

西藏冈底斯带洛巴堆组火山岩地球化学及构造意义*

耿全如¹ 王立全¹ 潘桂棠¹ 金振民² 朱弟成¹ 廖忠礼¹ 李光明¹ 李奋其¹

GENG QuanRu¹, WANG LiQuan¹, PAN GuiTang¹, JIN ZhenMing², ZHU DiCheng¹, LIAO ZhongLi¹, LI GuangMing¹ and LI FenQi¹

1. 国土资源部成都地质矿产研究所, 成都 610082

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610082, China

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

2007-05-22 收稿, 2007-10-25 改回.

Geng QR, Wang LQ, Pan GT, Jin ZM, Zhu DC, Liao ZL, Li GM and Li FQ. 2007. Volcanic rock geochemistry and tectonic implication of the Luobadui Formation on the Gangdese zone, Xizang (Tibet). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2699–2714

Abstract The Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks in the Gangdese zone is an important field of Tibetan geologic studies. The Late-Paleozoic volcanic rocks and their tectonic settings however, still remain unstudied. The Permian stratigraphy represented a slow regression process with two volcanic events, characterizing an active margin. We measured key geologic sections at Tangjia and Leqingla of the Luobadui Fm. and analyzed volcanic rock samples for major and trace elements and Sr, Nd and Pb isotopes. These suggest that Permian was a period of arc formation in the Gangdese zone. From lower (possible early Permian) to upper part (middle Permian) of the Luobadui basalts, the MgO contents drop from 7.43% to 3.99% and Al₂O₃ contents increase from 15.54% to 17.57%. The later resembles high-Al basalts of island arc. Meanwhile, the ΣREE values increase from 54.12 × 10⁻⁶ to 108.82 × 10⁻⁶ and LREE/HREE ratios from 3.00 to 5.40. The basaltic rocks of the Luobadui Fm. show significant Nb and Ta negative anomalies. Geochemical studies suggest that basalts in the Luobadui Fm. represent a Permian initial arc. Early Permian basalts derived from a mixed source of slightly-depleted mantle and lower crustal materials at thin crust. Up to middle Permian, more crust components were involved in source regions or primitive magma at thicker crust, and suggest evolution to a continental arc. The Gangdese Permian arc was resulted from the southern subduction of the paleo-Tethys.

Key words Gangdese zone in Tibet, Permian, Volcanic rock geochemistry, Stratigraphy, Island arc

摘要 冈底斯带中-新生代火山岩的成因和地质演化是青藏高原地质研究的热点领域,但是对晚古生代火山岩的性质及其形成的构造背景仍缺乏研究。冈底斯带二叠系显示缓慢的海退过程,并伴随基性和中酸性两期火山活动,具有活动大陆边缘特征。笔者对墨竹工卡县唐家乡和林周县勒青拉地区二叠纪洛巴堆组火山岩进行了常量、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学测试。研究认为二叠纪是冈底斯岛弧的形成和演化时期。洛巴堆组玄武岩从下部(可能为早二叠世)到上部(中二叠世),MgO 含量从 7.43% 降到 3.99%,Al₂O₃ 含量从 15.54% 上升到 17.57%,后者类似于岛弧高铝玄武岩;稀土总量 ΣREE 从 54.12(10⁻⁶)上升到 108.82(10⁻⁶),LREE/HREE 比值从 3.00 上升到 5.40。洛巴堆组玄武岩均具有明显的 Nb、Ta 负异常,但中二叠世更显著。岩石地球化学示踪表明,冈底斯洛巴堆组玄武岩代表二叠纪初始岛弧环境。早期玄武岩形成于略亏损地幔和下地壳成分的混合源区,地壳相对较薄,源区或岩浆的壳源成分比例较低。到中二叠世地壳逐渐加厚,壳源成分在源区或岩浆中所占比例增大,代表向陆缘弧的演化过程。冈底斯带二叠纪岛弧是古特提斯洋向南的俯冲、消减的产物。

关键词 西藏冈底斯; 二叠纪; 火山岩岩石地球化学; 地层学; 岛弧

中图法分类号 P588.145

* 国家自然科学基金资助项目(编号:40572051、40773001)和中国地质调查局“青藏高原南部空白区基础地质综合研究”项目(1212010510218)资助。

第一作者简介:耿全如,男,1963年生,博士,研究员,主要从事青藏高原构造地质和岩石学研究, E-mail: cdgquanru@cgs.gov.cn

位于雅鲁藏布江结合带和班公湖-怒江结合带之间的冈底斯构造带,是青藏高原白垩纪以来岩浆活动期次最多、规模最大、岩浆岩类型最复杂的构造-岩浆岩带(莫宣学等,2003; 2005)。一般认为广泛分布的燕山期-喜马拉雅期岩浆岩是雅鲁藏布新特提斯洋向北俯冲、消减而形成的中-新生代岩浆弧(常承法和郑锡澜,1973; 周云生等,1981; 黄汲清和陈炳蔚,1987; 任纪舜等,1999)。冈底斯中-新生代岩浆活动及其成矿作用一直是青藏高原最热门的地质研究领域。

地质调查发现,在冈底斯地区也有大量石炭纪、二叠纪火山岩。我们对石炭纪火山-沉积岩系中地层学和火山岩的研究认为,冈底斯带石炭纪为伸展背景下的冈瓦纳北缘裂陷环境(耿全如等,2007)。有学者认为冈底斯带二叠纪火山岩具有岛弧特征,二叠纪已初步形成岛弧(李光明等,2002; 潘桂棠等,2004; 2006)。Hsu *et al.* (1995)认为,晚古生代时期冈瓦纳大陆北缘发生日本海式裂离。冈底斯带晚石炭-早二叠世火山-沉积岩系为弧后扩张的结果,伴随深水复理石沉积。

为了探索二叠纪时期冈底斯带的构造背景,有必要在地质调查取得的地层学资料的基础上,对二叠纪火山岩进行系统研究。作者对墨竹工卡县唐家乡和林周县勒青拉两条二叠纪洛巴堆组火山-沉积岩系剖面进行了测量和系统采样。本文主要讨论这两条剖面中火山岩的岩石地球化学,并结合冈底斯带二叠纪沉积环境演化,探讨二叠纪的构造背景和古特提斯的演化。

1 冈底斯带二叠纪地层学特征

二叠系主要分布在冈底斯地块的中部“弧背断隆带”中(肖序常等,1988)(图1)。在当雄-羊八井断裂以东到波密、然乌一带,以前将石炭-二叠系统称为旁多群,后来的1:20万和1:25万区域地质调查将这套地层解体为诺错组(C_1n)、来故组(C_2P_1l)、乌鲁龙组(P_1w)、洛巴堆组(P_2l)和蒙拉组(P_3m)等。在当雄-羊八井断裂以西到狮泉河地区,二叠系分别为昂杰组(P_1a)、下拉组(P_2x)、木纠错组(P_3m)等等。冈底斯带的石炭-二叠系为连续沉积,沉积中心和盆地中心基本一致。但是,冈底斯西段是否存在海陆过渡相、陆相的上二叠统,三叠系的分布和沉积环境,是否存在上/中二叠统和三叠系/二叠系之间的不整合等,仍是争论较大的问题。

20世纪90年代,地质学家认为冈底斯地块当雄-羊八井以西地区普遍缺失三叠系,但最近在措勤和狮泉河地区的碳酸盐地层中发现三叠纪牙形石,因此推测冈底斯西部可能普遍存在海相三叠系(纪占胜等,2007a, b; 武桂春等,2007)。尽管如此,还没有充分证据否定含植物化石的敌布错组和坚扎弄组的时代属于晚二叠世(周幼云等,2002; 纪占胜等,2007c)。

根据近年来的区域地质调查资料和专题研究成果^①,冈底斯带二叠系具有以下主要沉积学特征。

(1)冈底斯带二叠系主要为陆缘碎屑岩和碳酸盐组合,代表浅海台地、台地斜坡和局部的深海盆地环境,但具有缓慢海退特征。

在冈底斯带中部的拉萨-波密地区,石炭系为裂陷环境背景下形成的一套火山-沉积建造,整体代表两次海水加深-变浅的海进-海退过程(耿全如等,2007)。二叠纪的沉积环境以浅海为主,伴随早期的基性火山岩喷溢(林周、墨竹工卡)和晚期的安山岩、英安岩和流纹岩喷发(狮泉河、当雄纳龙)。三叠纪和侏罗纪时期,冈底斯地块演化为海陆过渡相和局部的陆相,伴随酸性研究活动(李才等,2003; 杨德明等,2005)。冈底斯中东部仅存在局限的三叠系。查曲浦组($T_{1,2}$),由早期的局限海盆地相砂岩、砂屑灰岩、灰岩、硅质岩,向上过渡为海陆交互相,并有强烈的酸性火山活动(潘桂棠等,2006)。

在冈底斯西部的在狮泉河地区,早二叠世昂杰组为一套薄层灰岩夹黑色泥岩。中、晚二叠世下拉组主要为厚层-块状灰岩、燧石条带灰岩、海百合茎灰岩、礁灰岩、硅质条带灰岩等,夹多层英安质碎屑熔岩、火山碎屑岩、沉火山碎屑岩等(西藏地质调查院,2005; 纪占胜等,2007a)。三叠纪左左组为含灰岩透镜体的白云岩。从岩石组合和化石看,狮泉河地区早二叠世沉积环境具有陆棚-深海盆地特征,中晚二叠世至三叠纪主要为浅海台地相,但局部达滨岸环境。因此二叠纪总体反映海水逐渐变浅的海退过程。在措勤和申扎地区,早、中二叠世主要为浅海台地相碳酸盐沉积,但晚二叠世可能曾局部隆升成陆。

因此,二叠纪时期冈底斯应该代表一次缓慢的海退过程,导致晚二叠世-三叠纪的构造隆升。

(2)根据火山岩出现的层位和共生的地层特征,冈底斯带在二叠纪发生两次构造-火山事件。

第一次火山活动为洛巴堆组中的玄武岩喷溢。在墨竹工卡唐家乡剖面中,洛巴堆组中出现一套厚约480m的变玄武岩。林周县勒青拉剖面中玄武岩流和共生的角砾熔岩厚度达150m。波密地区的相应层位中出现一层厚约51m的灰绿色凝灰质角砾岩(角砾为灰白色的灰岩和大理岩,基质为灰绿色的凝灰质)。在申扎地区,相应层位出现一层厚6.87m的绿色凝灰质灰岩。在措勤地区,下拉组(P_2x)结晶灰岩中夹一层50cm厚的蚀变玄武岩。在冈底斯西段这套玄武岩分布有限,但在相应层位上出现沉积环境的转变或岩性突变面。本次构造-火山活动主要发生在中二叠世,最

① 中国地质科学院地质力学研究所. 2003. 1:25万当雄幅地质图及区域地质调查报告; 云南地质调查院第三地质调查所. 2003. 1:25万林芝幅地质图和区调报告; 成都地质矿产研究所. 2003. 1:25万墨脱县幅地质图和区域地质调查报告; 吉林大学. 2002. 1:25万申扎县幅地质图及区域地质调查报告; 四川地质调查院. 2003. 1:25万措勤区幅地质图和区调报告; 西藏地质调查院. 2004. 1:25万斯诺乌山、狮泉河幅地质图和区调报告。

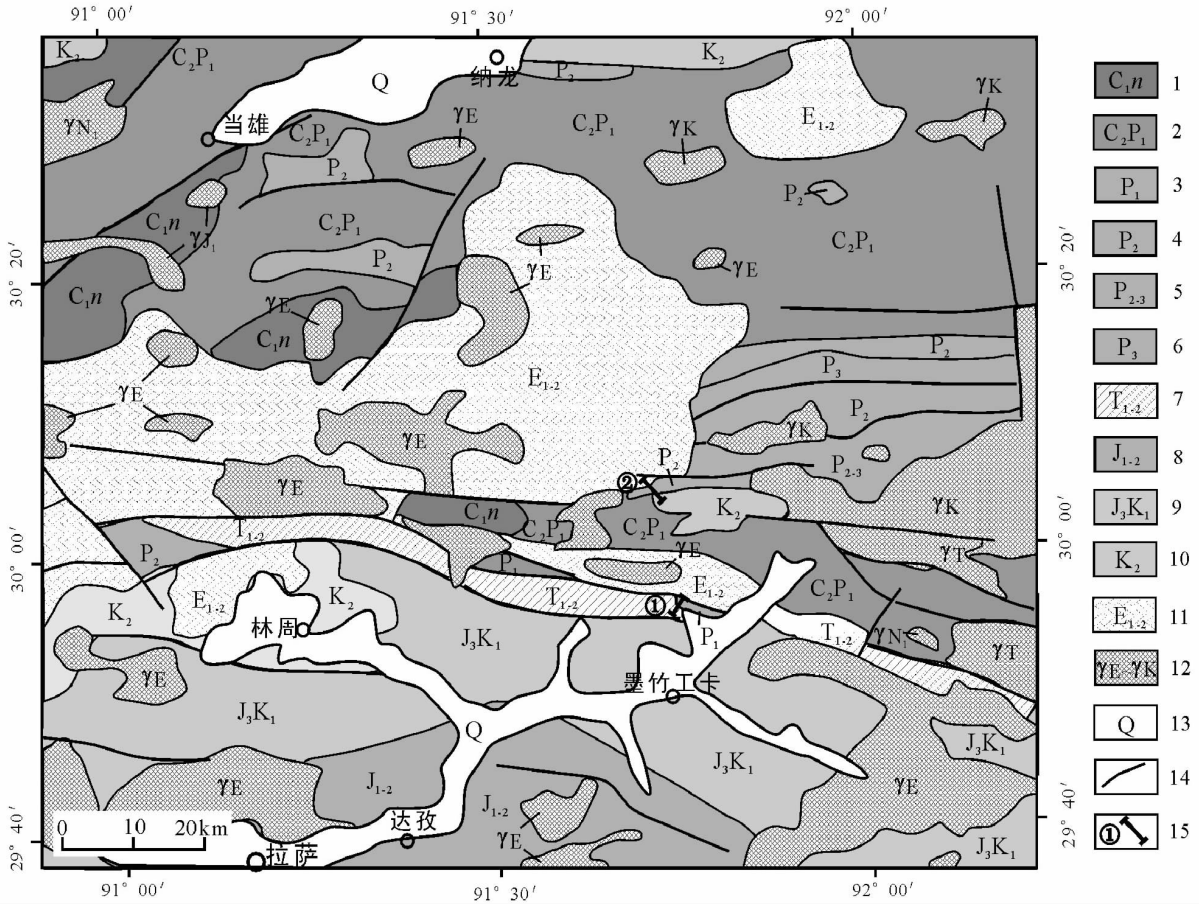
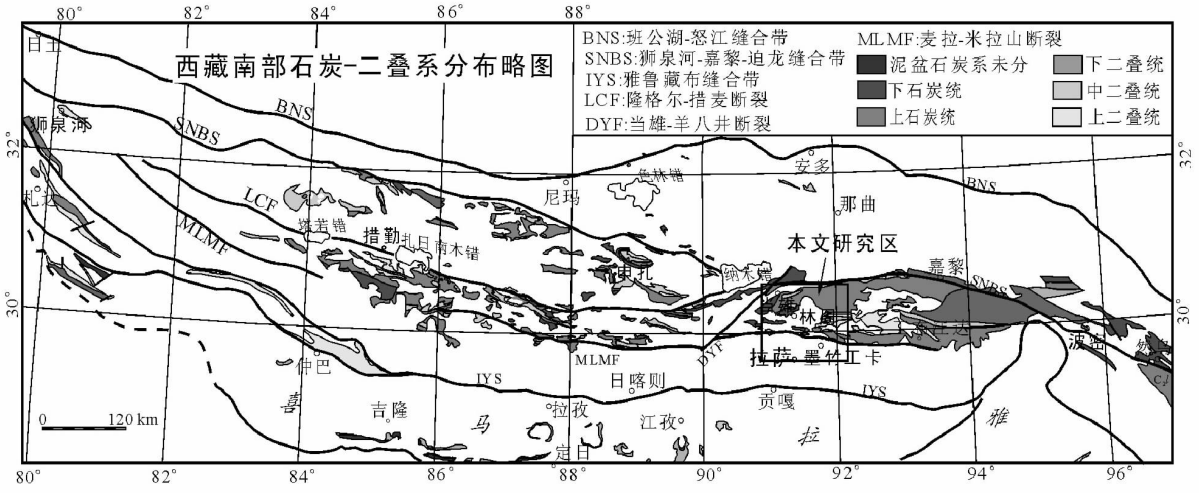


图1 研究区地质简图

1-早石炭世诺措组, 黑色板岩、含砾板岩等, 深海环境; 2-来故组, 含砾砂岩和长石石英砂岩等, 海陆过渡相; 3-乌鲁龙组 (钙质泥岩、砂岩等) 和洛巴堆组下部 (玄武岩、灰岩、砂板岩组合), 湖坪-浅海台地-斜坡相; 4-洛巴堆组上部, 厚层灰岩、碎屑岩、夹玄武岩, 浅海台地-斜坡相; 5-未分中上二叠统 (洛巴堆组和蒙拉组); 6-蒙拉组, 灰岩、石英砂岩和砂板岩互层, 浅海相; 7-查曲浦组, 灰岩夹石英砂岩, 上部夹酸性火山岩, 浅海演化为陆相; 8-叶巴组, 碎屑岩夹双峰式火山岩, 滨浅海; 9-林布宗组, 砂板岩、碳质泥岩夹安山质凝灰岩, 滨海-滨岸相; 10-设兴组, 杂色复成分砂砾岩夹泥岩, 海陆交互相; 11-林子宗群, 中酸性钙碱性火山岩夹紫红色碎屑岩, 陆内环境; 12-中生代-新生代冈底斯花岗岩; 13-第四纪, 冲洪积相; 14-断层; 15-本文研究的剖面位置

Fig. 1 Sketched geologic map of study area

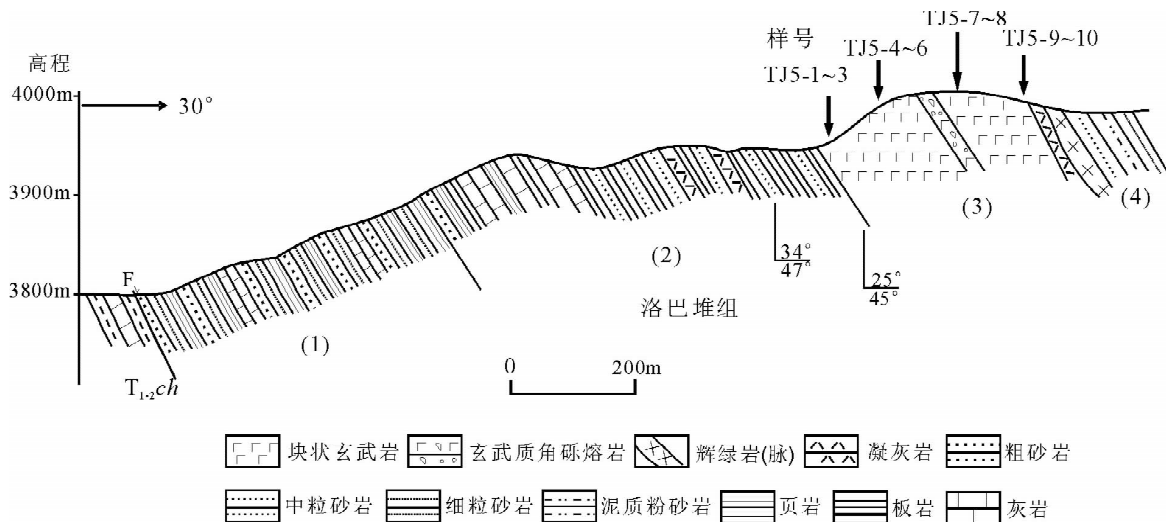


图2 墨竹工卡县唐家乡剖面图

Fig.2 Geologic section in Tangjiaxiang, Maizhokungga county

早可能在早二叠世。

第二次火山活动为中、酸性火山岩喷发,发生在中-晚二叠世。在当雄纳龙盆地中,有化石证据的中二叠统洛巴堆组上部夹有厚 200m 的火山岩,岩性为浅变质玄武安山岩、流纹岩和英安岩等(李光明等,2002)。在狮泉河地区,中、上二叠统下拉组硅质灰岩中夹厚约 250m 的英安质碎屑熔岩、火山碎屑岩等(西藏地调院,2005)。

(3) 与火山活动相关的洛巴堆组和下拉组在冈底斯带中由东向西从石炭纪顶部变化到中、晚二叠世。在波密地区,洛巴堆组含有腕足 *Orthotetina* sp., 苔藓虫 *Fistulipora* sp., 蜓科 *Triticites samenkangensis* Chen, 珊瑚 *Multithecopora cf. huagglungensis* Lee et Chu。因此该区洛巴堆组的主体为二叠纪,底界到晚石炭世。在墨竹工卡县唐家乡剖面和林周县勒青拉剖面中,与火山岩伴生的灰岩中分别含有早、中二叠世化石。在当雄纳龙地区,二叠系洛巴堆组含中薄层状泥晶灰岩和生物灰岩中获较多生物化石,经鉴定有珊瑚 *Cyathoxonia multiseptata* Fan; *Lophocarinophyllum cf. xialaense* Fan; *Allotropiophyllum* sp.; *Tachylasma* sp.; 苔藓虫 *Fenestella cf. perelegans* Meek; *Goniocladia indica* Waagen et Pichl; *Fenestella cf. subconstans* Yang et Lu。化石时代属中二叠世栖霞期(李光明等,2002)。冈底斯带西部的下拉组在措勤地区产腕足类 *Martinia* sp., *Neopirifer* ? sp.; 双壳类 *Schizodus* sp.; 海百合茎 *Cyclocyclicus* sp. 及海胆碎片,时代确定为中二叠世。在狮泉河地区,根据最新的牙形石研究结果,下拉组时代为中、晚二叠世(西藏地质调查院,2005; 纪占胜等,2007a)。

2 洛巴堆组典型火山-沉积岩系

冈底斯带二叠纪的两次构造-火山活动断续分布于墨竹工卡、林周、当雄、措勤和狮泉河等地。目前对狮泉河、当雄

地区以中酸性岩为主的第二次火山活动已有一定研究,认为其形成于安第斯型活动大陆边缘或陆缘弧环境(李光明等,2002; 西藏地调院,2005)。本文主要研究第一次火山活动,即林周、墨竹工卡地区的洛巴堆组玄武岩。

2.1 墨竹工卡县唐家乡

在墨竹工卡县唐家乡北部,洛巴堆组出露于拉萨河两岸,火山岩厚度约 480 米。洛巴堆组下部以正断层与查曲组泥岩、灰岩接触,顶部出露不全。洛巴堆组从下向上可分为四段(图 2)。

第一段,灰色粗砂岩、绿色砂岩及页岩,夹薄层灰岩,含珊瑚化石 *Wentzelella* sp.。断层切割未见底,可见厚度 >200 米。

第二段,灰白色厚层灰岩夹紫色页岩,顶部渐变为黑色板岩、砂岩及灰白色中酸性凝灰岩。灰岩中夹同成分角砾并具有重结晶现象,夹海百合茎、筵科化石 *Verbeekina* sp., *Pseudodoliolina* sp., *Parafusulina* sp.。该段厚度 350m ±。从珊瑚和筵科化石看,时代属于早二叠世^①。

第三段,一套灰绿色厚层状片理化隐晶质玄武岩、致密块状玄武岩偶夹角砾玄武熔岩。玄武质熔岩顶部为一层厚约 4m 的玄武质凝灰熔岩,成分仍为玄武质,但具显著流动构造和拉长的浆屑等。玄武质凝灰熔岩中出露一条辉绿岩脉,宽度约 2.5 m,与围岩为侵入接触。玄武岩厚度约 480m。

第四段,浅灰色厚层状石英砂岩夹深灰色石英细砂岩、深灰色薄层状泥质粉砂岩,厚层砂岩具底冲刷构造。厚度 >50m,未见顶。

该剖面中玄武岩呈厚层熔岩流夹在滨、浅海相碎屑岩

① 西藏地质局综合普查大队,1979. 1:100 万拉萨幅地质图及说明书。

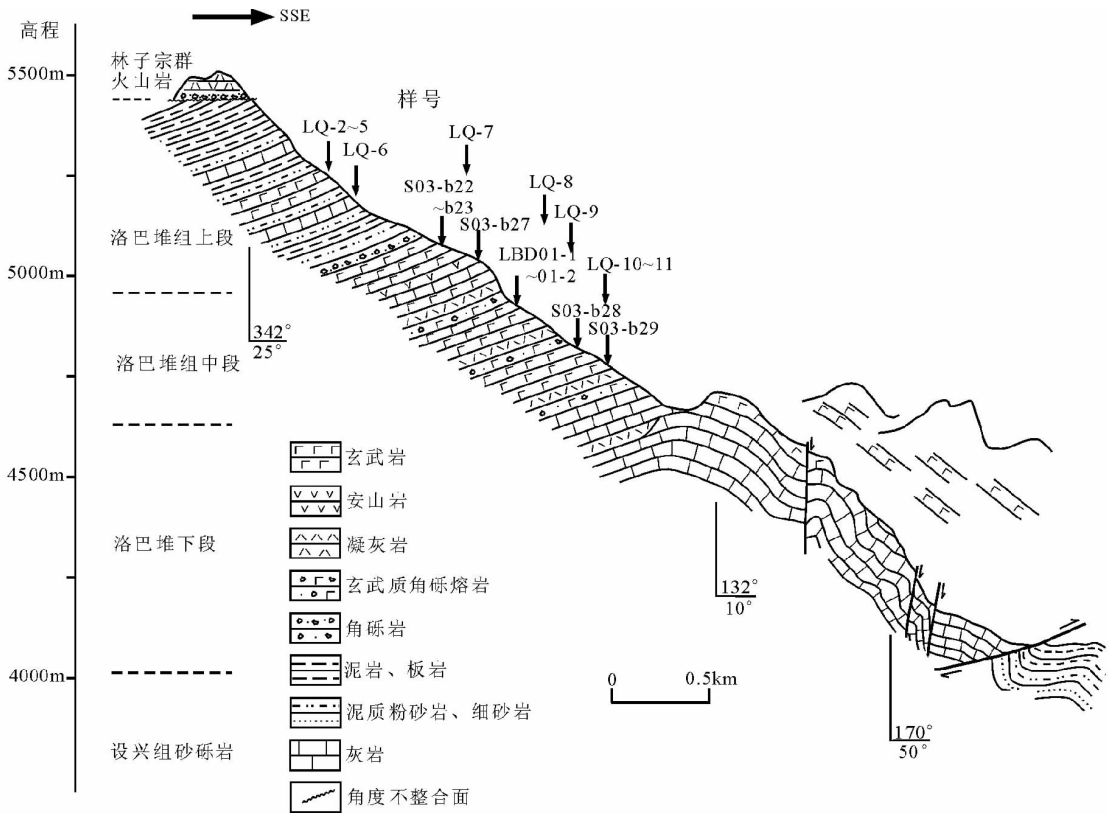


图3 林周县勒青拉剖面图

Fig. 3 Geologic section from Linzhou to Leqingla

中,以中部的角砾熔岩为界可分为两个快速喷溢旋回。岩石呈暗灰绿色,片理化或致密块状。镜下多为变余斑状结构,少数无斑者为微晶、骸晶、雏晶、隐晶或玻璃质结构。基质多具变余交织结构、变余间粒间隐结构、隐晶质及玻璃质结构。气孔、杏仁构造、定向性构造为主。无矿物定向部分,外观为块状构造。

斑晶主要为自形-半自形斜长石,粒径3~0.3mm,含量介于40%~0%。斑晶被绿帘石、绿泥石、黝帘石、透闪石等不同程度地交代。有些柱状外形的斑晶假象,交代矿物为透闪石、绿泥石等,原生矿物可能是辉石斑晶。基质部分主要为定向-半定向排列的斜长石微晶、骸晶、雏晶,并多已被绿帘石、钠长石、黝帘石、绿泥石、碳酸盐等交代。斜长石微晶粒度小于0.2mm。斜长石晶体之间为隐晶-玻璃质。部分样品可见基性玻屑及快速冷凝的浆屑,呈塑性拉长的火焰状。岩石中见不透明暗色矿物赤铁矿、磁铁矿。

2.2 林周县勒青拉

在林周县勒青拉剖面中,洛巴堆组作为逆冲岩片,逆冲在设兴组(K_2)杂色碎屑岩系之上,顶部被林子宗群火山岩(E_{1-2})不整合覆盖,可见厚度约530米(图3)。大量化石证明这套火山-沉积岩系的时代属于中二叠世茅口期。

洛巴堆组下段为灰色、灰白色中厚层状灰岩、结晶灰岩、

大理岩等,含同成分同沉积灰岩滑塌角砾,局部夹薄层状、透镜状灰绿色凝灰岩。含筳类化石 *Neoschwagerina margaritae*, *Yabina shiraiwensis*, *Y. multiseptata*; 珊瑚 *Iranophyllum* sp.; 腕足 *Martinia* sp.。

洛巴堆组中段为灰绿色凝灰岩、玄武岩,夹含黑色燧石团块的灰岩。灰岩中含筳类化石 *Parafusulina shaksgamensis*, *Neoschwagerina* sp., *N. craticulifera*, *Misellina* sp. 等。

洛巴堆组上段主要为大套玄武岩、玄武质角砾熔岩、中薄层状凝灰岩。顶部为中层状泥岩、灰岩夹凝灰质砂岩等。

该剖面中火山岩的厚度大于150米,大致为三个喷发-溢流旋回。每个旋回的中下部为厚40~50m的块状溢流玄武岩、杏仁状玄武岩,上部为厚5~10米的角砾熔岩和致密块状玻屑凝灰岩。

勒青拉剖面中玄武岩为深灰色、灰绿色,致密隐晶质结构或斑状结构,块状构造或杏仁状构造,层状不明显,为厚层熔岩流。镜下多为斑状结构、玻基斑状结构等,斑晶多为半自形-自形斜长石,粒度2~4mm,含量一般在10%以下,个别样品达20%±。有些层位见褐色角闪石斑晶。斜长石斑晶大多经过较强蚀变,被绢云母、绿帘石、黝帘石、钠长石等不同程度地交代,致使聚片双晶不清楚。基质具有间隐结构、隐晶-玻璃质结构、交织结构等,由微晶斜长石和显微隐晶质或玻璃质组成。基质也具有不同程度的后期蚀变,由绿帘石、

绿泥石、方解石等不均匀交代。有些层位含有浑圆-不规则状杏仁体,被绿泥石、石英等充填。有些层位玄武岩基质大部分由显微隐晶质组成,仅见个别细长的斜长石锥晶、骸晶。岩石中见副矿物磷灰石、磁铁矿、黄铜矿等。

基性凝灰岩宏观为浅灰绿色,薄层状,走向延伸不稳定,致密隐晶质结构,块状构造,成分主要为棱角状基性玻屑,含少量显微隐晶质火焰状的浆屑。玻屑脱玻化和后期蚀变后被绿泥石、绿帘石的交代。

这两条剖面中二叠纪玄武岩类均遭受绿片岩相变质作用。与勒青拉剖面玄武岩相比,唐家乡剖面中玄武岩类结晶更细、变质程度更深。结合化石证据,唐家乡剖面的层位应低于勒青拉剖面,可能属于早二叠世。

3 火山岩岩石地球化学

我们对墨竹工卡县唐家乡和林周县勒青拉两条实测剖面的火山岩样品进行了薄片镜下研究,选取较新鲜的样品进行地球化学测试。常量元素由国土资源部成都地质矿产研究所测试,测试方法为火焰原子吸收法,分析精度优于1%。微量元素和稀土元素由国家地质实验测试中心完成。检测使用仪器为等离子质谱 ICP-MS(TJA X-Series)、等离子光谱 ICP-AES(TJA IRIS)。检测依据为 DZ/T 0223—2001 和《国家地质实验测试中心检定细则》。检测数据符合《地质矿产实验室测试质量管理规范》DZ 0130—94 的要求。Rb-Sr、Sm-Nd和 Pb 同位素测试在中科院地质和地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。化学分离和同位素比值测量采用德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离子质谱计。常量元素和微量元素测试结果见表1、表2,同位素测试结果见表3、表4。本文岩石化学图形软件据路远发(2004)。

3.1 常量元素地球化学特征

唐家乡洛巴堆组火山岩 10 件样品的 SiO_2 含量为 45.8% ~ 53.9% (表1)。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分类图中,大部分样品落在“安山岩/玄武岩”范围内(图4)。唐家乡玄武岩的 Al_2O_3 含量为 11.60% ~ 17.94%,平均为 15.54%,低于岛弧玄武岩类,与大陆板内玄武岩相似(邱家骧,1985;邱家骧和林景仟,1991; Hawkesworth *et al.*, 1995; Honegger, *et al.*, 1982; Bhat and Ahmad, 1990; 肖龙等, 2003)。TiO₂ 含量为 0.40% ~ 1.29%,平均为 0.95%,低于大陆玄武岩类,接近岛弧玄武岩类(1% ±, Hess, 1989; Luhr and Haldar, 2006)。MgO 含量为 4.58% ~ 12.19%,平均为 7.43%;全铁含量 TFeO 为 6.49% ~ 10.05%,平均为 9.30%;镁质系数 $\text{Mg}^\#$ 较低,为 49.77% ~ 69.17%,平均为 57.97%,但 MgO 含量高于勒青拉玄武岩。

在勒青拉剖面中,洛巴堆组火山岩 16 件样品中有两件 SiO_2 含量高于 54% (样号 S03-b27, LQ-11),但主要为 47% ~ 53%,平均为 51.32% (表2)。在稳定元素 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分

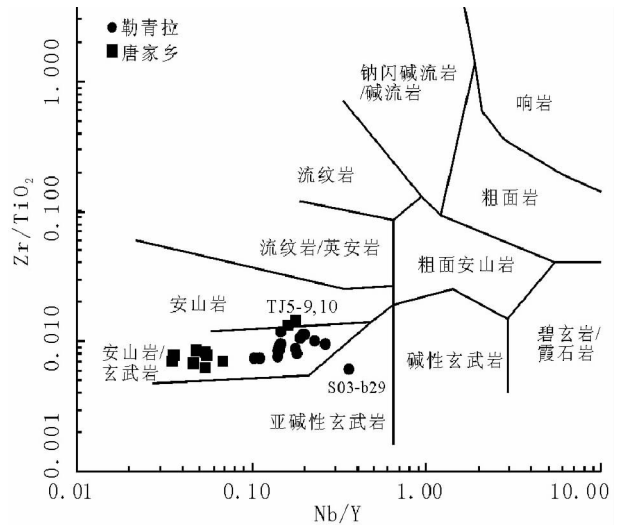


图4 二叠纪火山岩 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分类图(据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 4 Nb/Y-Zr/TiO₂ classification diagram for Permian volcanic rocks(after Winchester and Floyd, 1977)

类图中,该剖面的样品大部分落在“安山岩/玄武岩”范围内(图4)。该剖面玄武岩类的显著特点是 Al_2O_3 含量较高,为 11.75% ~ 21.22%,平均为 17.57%,高于大陆玄武岩类(14% ~ 16%),与岛弧高铝玄武岩相似(Luhr and Haldar, 2006)。TiO₂ 含量为 0.65% ~ 1.14%,平均为 0.93%,低于初始裂谷和板内玄武岩,接近于岛弧玄武岩类。MgO 含量为 1.16% ~ 7.29%,平均仅为 3.99%,低于典型的大陆玄武岩,接近于岛弧高铝玄武岩。镁质系数 $\text{Mg}^\#$ 较低,平均仅为 41.12%。

从 SiO_2 含量和 Nb/Y-Zr/TiO₂ 分类结果看,唐家乡和勒青拉二叠纪洛巴堆组火山岩主体属于玄武岩类,个别 SiO_2 含量较高的样品可能与蚀变或交代作用有关。玄武岩 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 质均低于原始玄武岩和 MORB(Mckenzie and Bickle, 1988; Wilson, 1989; 汪云亮等, 2001),说明可能经历了岩浆演化或源区混合等过程。

3.2 微量元素地球化学特征

唐家乡剖面

唐家乡剖面中玄武岩的稀土元素分布曲线为 LREE 略富集型-平坦型(图5A)。稀土总量 ΣREE 为 34.53 ~ 96.49 (10^{-6} ,下同),平均为 54.12。轻、重稀土比值 LREE/HREE 为 1.78 ~ 8.40 (以 1.78 ~ 2.65 为主),平均为 3.00。该剖面顶部的一层微晶质玄武岩 LREE/HREE 较高,为 4.57 ~ 8.40。(La/Yb)_n 为 0.81 ~ 9.83,平均为 2.34,顶部微晶质玄武岩为 4.02 ~ 9.83。(Ce/Yb)_n 为 0.92 ~ 7.82,平均为 2.03,顶部玄武岩为 3.11 ~ 7.82。该剖面玄武岩的稀土总量和轻、重稀土比值显著低于勒青拉玄武岩,呈 Eu 正异常,δEu 为 0.89 ~ 1.25,平均为 1.13,仅顶部玄武岩 δEu 为 0.89。

表1 墨竹工卡唐家乡洛巴堆组火山岩常量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)含量

Table 1 Major element and trace element data for volcanic rocks in the Luobdui Fm. in Tangjiaxiang

样号	TJ5-1	TJ5-2	TJ5-3	TJ5-4	TJ5-5	TJ5-6	TJ5-7	TJ5-8	TJ5-9	TJ5-10
SiO ₂	50.64	50.18	47.64	46.52	49.28	48.30	46.88	45.80	53.90	47.46
TiO ₂	0.56	1.22	1.29	1.24	1.22	0.66	0.90	1.25	0.72	0.40
Al ₂ O ₃	16.76	15.24	16.52	15.24	15.17	15.97	14.89	16.03	17.94	11.60
Fe ₂ O ₃	6.79	5.82	4.97	3.41	4.35	3.56	4.14	3.56	3.80	4.33
FeO	3.68	4.73	5.06	6.98	5.80	5.53	5.59	6.51	3.07	5.79
CaO	9.86	9.27	9.22	7.63	9.08	9.77	9.48	7.78	7.17	10.39
MgO	5.44	6.12	7.71	7.04	7.12	7.74	9.49	6.89	4.58	12.19
K ₂ O	0.04	0.30	0.32	0.07	0.30	0.07	0.54	0.83	1.07	0.18
Na ₂ O	1.64	3.71	3.29	3.17	3.34	3.47	2.28	2.46	3.68	1.55
P ₂ O ₅	0.220	0.190	0.240	0.160	0.200	0.150	0.180	0.270	0.280	0.320
MnO	0.16	0.19	0.18	0.19	0.19	0.17	0.17	0.17	0.12	0.21
LOI	4.11	2.71	3.46	9.18	3.39	4.18	4.94	7.94	3.44	4.64
Total	99.9	99.68	99.9	100.83	99.44	99.57	99.48	99.49	99.77	99.06
TFeO	9.79	9.97	9.53	10.05	9.72	8.73	9.32	9.71	6.49	9.69
Mg [#]	49.77	52.26	59.05	55.54	56.65	61.24	64.49	55.84	55.72	69.17
Cr	26.5	92.5	170	166	185	238	358	127	59.2	645
Th	0.75	0.47	0.41	0.17	0.25	0.21	0.18	0.37	3.49	2.56
V	314.00	361.00	285.00	319.00	326.00	277.00	270.00	290.00	156.00	238.00
Rb	3.70	7.40	6.45	1.28	6.24	1.18	7.71	22.40	28.00	3.08
Sr	551.00	278.00	277.00	194.00	220.00	209.00	142.00	259.00	400.00	371.00
Ba	26.50	50.50	59.80	25.30	55.80	26.80	64.90	191.00	244.00	38.00
Ta	0.08	0.13	0.15	0.09	0.11	0.063	0.097	0.120	0.300	0.110
Nb	0.93	1.73	2.12	1.04	1.30	0.81	1.17	1.51	3.49	2.19
Hf	1.31	2.94	2.67	2.65	2.44	1.64	2.13	2.32	2.89	1.52
Zr	43.80	100.00	91.20	86.20	84.30	52.30	77.70	77.40	105.00	52.90
Y	16.80	32.20	31.40	29.60	28.30	22.70	24.60	28.20	19.60	13.50
La	4.86	5.28	6.26	3.38	4.17	2.85	3.69	5.21	11.60	17.90
Ce	9.98	13.80	16.20	10.20	11.30	7.70	10.00	13.40	23.40	37.10
Pr	1.45	2.28	2.75	1.84	1.94	1.35	1.71	2.27	3.11	4.97
Nd	6.46	11.50	13.80	9.95	10.10	7.21	8.88	11.60	13.30	20.90
Sm	1.68	3.40	3.92	3.01	3.08	2.32	2.67	3.36	3.01	4.18
Eu	0.65	1.24	1.41	1.21	1.18	0.97	1.06	1.33	1.12	1.17
Gd	1.81	3.54	3.80	3.17	3.07	2.39	2.72	3.46	3.06	3.75
Tb	0.39	0.81	0.85	0.76	0.71	0.56	0.62	0.77	0.56	0.53
Dy	2.67	5.26	5.24	4.96	4.62	3.68	3.96	4.84	3.29	2.53
Ho	0.56	1.11	1.08	1.01	0.98	0.77	0.82	1.00	0.66	0.46
Er	1.77	3.36	3.28	3.06	2.96	2.36	2.49	3.03	2.06	1.40
Tm	0.26	0.47	0.45	0.43	0.41	0.34	0.34	0.41	0.28	0.18
Yb	1.72	3.20	2.96	2.83	2.73	2.17	2.26	2.78	1.95	1.23
Lu	0.27	0.47	0.44	0.43	0.42	0.33	0.34	0.42	0.30	0.19
Nb/Nb *	0.17	0.37	0.45	0.46	0.43	0.35	0.49	0.37	0.19	0.11
ΣREE	34.53	55.72	62.44	46.24	47.67	35.00	41.56	53.88	67.70	96.49
δEu	1.13	1.08	1.10	1.19	1.16	1.25	1.19	1.18	1.12	0.89
LREE/HREE	2.65	2.06	2.45	1.78	2.00	1.78	2.07	2.22	4.57	8.40
(La/Yb) _n	1.91	1.12	1.43	0.81	1.03	0.89	1.10	1.27	4.02	9.83
(Ce/Yb) _n	1.50	1.12	1.42	0.93	1.07	0.92	1.15	1.25	3.11	7.82

表2 林周县勒青拉洛巴堆组火山岩常量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)含量

Table 2 Major element and trace element data for volcanic rocks in the Luobdui Fm. in Leqingla

样号	S03-b22	S03-b23	S03-b27	S03-b28	S03-b29	LQ-2	LQ-3	LQ-4
SiO ₂	51.14	47.32	60.56	53.82	50.74	52.26	52.84	50.62
TiO ₂	0.86	0.94	0.85	0.82	0.96	0.92	0.89	0.93
Al ₂ O ₃	17.91	18.50	19.11	19.77	15.22	16.56	16.66	21.22
Fe ₂ O ₃	3.87	5.36	4.87	1.60	7.60	3.05	3.00	2.02
FeO	5.37	6.60	2.62	4.74	4.41	6.70	5.68	7.21
CaO	7.98	8.65	4.63	4.69	6.00	5.64	5.96	5.38
MgO	4.32	4.92	1.16	3.93	3.27	3.85	4.16	2.86
K ₂ O	2.86	4.24	2.64	0.70	3.48	4.50	4.57	1.73
Na ₂ O	1.86	0.46	0.51	6.40	0.093	2.52	2.93	4.23
P ₂ O ₅	0.43	0.25	0.066	0.4278	0.4309	0.4100	0.3900	0.3000
MnO	0.23	0.15	0.028	0.11	0.10	0.23	0.21	0.20
LOI	2.93	2.07	2.63	2.73	7.95	3.14	3.03	3.14
Total	99.76	99.46	99.67	99.74	100.25	99.78	100.32	99.84
TFeO	8.853	11.424	7.003	6.18	11.25	9.445	8.38	9.028
Mg [#]	46.53	43.44	22.80	53.14	34.14	42.09	46.95	36.09
Cr	5.45	16.2	25.6	5.52	48.0	13.6	8.77	21.3
Th	4.64	3.41	4.01	5.29	2.23	4.39	4.31	4.78
V	232	299	271	199	331	200.00	181.00	261.00
Rb	88.1	275	77.3	41.4	92.2	128.00	145.00	122.00
Sr	704	277	474	880	174	662.00	500.00	581.00
Ba	1226	330	914	134	464	1597.00	1133.00	539.00
Ta	0.25	0.15	0.13	0.20	0.23	0.34	0.32	0.25
Nb	5.86	3.72	3.78	5.87	5.46	5.16	5.18	3.63
Hf	2.94	2.37	2.30	2.69	2.10	2.87	2.76	2.69
Zr	96.7	79.5	74.8	78.7	59.2	97.20	101.00	89.60
Y	29.7	26.7	21.3	22.2	15.2	27.50	25.90	25.00
La	23.4	18.9	10.3	28.1	9.89	25.70	23.70	17.00
Ce	47.4	40.1	22.8	59.3	20.3	48.70	46.30	34.90
Pr	6.13	4.95	3.01	7.21	2.66	6.20	5.98	4.63
Nd	25.7	21.2	13.3	29.6	11.4	25.80	24.80	19.50
Sm	5.91	5.19	3.23	6.36	2.65	5.43	5.31	4.39
Eu	1.66	1.57	0.71	1.40	0.66	2.11	1.80	1.38
Gd	5.65	4.98	3.36	5.09	2.53	5.30	5.05	4.36
Tb	0.88	0.83	0.58	0.77	0.44	0.87	0.85	0.77
Dy	5.34	5.06	3.74	4.50	2.75	4.73	4.52	4.31
Ho	1.05	0.98	0.76	0.88	0.60	0.93	0.88	0.84
Er	3.00	2.94	2.4	2.65	1.84	2.95	2.70	2.66
Tm	0.43	0.40	0.34	0.36	0.26	0.40	0.36	0.37
Yb	2.77	2.73	2.34	2.48	1.77	2.67	2.43	2.49
Lu	0.42	0.40	0.36	0.38	0.26	0.41	0.37	0.38
Nb/Nb [*]	0.19	0.16	0.20	0.16	0.39	0.16	0.17	0.14
ΣREE	129.74	110.23	67.23	149.08	57.87	132.20	125.05	97.98
δEu	0.87	0.93	0.65	0.73	0.76	1.19	1.05	0.95
LREE/HREE	5.64	5.02	3.84	7.71	4.55	6.24	6.29	5.06
(La/Yb) _n	5.71	4.68	2.97	7.66	3.78	6.50	6.59	4.61
(Ce/Yb) _n	4.43	3.81	2.52	6.20	2.97	4.73	4.94	3.63

续表 2

Continued Table 2

样号	LQ-5	LQ-6	LQ-8	LQ-9	LQ-10	LQ-11	LBD01-1	LBD01-2
SiO ₂	49.58	48.34	49.12	50.92	50.46	57.80	47.98	47.64
TiO ₂	1.11	1.02	0.93	0.96	0.92	1.14	1.00	0.65
Al ₂ O ₃	20.04	18.38	16.89	17.93	16.48	18.14	16.59	11.75
Fe ₂ O ₃	3.20	4.80	5.97	5.99	4.82	6.76	2.94	5.45
FeO	6.90	5.94	4.06	2.98	5.66	4.49	8.44	9.15
CaO	7.65	6.52	10.28	8.35	9.32	4.93	7.83	12.38
MgO	2.63	5.11	3.78	3.67	4.48	1.92	6.42	7.29
K ₂ O	5.37	2.21	3.36	1.56	0.47	1.18	0.82	1.77
Na ₂ O	0.41	3.43	2.12	4.57	4.27	0.41	3.09	0.79
P ₂ O ₅	0.180	0.260	0.280	0.300	0.260	0.310	0.275	0.2021
MnO	0.11	0.26	0.31	0.15	0.30	0.06	0.25	0.39
LOI	2.23	3.44	2.07	2.15	2.63	2.88	3.00	2.30
Total	99.41	99.71	99.17	99.53	100.07	100.022	98.63	99.77
TFeO	9.78	10.26	9.43	8.37	10.00	10.57	11.086	14.055
Mg [#]	32.41	47.03	41.67	43.87	44.41	24.46	50.80	48.05
Cr	18	36.8	13.6	8.14	14	30	57.3	44.3
Th	4.52	4.86	3.99	4.34	3.83	3.36	2.05	3.82
V	313.00	378.00	391.00	288.00	337.00	319.00	237.00	198.00
Rb	180.00	114.00	100.00	35.10	17.80	15.50	26.40	55.40
Sr	284.00	607.00	580.00	955.00	713.00	308.00	688.00	561.00
Ba	1148.00	434.00	410.00	310.00	146.00	444.00	282.00	588.00
Ta	0.28	0.27	0.19	0.24	0.19	0.20	0.36	0.26
Nb	4.18	4.21	2.81	3.45	2.68	2.95	5.70	4.10
Hf	2.95	2.46	2.13	2.52	2.12	2.72	2.50	2.60
Zr	102.00	83.00	68.10	82.70	68.90	86.00	101.00	78.00
Y	29.40	23.20	25.50	23.90	26.30	20.90	24.81	28.19
La	19.60	18.00	17.90	19.10	18.50	13.30	21.49	27.84
Ce	45.10	36.10	34.30	37.30	35.80	28.40	43.38	51.14
Pr	6.05	4.89	4.64	4.78	4.75	3.91	5.52	6.66
Nd	24.90	20.90	19.80	19.80	20.00	16.70	22.49	26.63
Sm	5.41	4.70	4.47	4.39	4.61	3.86	5.41	6.29
Eu	1.90	1.50	1.50	1.47	1.52	1.04	2.05	3.10
Gd	5.13	4.41	4.44	4.33	4.53	3.74	5.54	6.74
Tb	0.92	0.77	0.78	0.76	0.81	0.66	0.87	1.01
Dy	5.06	4.23	4.35	4.28	4.47	3.73	5.06	5.70
Ho	1.02	0.82	0.88	0.86	0.90	0.76	1.01	1.12
Er	3.21	2.49	2.72	2.66	2.82	2.40	2.84	2.95
Tm	0.46	0.33	0.37	0.37	0.39	0.34	0.44	0.45
Yb	3.23	2.21	2.53	2.59	2.65	2.34	2.71	2.59
Lu	0.50	0.33	0.37	0.38	0.40	0.36	0.41	0.38
Nb/Nb [*]	0.15	0.15	0.11	0.13	0.11	0.15		
ΣREE	122.49	101.68	99.05	103.07	102.15	81.54	119.22	142.60
δEu	1.09	0.99	1.02	1.02	1.01	0.83	1.13	1.45
LREE/HREE	5.27	5.52	5.02	5.35	5.02	4.69	5.31	5.81
(La/Yb) _n	4.10	5.50	4.78	4.98	4.72	3.84	5.3586	7.26
(Ce/Yb) _n	3.62	4.23	3.51	3.73	3.50	3.15	4.1482	5.12

表3 洛巴堆组火山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic analyses of volcanic rocks in the Luobadui Fm

样号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm (2\sigma)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$f^{\text{Rb}/\text{Sr}}$
S03-b22	90.57	666.20	0.3918	0.707515 \pm 13	0.706010	42.80	21.43	3.74
S03-b27	37.72	568.50	0.1903	0.706834 \pm 12	0.706103	33.13	22.75	1.30
S03-b28	44.79	916.10	0.1404	0.707125 \pm 10	0.706586	37.26	29.61	0.70
S03-b29	105.00	179.60	1.6835	0.707742 \pm 13	0.701275	46.02	-45.78	19.36
LQ-4	90.26	646.26	0.4040	0.706894 \pm 14	0.705342	33.98	11.95	3.89
LQ-6	86.14	677.89	0.3676	0.706668 \pm 12	0.705256	30.78	10.73	3.45
LQ-8	78.60	629.11	0.3615	0.706588 \pm 13	0.705200	29.64	9.93	3.37
LQ-9	34.01	1099.69	0.0895	0.706129 \pm 14	0.705785	23.12	18.25	0.08
LQ-10	14.14	834.34	0.0490	0.706495 \pm 13	0.706307	28.32	25.65	-0.41
LQ-11	26.68	435.45	0.1772	0.706946 \pm 15	0.706265	34.72	25.05	1.14
LBD01-1	36.53	824.20	0.1283	0.706508 \pm 6	0.706015	28.50	21.51	0.55
LBD01-2	65.20	683.20	0.2762	0.707035 \pm 14	0.705974	35.98	20.92	2.34
TJ5-2	6.20	306.20	0.0586	0.704339 \pm 13	0.704114	-2.28	-5.48	-0.29
TJ5-3	5.43	325.22	0.0483	0.703964 \pm 14	0.703779	-7.60	-10.24	-0.42
TJ5-4	1.10	196.19	0.0162	0.704489 \pm 11	0.704427	-0.16	-1.04	-0.80
TJ5-5	3.41	167.43	0.0589	0.704566 \pm 13	0.704340	0.93	-2.28	-0.29
TJ5-6	0.79	225.74	0.0101	0.704394 \pm 11	0.704356	-1.50	-2.05	-0.88
TJ5-7	10.14	151.58	0.1935	0.704548 \pm 12	0.703804	0.68	-9.88	1.34
样号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm (2\sigma)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$
S03-b18	7.80	44.46	0.1062	0.512619 \pm 11	0.512431	-4.03	-0.37	-0.46
S03-b19	7.75	44.35	0.1058	0.512590 \pm 11	0.512403	-4.58	-0.94	-0.46
S03-b22	7.65	33.54	0.1381	0.512452 \pm 13	0.512208	-8.39	-3.63	-0.30
S03-b27	3.64	15.36	0.1437	0.512609 \pm 13	0.512355	-5.52	-0.57	-0.27
S03-b28	6.81	31.91	0.1292	0.512464 \pm 50	0.512236	-7.85	-3.39	-0.34
S03-b29	2.78	12.51	0.1346	0.512404 \pm 12	0.512166	-9.21	-4.56	-0.32
LQ-4	5.62	23.13	0.1468	0.512648 \pm 12	0.512389	-4.87	0.20	-0.25
LQ-6	5.76	23.28	0.1495	0.512614 \pm 13	0.512349	-5.63	-0.47	-0.24
LQ-8	4.80	19.54	0.1484	0.512668 \pm 12	0.512405	-4.54	0.58	-0.25
LQ-9	4.61	19.07	0.1461	0.512666 \pm 13	0.512408	-4.49	0.55	-0.26
LQ-10	5.28	21.53	0.1483	0.512689 \pm 12	0.512427	-4.11	1.00	-0.25
LQ-11	3.89	15.73	0.1495	0.512692 \pm 12	0.512428	-4.11	1.05	-0.24
LBD01-1	4.53	19.04	0.1440	0.512608 \pm 8	0.512354	-5.55	-0.59	-0.27
LBD01-2	6.17	26.60	0.1403	0.512568 \pm 8	0.512320	-6.20	-1.37	-0.29
TJ5-2	3.38	47.77	0.0428	0.512273 \pm 11	0.512197	-8.60	-7.12	-0.78
TJ5-3	5.07	9.90	0.3099	0.512624 \pm 12	0.512076	-10.96	-0.27	0.58
TJ5-4	4.03	12.10	0.2015	0.513030 \pm 12	0.512674	0.70	7.65	0.02
TJ5-5	3.68	11.44	0.1944	0.513017 \pm 12	0.512673	0.69	7.39	-0.01
TJ5-6	3.10	9.15	0.2047	0.513055 \pm 13	0.512694	1.09	8.14	0.04
TJ5-7	3.41	10.36	0.1988	0.513023 \pm 12	0.512671	0.65	7.51	0.01

现代($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_{CHUR} = 0.0827, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_{CHUR} = 0.7045; 衰变常数 $\lambda_{\text{Rb-Sr}} = 1.42 \times 10^{-11}$ (年 $^{-1}$);

现代($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.1967, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.512638; 衰变常数 $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 6.54 \times 10^{-12}$ (年 $^{-1}$); $\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为现在值, $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为初始值。洛巴堆组年龄按 270 Ma 进行同位素年龄校正。

表4 洛巴堆组火山岩铅同位素测试结果及有关参数

Table 4 Lead isotopic analyses and related ratios for volcanic rocks in the Luobadui Fm

样号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$\Delta 7/4\text{Pb}$	$\Delta 8/4\text{Pb}$
S03-b22	18.6450 ± 14	15.6420 ± 11	38.8467 ± 30	18.6332	15.6414	38.8296	12.99	67.79
S03-b27	18.7025 ± 16	15.6440 ± 13	38.9003 ± 32	18.6932	15.6435	38.8855	12.56	66.20
S03-b28	18.5299 ± 18	15.6421 ± 15	38.7440 ± 36	18.5179	15.6415	38.7245	14.25	71.44
S03-b29	18.6204 ± 17	15.6489 ± 16	38.7569 ± 35	18.6146	15.6486	38.7487	13.94	61.78
LQ-4	18.5723 ± 8	15.6301 ± 8	38.7923 ± 8	18.5644	15.6297	38.7747	12.59	71.14
LQ-6	18.5723 ± 5	15.6140 ± 5	38.7886 ± 5	18.5674	15.6137	38.7707	10.98	70.77
LQ-8	18.6588 ± 7	15.6136 ± 7	38.6943 ± 6	18.6396	15.6126	38.6796	10.00	50.88
LQ-9	18.6182 ± 9	15.6081 ± 10	38.6669 ± 12	18.6055	15.6074	38.6509	9.89	53.05
LQ-10	18.6087 ± 11	15.6014 ± 12	38.6356 ± 14	18.5986	15.6009	38.6215	9.32	51.07
LQ-11	18.7241 ± 9	15.6155 ± 10	38.8438 ± 11	18.7155	15.6151	38.8314	9.48	57.94
LBD01-1	18.0615 ± 20	15.5579 ± 17	38.6040 ± 47	18.0439	15.5570	38.6040	10.90	114.06
LBD01-2	18.6050 ± 29	15.58546 ± 30	38.6204 ± 11	18.6185	15.5838	38.6204	7.28	44.55
TJ5-2	18.3536 ± 7	15.5807 ± 8	38.3496 ± 8	18.3521	15.5806	38.3479	10.02	53.31
TJ5-3	18.2871 ± 10	15.5330 ± 11	38.2102 ± 12	18.2860	15.5329	38.2087	5.97	47.41
TJ5-4	18.2209 ± 8	15.5476 ± 9	38.1448 ± 10	18.2198	15.5475	38.1442	8.15	48.87
TJ5-5	18.2130 ± 4	15.5401 ± 4	38.1182 ± 5	18.2117	15.5400	38.1173	7.48	47.17
TJ5-6	18.2310 ± 8	15.5554 ± 8	38.1434 ± 7	18.2284	15.5553	38.1426	8.82	47.51
TJ5-7	18.1542 ± 7	15.5375 ± 7	38.0772 ± 8	18.1535	15.5375	38.0765	7.86	50.18

误差均为 2σ 绝对误差。初始 Pb 校正采用路远发(2004)提供的软件计算。 $\Delta 7/4\text{Pb} = [(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 0.1084(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 13.491] \times 100$; $\Delta 8/4\text{Pb} = [(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 1.209(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 15.627] \times 100$ 。洛巴堆组年龄按 270Ma 进行同位素比值校正

该剖面大部分玄武岩的稀土总量和轻、重稀土比值低于几种典型的大陆玄武岩、喜马拉雅带二叠纪玄武岩 (Hawkesworth *et al.*, 1995; 肖龙等, 2003; Garzanti, 1999)。但顶部的微晶玄武岩为 LREE 富集型, 稀土总量、轻重稀土比值和分配曲线与勒青拉剖面主体玄武岩相似(图 5A-C)。

该剖面中玄武岩的蜘蛛图分配曲线为平坦型或 LILE 略富集型(图 5D)。分配曲线左侧的 Rb、Ba、Th、Nb、Ta、La、Ce 含量不同程度地低于喜马拉雅带二叠纪玄武岩和其它大陆玄武岩, 而曲线右侧的 HFE 则与陆内玄武岩相似, 仅出现一些 Ti 负异常^①。唐家乡玄武岩存在显著的 Nb、Ta 负异常。从蜘蛛图特点看, 该剖面玄武岩具有某些原始岩浆特征。

勒青拉剖面

林周县勒青拉剖面中玄武岩的稀土总量 ΣREE 为 57.87 ~ 149.08, 平均为 108.82; 轻、重稀土比值 LREE/HREE 为 3.84 ~ 7.71, 平均为 5.40; $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 为 2.97 ~ 7.66, 平均为 5.19; $(\text{Ce}/\text{Yb})_n$ 为 2.52 ~ 6.20, 平均为 4.01; Eu 异常不明显, δEu 为 0.65 ~ 1.45, 平均为 0.98, 说明斜长石分离结晶不明显。在稀土元素经球粒陨石标准化的分配模式图中, 该剖面玄武岩与典型的大陆玄武岩、喜马拉雅带二叠纪玄武岩有区别, 表现为相对较高的稀土总量和轻、重稀土分馏程度(图 6B、C)。

该剖面玄武岩的蜘蛛图表现为 LILE 富集型(图 6E、F), 显著特征是强烈的 Nb、Ta 负异常, 表明有大量壳源成分参与。与典型大陆玄武岩和喜马拉雅带二叠纪玄武岩相比, 蜘蛛图曲线表现为较高的 La、Ce、P、Nd 含量和一定程度的 Ti 负异常, Rb、Ba、Th 富集程度较高。与岛弧高 Al 玄武岩相比, 表现为 LIL 元素相对较高 (Lühr and Haldar, 2006)。与唐家乡剖面相比, 勒青拉玄武岩可能受到较多的上地壳成分加入, 且暗示与岛弧玄武岩更明显的相似性。

4 冈底斯带二叠纪的构造环境

以上对地层学和岩石地球化学方面的讨论, 为探索冈底斯带二叠纪的构造环境提供了一些证据。(1) 二叠纪的沉积环境总体为浅海相, 但处于缓慢的海退过程中。晚二叠世可能局部隆升成陆。(2) 二叠纪火山活动早期为玄武质, 晚期为安山质和英安质。(3) 本文讨论的洛巴堆组玄武岩具有明显的 Nb、Ta 负异常, 上部层位具有很高的 Al_2O_3 含量, 类似高

^① 朱弟成. 2003. 特提斯喜马拉雅带中段晚古生代以来的火山岩及其意义. 中国地质科学院博士学位论文.

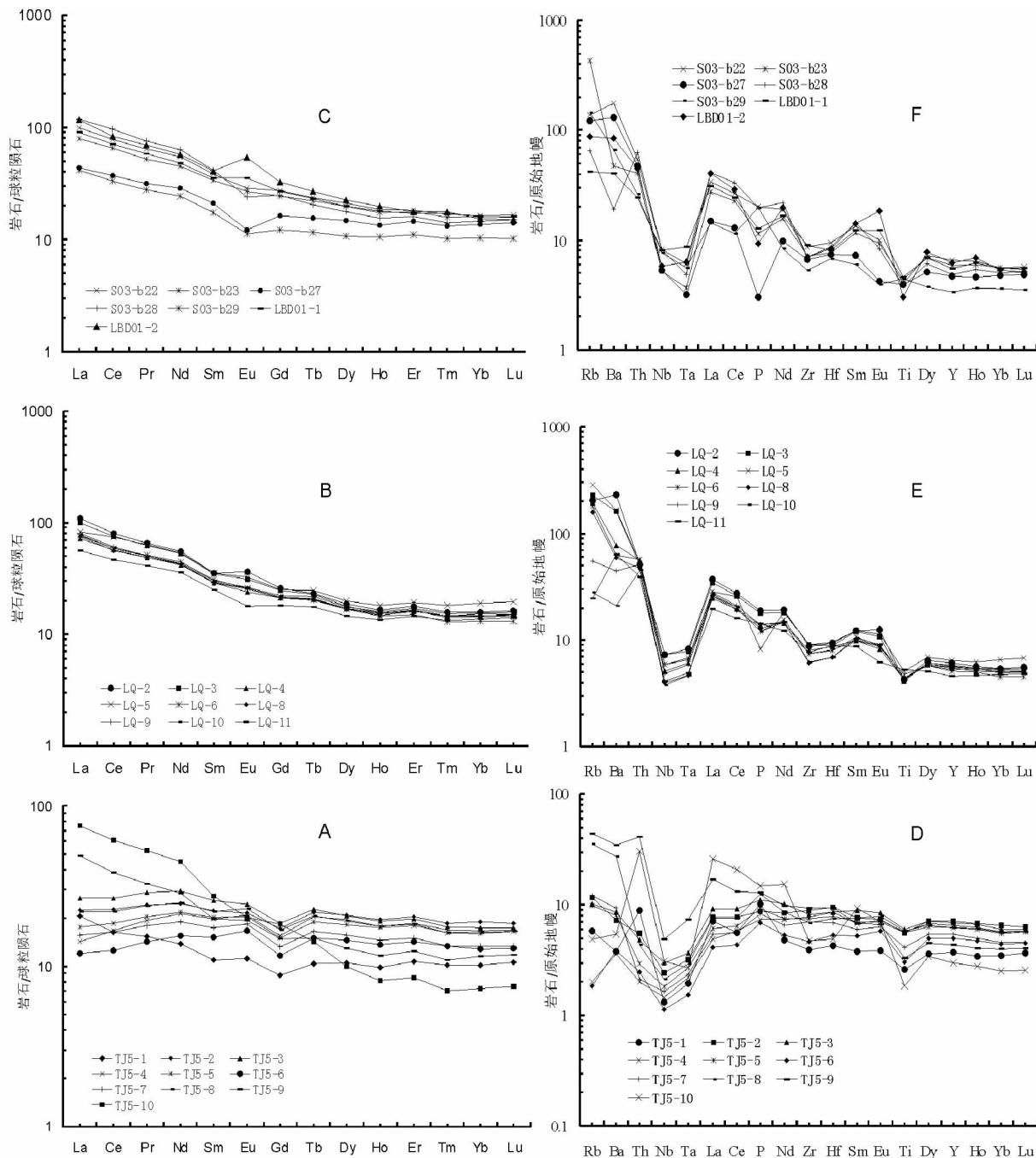


图5 洛巴堆组玄武岩类稀土元素和微量元素分配模式图

球粒陨石、N-MORB和原始地幔数据 Sun and McDough, 1989。A、D-唐家乡洛巴堆组 (P₁)；B、C、E、F-林周~勒青拉洛巴堆组、措勤下拉组 (P₂)。

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns (spider diagrams) for basalts in the Luobdaui Fm

铝玄武岩。(4)二叠系玄武岩从下向上,地壳成分的加入逐渐增大。这些特点反映初始岛弧的形成和向陆缘弧演化的过程。

火山岩的微量判别图对冈底斯带二叠纪岛弧环境提供进一步证据。对于受到一定变质作用的玄武岩,本文主要采

用稳定元素 Zr、Nb、Y、Th、Hf 等及其比值,进行构造环境示踪分析。

Th-Hf/3-Nb/16 判别图 (Wood, 1980) 被广泛用于玄武岩的形成环境判别,优点是识别火山弧玄武岩效果特别好。在此图中(图 6A)唐家乡和勒青拉洛巴堆剖面的玄武岩落在

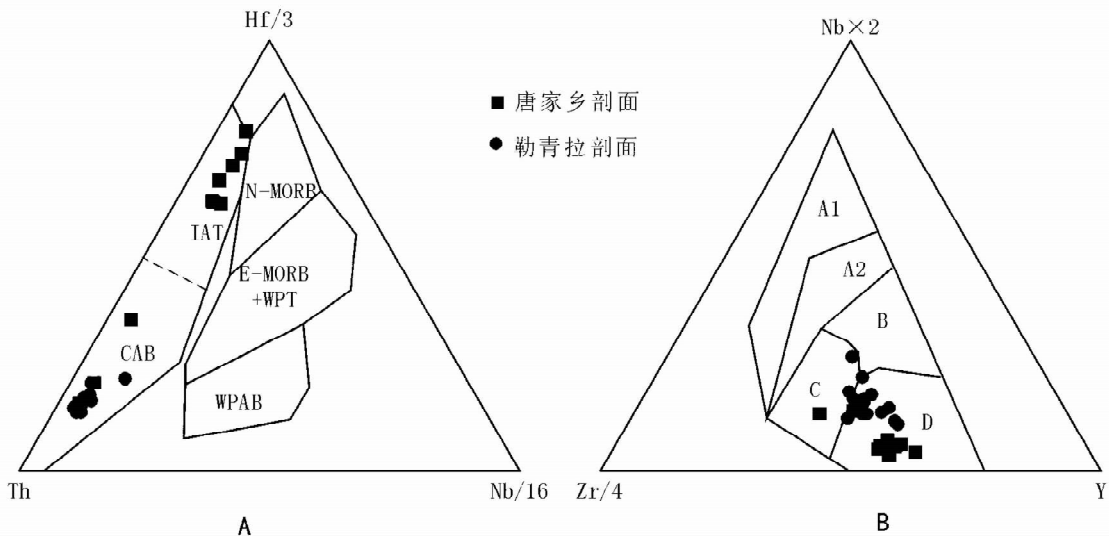


图6 二叠纪玄武岩类构造环境判别图

A) Th-Hf/3-Nb/16 判别图(据 Wood, 1980), CAB-岛弧钙碱性玄武岩, Hf/Th 小于 3; IAT-岛弧拉斑玄武岩, Hf/Th 大于 3; WPAB-板内碱性玄武岩; WPT-板内拉斑玄武岩。B) Zr/4-Y-Nb x Nb 判别图(据 Meschede, 1986), A1-板内碱性玄武岩; A2-板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B-EMORB; C-板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D- NMORB 和火山弧玄武岩

Fig. 6 Tectonomagmatic discrimination diagrams for Permian volcanic rocks

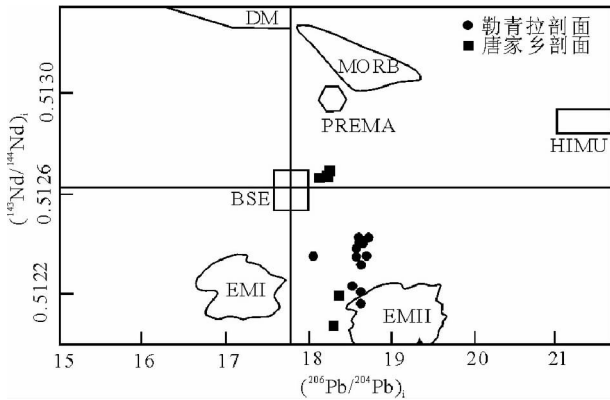


图7 洛巴堆组玄武岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 图解
底图据 Rollison, 1993。DM-亏损地幔, BSE-全硅酸盐地球(相当于原始地幔), EMI/EMII-富集型地幔, HIMU-具有高 U/Pb 比值的
地幔, PREMA-普通地幔, MORB-洋脊玄武岩

Fig. 7 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ diagram for Permian basalts

岛弧玄武岩范围内。Zr/4-Y-2Nb 判别图(Meschede, 1986)的特点是区分不同类型的板内玄武岩,但对火山弧玄武岩和 MORB 的区分不够明确。在该图中,唐家乡和勒青拉洛巴堆剖面的玄武岩主要落在火山弧玄武岩和 N-MORB 范围内(图 6B)。再者,当雄纳龙盆地和狮泉河地区的中、晚二叠世中、酸性火山岩形成于陆缘岛弧环境(李光明等, 2002; 西藏地质调查院, 2005)。因此,本文研究的洛巴堆组玄武岩为初始岛弧阶段的产物。

5 讨论

5.1 岩浆源区特征和岛弧演化

Sr、Nd、Pb 同位素地球化学特征表明,洛巴堆组玄武岩形成于不均匀地幔源区,都存在 Dupal 异常,但勒青拉玄武岩 Dupal 异常更明显。较早形成的唐家乡玄武岩形成于略亏损地幔和下地壳成分的混合源区。稍晚形成的勒青拉玄武岩来源于 EMII 型富集地幔,地壳物质的加入更明显。

(1) 唐家乡玄武岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.70378 ~ 0.70443, 平均为 0.70414; $\varepsilon_{\text{Nd}}(i)$ 值为 -7.12 ~ 8.14 平均为 3.88。勒青拉玄武岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.70128 ~ 0.70659, 平均为 0.70551; $\varepsilon_{\text{Nd}}(i)$ 值为 -4.56 ~ 1.05 平均为 -0.93。

(2) 分馏因子 $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 是度量源区 Sm/Nd 相对于球粒陨石的富集标志(表 3),采用计算公式 $f^{\text{Sm}/\text{Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{现在}} / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1$ 。洛巴堆组玄武岩具有稳定的 $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值,唐家乡玄武岩的 $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 大部分为正值,平均为 -0.02, 接近于 0。勒青拉玄武岩的 $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 均为负值,平均为 -0.27。

(3) 在 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 图上(图 8),唐家乡玄武岩多数样品靠近 BSE 区,略向 MORB 和 PREMA 区偏离,少数样品位于 EMII 附近。说明该剖面玄武岩源区为略亏损源区,并有地壳成分不均匀加入。勒青拉玄武岩接近 EMII 范围,略向 MORB 和 PREMA 区偏离,说明源区以 EMII 富集地幔为主。

(4) 唐家乡玄武岩的 $\Delta 7/4\text{Pb}$ 值为 5.97 ~ 10.02, 平均为 8.05, $\Delta 8/4\text{Pb}$ 值为 47.17 ~ 53.31, 平均为 49.08(表 4),

ΔSr 值为 39.64 ~ 45.66, 平均为 43.83。勒青拉玄武岩的 $\Delta 7/4Pb$ 值为 7.28 ~ 14.25, 平均为 11.18, $\Delta 8/4Pb$ 值为 44.55 ~ 114.06, 平均为 65.06, ΔSr 值为 61.29 ~ 77.42, 平均为 68.73。按照判断 Dupal 异常的边界条件, $\Delta 7/4Pb > 3$, $\Delta 8/4Pb > 10$, $\Delta Sr > 50$ 或 39 (Dupre and Allegre, 1983; Hart, 1984; 魏启荣等, 2003), 洛巴堆组玄武岩的地幔源区都存在 Dupal 异常, 但勒青拉玄武岩的 Dupal 异常更明显, 源区中上地壳成分加入更多。

同位素研究表明, 冈底斯二叠世早期岛弧地壳相对较薄, 源区或岩浆的壳源成分比例较低; 到中二叠世地壳逐渐加厚, 壳源成分在源区或岩浆中所占比例增大, 暗示向陆缘弧的演化过程。

5.2 冈瓦纳大陆北缘二叠纪构造演化

二叠纪是泛大陆解体时期, 也是全球岩浆活动的活跃时期。一般将二叠纪岩浆活动归咎于地幔柱活动或与新特提斯洋的开启有关 (王旺章等, 1996; 宋谢炎等, 1998; 张招崇等, 2005; Nikishin, *et al.*, 2002)。沿冈瓦纳大陆北缘北喜马拉雅带分布的二叠纪玄武岩, 如基龙组玄武岩、色龙群玄武岩、吉隆沟玄武岩、Panjal 暗色岩、Nar-Tsum 细碧岩等, 是冈瓦纳大陆北缘裂陷和新特提斯洋初始张裂阶段的产物 (Garzanti *et al.*, 1999; 朱同兴等, 2002; 朱弟成等, 2004)。

位于喜马拉雅带北部的冈底斯带在二叠纪为岛弧环境, 形成于近南北向挤压应力场中, 但与全球范围的二叠纪时期泛大陆解体、裂离的构造背景并不一致。究其原因, 可能有两类。第一, 北喜马拉雅和冈底斯之间的新特提斯洋在早二叠世初始打开, 在中晚二叠世洋盆已初具规模, 成为古地理分隔意义上的洋盆 (Metcalf, 1992; Garzanti and Sciunnach, 1997; Garzanti *et al.*, 1999; Acharyya, 2000)。冈底斯-滇缅泰马地块已成为独立于冈瓦纳大陆之外的独立地质单元, 构造运动已不受冈瓦纳大陆应力场控制。第二, 二叠纪时期冈瓦纳与泛华夏大陆之间的古特提斯洋处于强烈的闭合和双向俯冲、消减阶段 (潘桂棠等, 2006), 冈底斯带二叠纪弧火山岩的形成是古特提斯洋向南的俯冲、消减作用的产物。

6 结论

(1) 冈底斯构造带的二叠系主要分布在东西向展布的“弧背断隆带”中。二叠纪主要为浅海台地、台地斜坡, 局部达深海陆棚环境。早二叠世到晚二叠世为缓慢的海退过程, 晚二叠世局部演化为海陆交互环境。二叠纪发生玄武岩喷溢和安山岩-英安岩喷发两期火山活动。沉积环境演变和火山活动具有活动大陆边缘特征。

(2) 唐家乡洛巴堆组下部(可能为早二叠世)玄武岩类的 Al_2O_3 含量平均为 15.54%, MgO 为 7.43%, 全铁含量 $TFeO$ 为 9.30%。稀土分配模式为 LREE 略富集型-平坦型, 稀土总量 ΣREE 平均为 54.12, 轻、重稀土比值 LREE/HREE

平均为 3.00。微量元素蜘蛛图为平坦型或 LILE 略富集型, 具有明显的 Nb、Ta 负异常。勒青拉洛巴堆组(中二叠世)玄武岩类的显著特点是 Al_2O_3 含量较高, 平均为 17.57%, 类似于岛弧高铝玄武岩。 TiO_2 含量平均为 0.93%, MgO 含量低, 平均为 3.99%, 镁质系数 $Mg^\#$ 仅为 41.12%。稀土分配模式为 LREE 略富集型, 稀土总量 ΣREE 平均为 108.82, 轻、重稀土比值 LREE/HREE 平均为 5.40。蜘蛛图中分配曲线为 LIL 元素富集型, 具有十分显著的 Nb、Ta 负异常。

(3) 岩石地球化学示踪表明, 冈底斯二叠纪火山岩形成于岛弧环境。洛巴堆组代表早、中二叠世初始岛弧阶段, 以玄武岩喷溢为主。中晚二叠世发生中、酸性火山岩喷发, 具有陆缘弧特征。Sr、Nd、Pb 同位素地球化学特征显示, 洛巴堆组早期玄武岩形成于略亏损地幔和下地壳成分的混合源区, 地壳相对较薄, 源区或岩浆的壳源成分比例较低。到中二叠世地壳逐渐加厚, 壳源成分在源区或岩浆中所占比例增大, 代表向陆缘弧的演化过程。

(4) 冈底斯带二叠纪岛弧是古特提斯洋向南的俯冲、消减作用的产物。

致谢 本文经周宇生研究员审稿, 提出了很多建设性意见。本文写作过程中, 曾得到许志琴院士、杨经绥研究员、张宏飞教授、张克信教授、张泽明研究员、祁学祥研究员和曾令森研究员的指导和帮助。在此向他们表示感谢! 向参加青藏高原地质调查项目的地质工作者致以崇高的敬意!

References

- Acharyya SK. 2000. Break Up of Australia-India-Madagascar Block, Opening of the Indian Ocean and Continental Accretion in Southeast Asia With Special Reference to the Characteristics of the Peri-Indian Collision Zones. *Gondwana Research*, 3(4): 425-443
- Bhat MI and Ahmad T. 1990. Petrogenesis and the Mantle source characteristics of the Abor volcanic rocks, Eastern Himalayas. *Journal of Geological Society of India*, 36: 227-246
- Chang CF and Zheng XL. 1973. Geological structure of Qomolangma region in southern Tibet and discussions on the origin of EW-trending Mountains in Tibet Plateau. *Sciences in China (Series D)*, 2: 190-210 (in Chinese)
- Dupre B and Allegre CJ. 1983. Pb-Sr isotopic variation in Indian ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303: 142-146
- Garzanti E, Fort PL and Sciunnach D. 1999. First report of Lower Permian basalts in south Tibet: tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17: 533-546
- Garzanti E and Sciunnach D. 1997. Early Carboniferous onset of Gondwanian glaciation and Neo-tethyan rifting in South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 359-365
- Geng QR, Wang LQ, Pan GT, Jin ZM, Zhu DC, Liao ZL, Li GM and Li SQ. 2007. Carboniferous marginal rifting in Gangdese: volcanical rocks and stratigraphical constraints, Xizang (Tibet), China. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1259-1276 (in Chinese with English abstract)
- Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753-757
- Hawkesworth CJ, Lightfoot PC and Fedorenko VA. 1995. Magma

- differentiation and mineralisation in the Siberian continental flood basalts. *Lithos*, 34: 61 – 88
- Hess PC. 1989. *Origins of Igneous Rocks*. Harvard University Press, 109 – 275
- Honegger K, Dietrich V, Frank K, Gansser A, Thöni M and Trommsdorff V. 1982. Magmatism and metamorphism in the Ladakh Himalayas (the Indus-Tsangpo suture zone). *Earth and Planetary Science Letters*, 60: 253 – 292
- Hsu KJ, Pan GT and Sengör AMC. 1995. Tectonic evolution of the Tibet plateau: a working hypothesis based on the archipelagomodel of orogenesis. *International Geology Review*, 37: 473 – 508
- Huang JQ and Chen BW. 1987. The Evolution of Tethys in China and Adjacent Area. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 86 (in Chinese with English abstract)
- Ji ZS, Yao JX and Wu GC. 2007a. Discovery of Permian and Triassic conodonts in the Shiqanhe area, Ngari, western Tibet, China and their significance. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 383 – 397 (in Chinese with English abstract)
- Ji S, Yao X and Wu GC. 2007b. Stratigraphic division of the marine Triassic in the Coqên area, western Gangdise, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 947 – 952 (in Chinese with English abstract)
- Ji ZS, Yao JX and Wu GC. 2007c. Revision of the age of the Xiagangjiang flora and its related strata in Gêrzê area, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 953 – 959 (in Chinese with English abstract)
- Li GM, Gao DF and Huang ZY. 2002. The discovery and implications of the Nalong Late Paleozoic rift basin in Damxung, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(1): 83 – 87
- Li C, Wang TW, Li HM and Zeng QG. 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiarite in the Gangdise area: evidence for the existence of Paleo-Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 22(5): 364 – 366 (in Chinese with Chinese abstract)
- Lu YF. 2004. Geokit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33(5): 459 – 464 (in Chinese with English abstract)
- Luhr JF and Haldar D. 2006. Barren Island Volcano (NE Indian Ocean): Island-arc high-alumina basalts produced by troctolite contamination. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 149: 177 – 212
- Mckenzie D and Bickle MJ. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere, *Journal of Petrology*, 29: 625 – 679
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207 – 218
- Metcalfe I. 1992. Ordovician to Permian evolution of Southeast Asian terranes; NW Australian Gondwana connections. In: Audley-Charles M. G. and Hallam A. (Eds.), *Global Perspectives on Ordovician Geology*. Balkema, Rotterdam, 293 – 305
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Zhou S, Wang LL, Qiu RZ and Zhang FQ. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdise, Tibet and implication for crustal Growth and evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281 – 290 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Dong GC, Zhou S, Guo TY, Zhang SQ and Wang LL. 2003. Response of volcanism to the India Asia collision, *Earth Sciences Frontiers*, 10(3): 135 – 148
- Nikishin AM, Ziegler PA, Abbott D, Brunet MF and Cloetingh S. 2002. Permo Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: implications for mantle plumes and mantle dynamics. *Tectonophysics*, 351: 3 – 39
- Pan GT, Mo XX, Hou ZQ, Zhu DC, Wang LQ, Li GM, Zhao ZD, Geng QR and Liao ZL. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdise orogenic belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521 – 533
- Pan GT, Wang LQ and Zhu DC. 2004. Thoughts on some important scientific problems in regional survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 12 – 19 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JX (ed.). 1985. *Igneous petrology*. Beijing: Geological Publishing House, 72 – 160 (in Chinese)
- Qiu JX and Lin JQ (eds.). 1991. *Petrochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 64 – 155 (in Chinese)
- Ren JS, Wang ZJ, Chen BW, Jiang CF, Niu BG, Li JZ, Xie GL, He ZJ and Liu ZG (eds.). 1999. *Tectonic Map of China and Adjacent Regions with Concise Illustration*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Rollison HR. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group, UK Ltd, 1 – 275
- Song XY, Wang YL, Cao ZM, Jin JF, Li JC and Wen CQ. 1998. Emeishan basalts, Emei tafrogegy and mantle plume. *Geology-Geochemistry*, 1: 47 – 52 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D. and Norry M. J. (eds), *Magmatism in ocean basins*. Geological Society. London. Special Publication, 42, 313 – 345
- Wang WZ, Wang YL, Zeng ZG and Zhang ZF. 1996. The characteristics and petrogenetic type on the primary magma of Emeishan basalts. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 16(1): 17 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413 – 421 (in Chinese with English abstract)
- Wei QR, Shen SY, Mo XX and Lu FX. 2003. Recognition and significance of DUPAL isotope anomaly in the middle part of Sanjiang area. *Geology-Geochemistry*. 31(1): 36 – 41 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrology*. Oxford University Press, London, 1 – 441
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325 – 343
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50: 11 – 30
- Wu GC, Yao JX and Ji ZS. 2007. Triassic conodont biostratigraphy in the Coqên area, western Gangdise, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 938 – 946 (in Chinese with English abstract)
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ and Sha SL. 2003. Geochemistry of Emeishan flood basalts at Binchuan area, SW China; rock types and temporal evolution. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 478 – 494 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Li TD, Li GC, Chang CF and Yuan XC. 1988. Himalayan lithospheric evolution. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 209 (in Chinese with English abstract)
- Xizang institute of Geological Survey. 2005. 1:250000 Sinuowushan and Shiquanhe Sheet in Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(1/2): 57 – 61
- Yang DM, Huang YC, Dai LN and Zhao L. 2005. SHRIMP zircon U-Pb age of garnet-bearing two-mica granite at Comai Township, Lhari County, Tibet, and its significance. *Geological Bulletin of China*, 24(3): 235 – 238 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Wang FS, Yao YL and Mahoney JJ. 2005. Comparison of the Emeishan and the Siberia big volcanic provinces and implication. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 12 – 20
- Zhou YS, Zhang Q and Mei HJ. 1981. *Magmatic Activity and Metamorphism in Tibet*. Beijing: Science Press, 1 – 146 (in Chinese)
- Zhou YY, Jiang YS and Wang MG. 2002. Permian Dibucuo Formation in the Coq n-Xainza stratigraphic area, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 21(2): 79 – 82
- Zhu DC, Pan GT, Mo XX, Liao ZL, Jiang XS and Wang LQ. 2004. Permian to Cretaceous volcanic activities in the central segment of the Tethyan Himalayas(1): distribution characteristics and significance.

Geological Bulletin of China, 23(7): 645–654 (in Chinese with English abstract)

Zhu TX, Pan GT, Feng XT, Zhou GF and Li JZ. 2002. Discovery and tectonic significance of Permian Basic volcanic rocks in the Selong area on the northern slope of the Himalayas, southern Tibet. Geological Bulletin of China, 21(11): 717–722

附中文参考文献

常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征及青藏高原东西向诸山系形成的探讨. 中国科学(D辑), 2: 190–201

耿全如, 王立全, 潘桂棠, 金振民, 朱弟成, 廖忠礼, 李光明, 李奋其. 2007. 西藏冈底斯带石炭纪陆缘裂陷作用: 火山岩和地层学证据. 地质学报, 81(9): 1259–1276

黄汲清, 陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京: 地质出版社, 1–74

纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007a. 西藏西部狮泉河地区二叠纪和三叠纪牙形石的发现及其意义. 地质通报, 26(4): 383–397

纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007b. 西藏冈底斯西段措勤地区海相三叠系的划分. 地质通报, 26(8): 947–952

纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007c. 关于藏北改则地区夏岗江植物群及其地层时代的修订意见. 地质通报, 26(8): 953–959

李才, 王天武, 李惠民, 曾庆高. 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩—古冈底斯造山的存在证据. 地质通报, 22(5): 364–366

李光明, 高大发, 黄志英. 2002. 西藏当雄纳龙晚古生代裂谷盆地的识别及其意义. 沉积与特提斯地质, 22(1): 83–87

路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459–464

莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281–290

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135–148

潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521–533

潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. 地质通报, 22(7): 12–19

邱家骧(主编). 1985. 岩浆岩岩石学. 北京: 地质出版社, 72–160

邱家骧, 林景仟(主编). 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 64–155

任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造—中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社, 1–60

宋谢炎, 王玉兰, 曹志敏, 金景福, 李巨初, 温春齐. 1998. 峨眉山玄武岩峨嵋地裂运动与幔热柱. 地质地球化学, 1: 47–52

汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 17(3): 413–421

王旺章, 汪云亮, 曾昭贵, 张筑凤. 1996. 峨眉山玄武岩母岩浆的性质及其成因类型. 矿物岩石, 16(1): 17–23

魏启荣, 沈上越, 莫宣学, 路凤香. 2003. 三江中段 Dupal 同位素异常的识别及其意义. 地质地球化学, 31(1): 36–41

武桂春, 姚建新, 纪占胜. 2007. 西藏冈底斯西段措勤地区三叠纪牙形石生物地层特征. 地质通报, 26(8): 938–946

西藏地质调查院. 2005. 1:25 万斯诺乌山幅、狮泉河幅地质调查成果和进展. 沉积与特提斯地质, 25(1/2): 57–61

肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 沙绍礼. 2003. 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征: 岩石类型及随时间演化规律. 地质科学, 38(4): 478–494

肖序常, 李廷栋, 李光岑, 常承法, 袁学诚. 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化. 北京: 地质出版社, 201–210

杨德明, 黄映聪, 戴琳娜, 赵亮. 2005. 西藏嘉黎县措麦地区含石榴子石二云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. 地质通报, 24(3): 235–238

张招崇, 王福生, 郝艳丽, Mahoney JJ. 2005. 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省地球化学特征的比较及其成因启示. 岩石矿物学杂志, 24(1): 12–20

周云生, 张旗, 梅厚均. 1981. 西藏岩浆活动和变质作用. 北京: 科学出版社, 1–146

周幼云, 江元生, 王明光. 2002. 西藏措勤—申扎地层分区二叠系敌布错组的建立及其特征. 地质通报, 21(2): 79–82

朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 廖忠礼, 江新胜, 王立全. 2004. 藏南特提斯喜马拉雅带中段二叠纪—白垩纪的火山活动(I): 分布特点及其意义. 地质通报, 23(7): 645–654

朱同兴, 潘桂棠, 冯心涛, 邹光富, 李建忠. 2002. 藏南喜马拉雅北坡色龙地区二叠系基性火山岩的发现及其构造意义. 地质通报, 21(11): 717–722