.
- [7] Zhu B. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 55: 171–181.
- [8] 张理刚, 王可法, 陈振胜, 等. 中国东部中生代花岗岩长石铅同位素主持与铅同位素省划分 [J]. *科学通报*, 1993, 38(3): 254–257.
- [9] 张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(3): 201–208.
- [10] 赵志丹, 张本仁, 高山, 等. 秦岭造山带地球化学图 [M]. / 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带造山过程与岩石圈三维结构图丛. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 等. 东秦岭造山带花岗岩类长石铅同位素组成及其构造学意义 [J]. *地质学报*, 1997, 71(2): 142–149.
- [12] 匡少平, 张本仁, 凌文黎, 等. 大别造山带和扬子陆块北缘中生代玄武岩铅同位素组成及构造意义 [J]. *地质学报*, 2002, 76(1): 27–32.
- [13] 徐启东, 欧阳建平, 张本仁, 等. 大别造山带北缘古生代构造—地层岩片的构造归属——岩石铅同位素组成提供的信息 [J]. *自然科学进展*, 2002, 12(5): 509–514.
- [14] 魏启荣, 沈上越, 莫宣学, 等. 三江中段两古陆铅同位素地球化学边界的厘定 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(2): 143–149.
- [15] Zhang H, Zhong Z, Gao S, et al. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan Granite: constraints on crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling-Tongbaishan-Dabie orogenic belt, central China [J]. *Lithos*, 2004, 73(3–4): 215–227.
- [16] 朱炳泉, 李献华. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼

- 论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 朱炳泉. 地球化学省与地球化学急变带 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 118.
- [18] 刘嘉麒. 中国火山 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] Garępy C, Allègre C, Xu R. The Pb isotope geochemistry of granitoids from the Himalaya-Tibet collision zone: implications for crustal evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1985, 74: 220–234.
- [20] Clift P D, Shin zu N, Layne G D, et al. Tracing patterns of erosion and drainage in the Paleogene Himalaya through ion probe Pb isotope analysis of detrital K-feldspars in the Indus Molasse, India [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2001, 188(3–4): 475–491.
- [21] Clift P D, Lee J I, Hildebrand P, et al. Nd and Pb isotope variability in the Indus River System: implications for sediment provenance and crustal heterogeneity in the Western Himalaya [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2002, 200(1–2): 91–106.
- [22] 莫宣学, 赵志丹, DePaolo D, 等. 青藏高原拉萨地块碰撞—后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和成矿作用的启示: Sr-Nd 同位素证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 795–803.
- [23] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation [J]. *Earth-Science Reviews* 2006, 76: 1–131.
- [24] Richards A, Argles T, Harris N, et al. Himalayan architecture constrained by isotopic tracers from clastic sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2005, 236(3–4): 773–796.
- [25] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 521–533.
- [26] 赵志丹, 莫宣学, 罗照华, 等. 印度—亚洲俯冲带结构——岩浆作用证据 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 149–157.
- [27] 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山—岩浆作用证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 761–774.
- [28] 肖序常. 藏南日喀则蛇绿岩及有关的大地构造问题 [M] // 李光岑, Mercier J L. 中法喜马拉雅考察成果. 北京: 地质出版社, 1984: 143–168.
- [29] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1–137.
- [30] Dupuis C, Hébert R, Dubois-Cré V, et al. The Yarlung Zangbo Suture Zone ophiolitic mélange (southern Tibet): new insights from geochemistry of ultramafic rocks [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2005, 25: 937–960.
- [31] Dupuis C, Hébert R, Dubois-Cré V, et al. Petrology and geochemistry of mafic rocks from mélange and flysch units adjacent to the Yarlung Zangbo Suture Zone, southern Tibet [J]. *Chemical Geology* 2005, 214: 287–308.
- [32] Dubois-Cré V, Hébert R, Dupuis C, et al. Petrological and geochemical evidence for the origin of the Yarlung Zangbo ophiolites, southern Tibet [J]. *Chemical Geology* 2005, 214: 265–286.
- [33] Miller C, Thöni M, Frank W, et al. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet [J]. *Lithos* 2003, 66: 155–172.
- [34] Mahoney J J, Frei R, Tejada M L G, et al. Tracing the Indian Ocean mantle domain through time: Isotopic results from old West Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor [J]. *Journal of Petrology* 1998, 39(7): 1285–1306.
- [35] Zhang S Q, Mahoney J J, Mo X X, et al. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-Ocean-type isotopic characteristics [J]. *Journal of Petrology* 2005, 46(4): 829–858.
- [36] Xu J F, Castillo P R. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain [J]. *Tectonophysics* 2004, 393: 9–27.
- [37] Xu J F, Castillo P R, Li X H, et al. MORB-type rocks from the Pale-Tethyan Min-Lueyang northern ophiolite in the Qinling Mountains, central China: implications for the source of the low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and high $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ mantle component in the Indian Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2002, 198: 323–337.
- [38] 侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2005, 35(8): 710–719.
- [39] 侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 等. 西秦岭—松潘构造古洋地幔地球化学特征及构造归属探讨 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2901–2909.
- [40] 侯青叶, 赵志丹, 张本仁, 等. 青藏高原东北缘特提斯构造域界限的探讨 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 567–577.
- [41] 牛晓露, 赵志丹, 莫宣学, 等. 西藏日喀则地区德村—昂仁蛇绿岩内基性岩的元素与 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学及其揭示的特提斯地幔域特征 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2875–2888.
- [42] Mo X, Hou Z Q, Niu Y L, et al. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet [J]. *Lithos* 2007, 96(1–2): 225–242.
- [43] Turner S, Amaud N, Liu J, et al. Post-collision shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. *Journal of Petrology* 1996, 37(1): 45–71.
- [44] Nomade S, Renne P R, Mo X X, et al. Miocene volcanism in the Lhasa block, Tibet: spatial trends and geodynamic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2004, 221: 227–243.
- [45] 赵志丹, 莫宣学, 张双全, 等. 西藏中部乌郁盆地碰撞后岩浆作用——特提斯洋壳俯冲再循环的证据 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31(增刊): 20–26.
- [46] 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 等. 冈底斯基性次火山岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素: 碰撞后火山作用亏损地幔源区的约束 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 547–557.
- [47] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度—亚洲大陆主碰撞过程

- 的火山作用响应 [J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135–148
- [48] Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints form the source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(9): 1399–1424.
- [49] Ding L, Kapp P, Zhong D L, et al. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 1835–1865
- [50] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1998
- [51] 杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 青藏高原北部鲸鱼湖地区中新世和更新世两期橄榄玄粗质系列火山岩 [J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 161–176
- [52] 丁林, 张进江, 周勇, 等. 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征: 高原岩石圈演化的记录 [J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 408–421
- [53] 解广轰, 刘丛强, 曾田彰正, 等. 青藏高原周边地区新生代火山岩的地球化学特征——古老富集地幔存在的证据 [M] // 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1992: 400–427.
- [54] 刘丛强, 解广轰, 中井俊一, 等. 新疆于田县康苏拉克新生代火山岩 Sr-Nd-Ce-O 同位素及微量元素地球化学 [J]. 科学通报, 1989, 23: 1803–1806
- [55] Guo Z F, Wilson M, Liu J, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism of the characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(6): 1177–1220
- [56] Cooper K M, Reil M R, Dunbar N W, et al. Origin of mafic magmas beneath northwestern Tibet: Constraints from ^{230}Th – ^{238}U disequilibrium [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3(11): 1065
- [57] Amund N O, Vidal P H, Tapponnier P, et al. The high K_2O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 111: 351–367.
- [58] McKenna L W, Walker J D. Geochemistry of crustally derived leucocratic igneous rocks from the Ulu Muztagh area, northern Tibet and their implications for the formation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, B(13): 21483–21502
- [59] 伊海生, 林金辉, 李葆华, 等. 藏北高原新时代高钾钙碱性系列火山岩与壳—幔相互作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 95.
- [60] 朱弟成. 特提斯喜马拉雅带中段晚古生代以来的火山岩及其意义 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2003.
- [61] 廖忠礼. 南部过铝花岗岩的特征、成因及构造意义 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2003
- [62] Schärer U, Xu R H, Alègre C J. U–(Th)–Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa–Xigaze region, Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 69: 311–320
- [63] 李献华, 桂训唐, 刘菊英. 西藏曲水岩基的 Pb、Sr 同位素组成及其三元混合成因模式 [J]. 地球化学, 1987, (1): 60–66
- [64] 曲晓明, 侯增谦, 李佑国. S、Pb 同位素对冈底斯斑岩铜矿带成矿物质来源和造山带物质循环的指示 [J]. 地质通报, 2002, 21(11): 768–776
- [65] Schärer U, Xu R H, Alègre C J. U–(Th)–Pb systematic and ages of Himalayan leucogranites, South Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 77: 35–48.
- [66] Vidal P H, Cocherie A, Le Fort P. Geochemical investigations of the origin of the Manaslu leucogranite (Himalaya, Nepal) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 2279–2292
- [67] Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, et al. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, Central Himalaya [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40: 3–19.
- [68] Gopel C, Alègre C J, Xu R H. Lead isotopic study of the Xigaze ophiolite (Tibet): the problem of the relationship between magmatites (gabbros, dolerites, lavas) and tectonites (harzburgites) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 69: 301–310
- [69] 周肃, 莫宣学, Mahoney John, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb-Nd 同位素特征 [J]. 科学通报, 2001, 46(16): 1387–1389
- [70] 赵志丹, 莫宣学, Nomade S, 等. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 787–794.