

李奋其, 李益多, 张士贞, 等. 西藏朗县地区增生楔杂岩带 90 Ma 岛弧型深成岩浆活动和意义[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 142–152.
Li Fenqi, Li Yiduo, Zhang Shizheng, et al. The 90Ma island–arc type plutonism in the subduction–accretionary complex in Langxian County area, Tibet[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 142–152(in Chinese with English abstract).

西藏朗县地区增生楔杂岩带 90 Ma 岛弧型 深成岩浆活动和意义

李奋其¹ 李益多² 张士贞¹ 李 勇¹

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 中国地质大学长城学院, 河北 保定 712000)

摘要:碰撞前增生楔带的岩浆活动在世界许多缝合带均较强烈。为证实雅鲁藏布江带是否存在碰撞前增生楔岩浆活动, 本文报道了朗县英云闪长岩岩株的地质特征, 以及岩石学、锆石 U–Pb 定年、全岩地球化学和 Sr–Nd 同位素数据。结果表明, 朗县岩体变形较弱, 侵位于强烈变形的蛇绿混杂岩中(蛇绿岩年龄(145.7±2.5)Ma), 时代为(92.58±0.72) Ma (MSWD=1.8), 岩石属于钙碱性系列, 高镁、富钠, 相容元素(Cr = 71.48×10⁻⁶~86.74×10⁻⁶, Co = 22.32×10⁻⁶~23.52×10⁻⁶, Ni = 33.51×10⁻⁶~36.31×10⁻⁶)含量高, 富含大离子亲石元素 Rb、Ba 和放射性生热元素 Th、Pb、U、K、Sr 等, 明显亏损 Nb、Ta、Zr、Hf(Ti)等非活动性元素, 轻稀土明显富集, 重稀土亏损(La_N/Yb_N=6.95~7.44), 具有不明显的铈异常, δEu 值为 0.82~0.91, ε_{Nd}(t)值变化于 2.68~3.23。在以上基础上, 结合前人研究成果, 认为朗县英云闪长岩体形成于增生楔岛弧环境, 与雅鲁藏布江洋俯冲–消减带向南迁移密切相关, 是 90 Ma 的洋脊俯冲地球动力背景下亏损地幔和增生楔熔体混合的产物。

关键词:增生楔杂岩; 岛弧型岩浆岩; 英云闪长岩株; 锆石 U–Pb 定年; 地球化学特征

中图分类号: P597.3; P588.12² **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2016)01–0142–11

The 90 Ma island–arc type plutonism in the subduction–accretionary complex in Langxian County area, Tibet

LI Fen–qi¹, LI Yi–duo², ZHANG Shi–zheng¹, LI Yong¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. Great Wall College, China University of Geosciences, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: The pre–collision magmatism took place in the accretionary wedges of many orogens. This paper presents the geological features of Langxian tonalite stock, zircon U–Pb data, and geochemical and Sr–Nd isotopic data for the tonalite to discuss whether island–arc type magmatism took place in the accretionary wedges of Yarlung Zangbo belt. The results indicate that the deformation degree of stock is distinctively lower than that of its wall rocks which comprises ophiolite mélangé (145.7±2.5Ma), and the age of

收稿日期: 2014–12–23; 改回日期: 2015–03–05

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(12120113034700)和国家自然科学基金项目(41272091)资助。

作者简介: 李奋其, 男, 1966 年生, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事冈底斯成矿带基础地质研究; E-mail: lifenqi2012@163.com。

the stock is $(92.58 \pm 0.72)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.8$). The diorite is characterized by calc-alkaline series, and high Mg, Na, abundances of compatible elements ($\text{Cr} = 71.48 \times 10^{-6} - 86.74 \times 10^{-6}$, $\text{Co} = 22.32 \times 10^{-6} - 23.52 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 33.51 \times 10^{-6} - 36.31 \times 10^{-6}$). The rock is enriched in Rb, Ba, Th, Pb, U, K, and depleted in Nb, Ta, Zr, Hf(Ti). REE patterns show strong enrichment of LREE and depletion of HREE ($\text{La}_N/\text{Yb}_N=6.95-7.44$), with indistinct Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.82-0.91$). Meanwhile, the values of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vary from 2.68 to 3.23. Based on these results in combination with previous data, the authors suggest that Langxian diorite intrusion was formed in an accretionary wedge island arc setting, related to southward migration of the Yarlung Zangbo subduction, and derived from the magma mixture of depleted mantle and subduction accretionary complex in the ocean ridge subducting at 90 Ma or so.

Key words: accretionary complex; island arc type magmatism; tonalite stock; zircon U-Pb dating; geochemical characteristics

About the first author: LI Fen-qi, male, born in 1966, doctor, senior engineer, main engages in the study of basic geology of Gandise metallogenic belt; E-mail: lifenqi2012@163.com.

Fund Support: Supported by China Geological Survey Program (No. 121201130347001), National Natural Science Foundation of China (No. 41272091).

洋壳消减过程中常于海沟部位形成增生楔杂岩,随着海沟向大洋方向迁移,在形成新的增生楔同时,先期的增生楔上常发生岛弧型火山-侵入岩浆活动。此种现象在中国北祁连、天山以及东、西昆仑造山带均可见到^[1-5]。值得指出的是,由于南美安第斯、东南亚爪哇-苏门达腊和中国班公湖-怒江带的多龙等增生楔上发现一系列超大型-特大型斑岩型铜金矿床,地质学家们对此种环境的岛弧型深成岩浆活动非常重视^[6-11]。

雅鲁藏布江结合带位于拉萨地块与印度板块之间(图1-a),属于印度/亚洲大陆主碰撞带部位,是研究现代大陆动力学的窗口。该带东西长逾3000 km,南北宽3~50 km。已有的研究表明,雅鲁藏布

江洋壳于早侏罗世开始消减,晚白垩世/古新世之闭合^[14-17]。在漫长的俯冲-消减过程中,形成了规模宏大的增生楔杂岩,但迄今未见雅鲁藏布江带存在增生楔岩浆弧的报道。本次研究以该带东部的朗县英云闪长岩株为研究对象,通过高精度同位素定年、地球化学和Sr-Nd同位素研究,探讨雅鲁藏布江带是否存在增生楔岩浆弧。

1 区域地质概况

雅鲁藏布江结合带在朗县地区总体呈近东西向展布,宽度变化于30~50 km,自北而南由3条构造混杂岩带夹于其间的2个增生地体组成(图1-b),这些地质体以规模宏大的近EW向韧性断裂接触。北

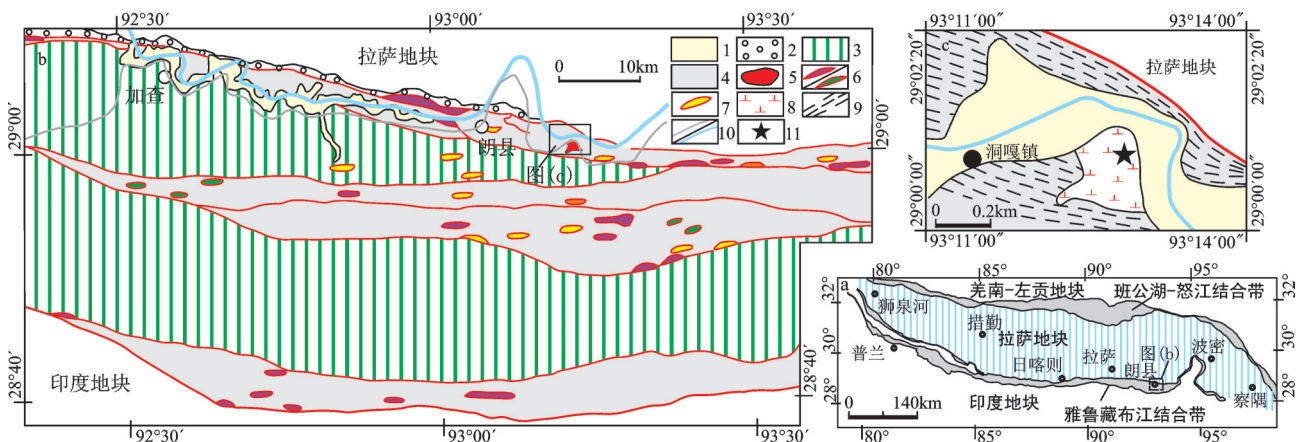


图1 研究区地质简图(据1:25万林芝县幅、隆子县幅地质图编制,略有改动)

1—第四系; 2—渐新世磨拉石建造; 3—晚三叠世复理石建造; 4—蛇绿混杂岩带; 5—朗县岩体; 6—橄榄岩岩片/玄武岩岩片; 7—二叠纪灰岩构造岩块; 8—英云闪长岩; 9—片理化带; 10—公路/雅鲁藏布江; 11—采样位置

Fig.1 Simplified geological map of the study area

1-Quaternary; 2-Oligocene molasse; 3-Late Triassic flysch; 4-ophiolite melange belt; 5-Langxian intrusion; 6-Tectonic slice of peridotite/basalt; 7-Tectonic block of Permian limestone; 8-Tonalite; 9-Schistosity zone; 10-Road/Yarlung Zangbo River; 11-Sampling location

部、中部构造混杂岩带向东归并在一起,内部糜棱岩化非常强烈,其中的蛇绿岩完全被肢解成变超镁铁岩岩片、变镁质岩岩片、变火山岩岩片或呈构造岩块产出,前两者既有浅构造层的变辉石岩、变辉绿岩等,也有深构造层的角闪岩或石榴角闪岩;火山岩岩片也显示出不同构造层岩片混杂的特点,岩石类型包括玄武岩、(石榴)绿片岩和(石榴)斜长角闪岩;前人获得变玄武岩端元或绿片岩 Rb-Sr 年龄为 173.27 Ma、168.24 Ma 和 215.57Ma, 锆石 U-Pb 年龄为 $(145.7 \pm 2.5) \text{Ma}$ ^[16]。南部混杂岩带的蛇绿岩套也被肢解构造岩片或构造岩块,岩石类型主要为辉橄岩、辉绿岩和玄武岩等,片理化、变质程度明显较北带弱。上述构造混杂岩的基质总体为一套板岩、千枚岩类,属于次深海-深海斜坡-盆地背景形成的一套复理石建造。这些混杂岩带之间的增生地体岩石特征与混杂岩的基质基本一致,被称为朗杰学岩群,形成于晚三叠世裂谷构造背景^[17-19]。

2 岩体地质

朗县岩体出露于朗县洞嘎镇东,朗县一米林公路南侧。大地构造位置属于雅鲁藏布江蛇绿岩北带,呈岩株状侵位于强烈变形的晚三叠世复理石建造中,面积约 0.1 km²(图 1-c)。岩石呈灰白色,似斑状结构,块状构造。斑晶粒径 1~3 mm,由斜长石

(15%)和角闪石(10%~15%)组成(图 2-a),呈自形-半自形晶。基质为细粒花岗结构(图 2-b),主要由石英(8%)、斜长石(37%)、钾长石(5%)、角闪石(15%)和黑云母(10%)组成,副矿物包括磁铁矿、榍石等;粒径多在 0.2~0.5 mm,角闪石呈浅绿色、深褐色,多呈半自形长柱状、不规则状菱形,部分呈集合体状,最高干涉色为二级蓝绿,纤闪石化、绿泥石化强烈;石英呈半自形粒状和不规则状,常呈集合体状,无色透明,正低突起;斜长石呈无色,自形长柱状、半自形短柱状和板柱状,表面较石英混浊,负低突起,干涉色为一级灰,见聚片双晶和卡纳双晶,斜消光,消光角 > 30°;钾长石无色,呈自形长柱状、半自形短柱状、板柱状,表面较石英混浊,见卡斯巴双晶;黑云母呈黑褐色、棕色,细片状、鳞片状,局部呈集合体。围岩主要为钙质-粉砂质绢云板岩、泥质板岩、粉砂质绢云千枚岩、绿泥千枚岩及绿片岩组成,夹灰岩透镜体,常构成歪斜褶皱、同斜倒转褶皱和不协调褶皱,片理化非常强烈,与未变形的朗县岩体构成明显的区别。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

为了准确获取朗县英云闪长岩体的形成时代,本次工作采用 LA-ICP-MS 法对岩体中的岩浆锆石进行了 U-Pb 同位素年龄分析。样品采于朗县洞嘎

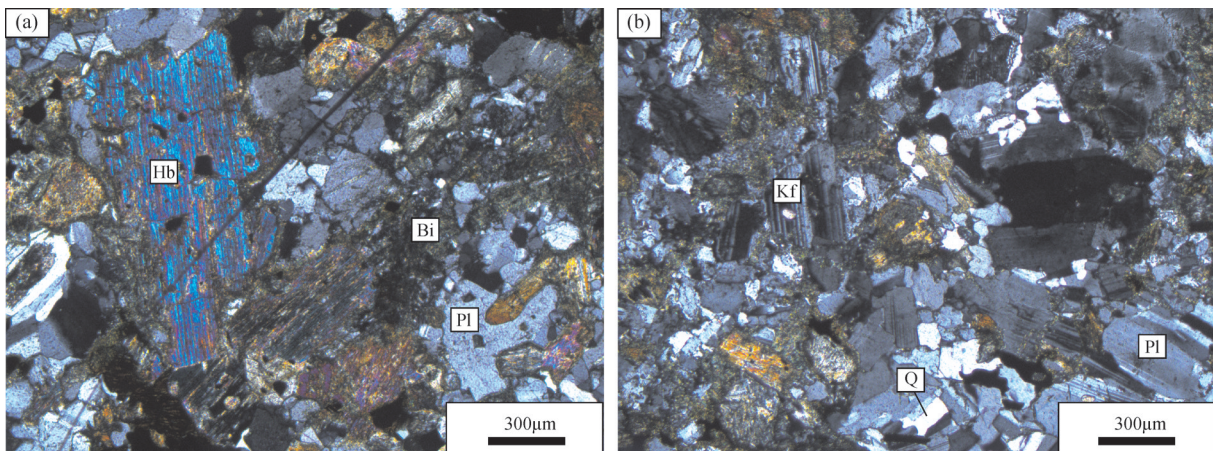


图2 朗县岩体闪长岩的显微照片(正交偏光)

Q—石英;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Bi—黑云母;Hb—角闪石

Fig.2 Microphotograph of diorite in Langxian intrusion (crossed nicols)

Q—Quartz; Kf—K-feldspar, Pl—Plagioclase; Bi—Biotite; Hb—Hornblende

① 云南省地质调查院. 1:25 万林芝县幅区域地质调查报告. 2003.

② 云南省地质调查院. 1:25 万隆子县幅区域地质调查报告. 2004.

镇东部约4 km处,朗县—米林公路南侧(图1-b,c),地理坐标:29°01'18"N,93°12'58"E,海拔3076 m。

3.1 测试方法

锆石用人工重砂方法选出,然后在双目镜下挑纯,选出晶形较好、具代表性的锆石黏贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行透射光、反射光、背散射及阴极发光扫描电镜照相(CL)。样品的CL图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室用扫描电子显微镜(Quanta 400FEG)完成。LA-ICP-MS锆石原位微区U-Pb定年及微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用的仪器相关参数、测试流程及数据处理方法等见文献[19-20]。

3.2 分析结果

来自朗县英云闪长岩的锆石均呈淡黄色-无色,透明,不规则晶形,溶蚀明显,粒径多在100~160 μm。CL图像显示锆石内部结构均匀,具有较为清楚的条带状构造(图3-a),属于岩浆结晶产物^[21-22]。本次研究共对岩体的18粒锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb定年,具体分析数据见表1。所有的U-Pb同位素分析结果都标定在图3-a中。

从表1和图3-a中可以看出,所测的朗县英云闪长岩体锆石均具有较为清楚的岩浆振荡环带,所有测点的Th、U含量分别介于 $275 \times 10^{-6} \sim 1805 \times 10^{-6}$ 和 $357 \times 10^{-6} \sim 2670 \times 10^{-6}$,Th/U比值变化于0.5~1.01,属于岩浆成因。样品18个测点的LA-ICP-MS锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄介于(86.4±0.5)Ma~(105±1)Ma之间,其中15个测点的加权平均值为(92.58±0.72)

Ma,MSWD=1.8(图3-b)。

4 地球化学特征

4.1 分析方法

地球化学样品均采于朗县岩体东部,选取较为新鲜的、无污染以及无后期岩脉穿插的露头,进行采样。主量元素分析在成都地质矿产研究所西南岩矿检测中心完成,采用玻璃熔片大型X射线荧光光谱法(XRF)分析,分析误差1%~3%。微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析方法,分析精度优于10%。Sr-Nd同位素分析在该实验室的ISOPROBE-T热电离质谱仪上完成,化学分析和同位素比值测试流程参考文献[25-26]介绍的方法。主量元素、微量元素分析结果见表2,Sr-Nd同位素分析结果见表3。

4.2 分析结果

(1) 主量元素

朗县岩体主体岩石的SiO₂含量为55.19%~56.88%,TiO₂含量为0.98%~1.03%,Al₂O₃含量16.96%~17.28%,MgO含量3.77%~4.29%,其Mg[#]值(Mg[#]=Mg/(Mg+Fe_{tot}))介于51.4~52.9,与高镁安山岩类具有一定的差别;Na₂O变化于3.64%~3.82%,K₂O变化于1.78%~2.22%,Na₂O/K₂O比值介于1.64~2.08。A/CNK值介于0.79~0.84,为偏铝质岩石。在侵入岩的An-Ab-Or分类图解上(图4-A),所有样品均落在“英云闪长岩”区。在SiO₂-K₂O图解上(图4-B),所有样品均落在钙碱性系列区。

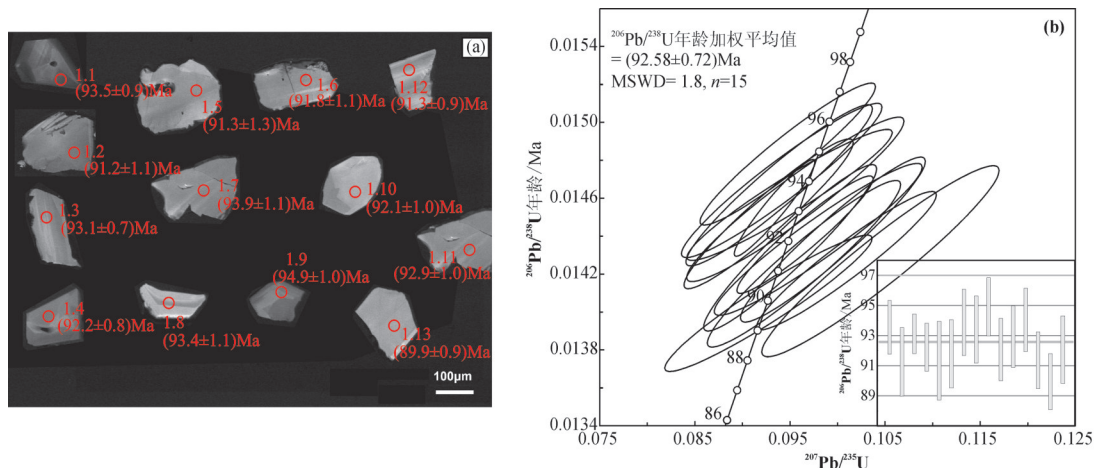


图3 朗县闪长岩阴极发光图像(a)和锆石U-Pb谐和图(b)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons (a) and U-Pb age concordia plots (b) for Langxian diorite

表 1 朗县英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analytical results of zircon U-Pb isotopes from Langxian tonalite stock

测点	含量/ 10^{-6}			同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
L1-1	33.9	628	641	0.0474	0.0022	0.0950	0.0044	0.0146	0.0001	77.9	98.1	92.1	4.1	93.5	0.9
L1-2	29.1	565	557	0.0498	0.0021	0.0965	0.0042	0.0143	0.0002	183	98	93.5	3.8	91.2	1.1
L1-3	107	1805	2670	0.0561	0.0014	0.1046	0.0029	0.0135	0.0001	454	56	101	3	86.4	0.5
L1-4	98	1490	2981	0.0466	0.0008	0.0934	0.0017	0.0145	0.0001	31.6	40.7	90.7	1.6	93.1	0.7
L1-5	49.7	879	1065	0.0488	0.0015	0.0966	0.0029	0.0144	0.0001	139	72	93.6	2.7	92.2	0.8
L1-6	14.6	256	357	0.0539	0.0027	0.1045	0.0051	0.0143	0.0002	369	113	101	5	91.3	1.3
L1-7	29.3	533	545	0.0483	0.0018	0.0950	0.0037	0.0143	0.0002	122	89	92.2	3.4	91.8	1.1
L1-8	24.3	395	643	0.0469	0.0020	0.0939	0.0040	0.0147	0.0002	55.7	87.0	91.1	3.7	93.9	1.1
L1-9	30.6	558	579	0.0477	0.0023	0.0956	0.0047	0.0146	0.0002	83.4	111.1	92.7	4.3	93.4	1.1
L1-10	31.4	497	778	0.0462	0.0017	0.0948	0.0038	0.0148	0.0002	5.66	88.9	91.9	3.5	94.9	1.0
L1-11	30.4	557	567	0.0497	0.0023	0.0980	0.0045	0.0144	0.0002	183	107	94.9	4.1	92.1	1.0
L1-12	33.2	539	804	0.0468	0.0019	0.0928	0.0036	0.0145	0.0002	39.0	92.6	90.1	3.4	92.9	1.0
L1-13	24.9	407	609	0.0469	0.0022	0.0941	0.0043	0.0147	0.0002	55.7	98.1	91.4	4.0	94.0	1.1
L1-14	43.8	784	902	0.0469	0.0017	0.1008	0.0039	0.0156	0.0002	42.7	85.2	97.5	3.6	99.6	1.0
L1-15	26.9	495	541	0.0516	0.0019	0.1010	0.0039	0.0143	0.0001	333	85	97.7	3.6	91.3	0.9
L1-16	19.0	275	364	0.0499	0.0028	0.1116	0.0058	0.0165	0.0002	191	132	107	5	105	1
L1-17	28.3	542	557	0.0484	0.0024	0.0927	0.0045	0.0140	0.0001	120	115	90.0	4.1	89.9	0.9
L1-18	24.9	480	529	0.0508	0.0020	0.0995	0.0040	0.0144	0.0002	232	62	96.3	3.7	92.1	1.1

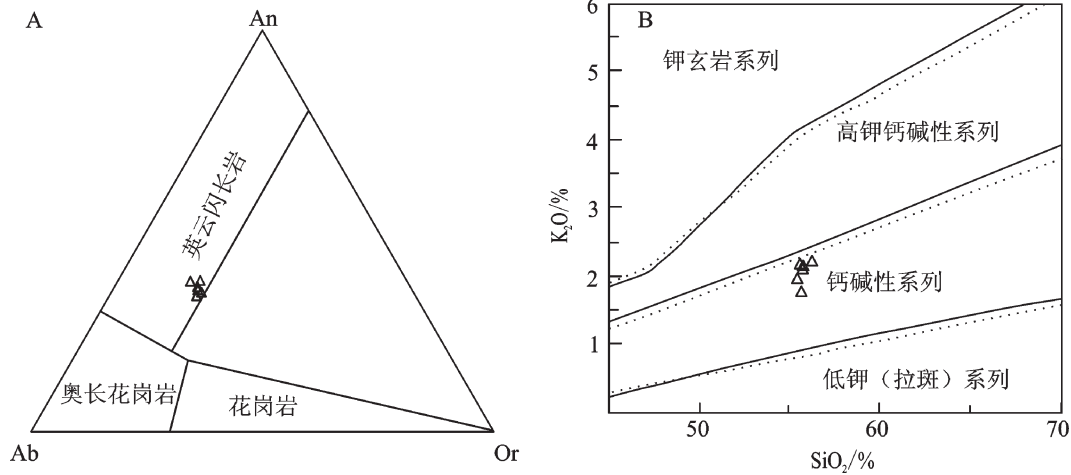


图4 朗县岩体 An-Ab-Or 图解(A)和 SiO₂-K₂O 图解(B)
(图a据文献[24],图b据文献[25])

Fig.4 SiO₂-(Na₂O+K₂O) (A) and SiO₂- K₂O (B) diagram for Langxian intrusion

该类岩石表现出高镁、富钠特征。

(2) 痕量元素

从表2、图5-a 中可以看出,朗县英云闪长岩稀土元素的球粒陨石标准化曲线显示以富含轻稀土元素(LREE)、贫重稀土元素(HREE),具有不显铈异常为特征。稀土元素总量(ΣREE)较低,为 $121.6 \times 10^{-6} \sim 131.2 \times 10^{-6}$, $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 比值变化于 2.82~2.92, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 介于 6.95~7.44, δEu 值为 0.82~

0.91,表明斜长石结晶分异程度较低。所有样品的 Sm/Nd 比值介于 0.21~0.22,高于上地壳(0.17),表明岩浆源区相对较深。

在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上(图5-A),来自朗县英云闪长岩体的几乎所有样品均富含大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba 和放射性生热元素 Th、Pb、U、K 等,亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf(Ti)等非活动性元素,明显不同于 MORB 和 OIB,而具有岛

表2 朗县岩体主量元素(%),微量元素(10^{-6})分析数据
Table 2 Major and trace elements analyses for Langxian

apophysis						
样品号	LX01	LX02	LX03	LX04	LL09	LL10
SiO ₂	55.79	55.35	55.19	55.23	56.88	56.39
Al ₂ O ₃	16.96	17.16	17.23	17.11	16.59	16.88
Fe ₂ O ₃	2.61	3.39	3.4	3.51	4.68	4.63
FeO	5.38	4.9	4.86	4.68	3.42	3.8
CaO	6.98	7.04	7.22	7.14	6.74	6.76
MgO	4.17	4.16	4.29	4.15	3.92	3.77
K ₂ O	2.22	2.11	1.78	2.18	1.98	1.97
Na ₂ O	3.64	3.71	3.71	3.82	3.54	3.46
TiO ₂	0.98	1.02	0.99	1.03	0.92	1
P ₂ O ₅	0.29	0.3	0.3	0.31	0.27	0.31
MnO	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
灼失	0.14	0.082	0.26	0.13	0.48	0.36
total	99.29	99.36	99.37	99.43	99.56	99.47
Li	11.58	12.64	10.59	12.48	16.7	13.0
Be	1.12	1.07	1.09	1.13	1.21	1.25
Sc	22.32	22.49	22.43	23.52	20.6	21.2
V	208.2	193.0	211.2	204.9	195	198
Cr	74.26	71.48	78.33	84.16	44.7	28.0
Co	26.46	26.10	27.06	29.49	25.7	27.0
Ni	33.51	32.55	36.31	35.58	31.8	24.5
Cu	91.43	104.2	95.14	101.5	76.0	82.6
Zn	88.39	90.84	90.04	89.49	87.4	88.9
Ga	19.15	19.05	19.21	19.19	19.1	19.5
Rb	63.91	48.72	41.30	62.54	69.0	59.3
Sr	534.2	545.6	555.9	540.8	465	506
Zr	60.23	48.41	56.52	58.69	68.8	61.1
Nb	5.71	5.57	5.63	5.46	5.75	6.23
Sn	1.08	1.03	0.98	1.03	1.20	1.33
Cs	2.67	1.97	1.91	2.34	7.02	2.57
Ba	396.0	430.9	372.5	402.7	316	352
La	20.16	19.07	18.90	19.89	20.2	21.5
Ce	43.12	40.69	39.48	42.44	43.1	45.7
Pr	5.29	5.09	4.96	5.19	5.22	5.53
Nd	22.51	21.63	21.01	22.34	21.6	22.9
Sm	4.94	4.83	4.51	4.88	4.76	4.98
Eu	1.31	1.35	1.32	1.34	1.23	1.25
Gd	4.66	4.45	4.27	4.46	4.57	4.72
Tb	0.70	0.66	0.65	0.68	0.65	0.68
Dy	4.09	3.84	3.77	3.89	3.82	4.05
Ho	0.81	0.77	0.75	0.76	0.75	0.80
Er	2.19	2.12	2.04	2.27	2.15	2.19
Tm	0.30	0.29	0.28	0.30	0.30	0.32
Yb	2.02	1.97	1.90	2.03	1.98	2.15
Lu	0.31	0.29	0.28	0.32	0.31	0.32
Y	23.45	22.10	21.79	20.89	21.4	22.7
Hf	1.84	1.51	1.70	1.68	2.23	1.80
Ta	0.41	0.41	0.39	0.40	0.45	0.46
Tl	0.23	0.18	0.15	0.19	0.29	0.24
Pb	11.59	11.35	10.60	11.39	12.9	11.9
Th	6.51	3.24	2.85	4.57	9.56	5.85
U	1.22	0.86	0.78	0.92	2.64	1.23
Nb/Ta	13.93	13.59	14.44	13.65	12.78	13.54
Th/Yb	3.22	1.64	1.50	2.25	4.83	2.72
Sr/Y	22.78	24.69	25.51	25.89	21.73	22.29
Mg [#]	56.61	55.42	56.26	55.60	54.08	52.19

弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩的特征;特别是Nb的亏损是板块俯冲产生岛弧环境岩浆岩的显著特征,一般地这种亏损反映了岩浆形成过程中有俯冲带流体的参与;其中的Sr正异常可能代表俯冲带沉积物在深熔后直接参与了岩浆作用,强烈的Ti负异

常则反映了岩浆中钛铁矿的结晶分离作用。

朗县英云闪长岩中的过渡族元素Cr、Co、Ni和V的含量分别为 71.48×10^{-6} ~ 86.74×10^{-6} 、 26.10×10^{-6} ~ 29.49×10^{-6} 、 33.51×10^{-6} ~ 36.31×10^{-6} 和 193.0×10^{-6} ~ 208.2×10^{-6} , V/Ni、Ni/Co和Hf/Th分别为5.76~8.09、0.91~1.27和0.23~0.59,相容元素Cr、Sc、Co和Ni的含量较低,此种低Cr-Co-Ni高V($>150 \times 10^{-6}$),高的V/Ni比值,低的Ni/Co比值和Hf/Th比值(<3)等特点,符合典型钙碱性岩石的微量元素特征^[29-30]。

(3) Sr-Nd同位素

朗县英云闪长岩体3件样品的Sr-Nd同位素样品的分析结果见表3。这些样品的Sr同位素成分依据 $t=93$ Ma计算,获得 $I_{\text{sr}}(93 \text{ Ma})=0.70424\sim 0.70427$,均在典型大洋中脊玄武岩(0.70230~0.70440)的变化范围内。它们的Nd同位素比 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512763\sim 0.512964$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于2.68~3.23,显示了朗县岩体具有 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 高且均一的同位素特征,表明英云闪长岩浆主体来源于亏损型地幔。

5 讨论和结论

5.1 雅鲁藏布江增生杂岩带90 Ma左右的岩浆作用

前已述及,基本未变形的朗县岩体侵位于强烈变形的蛇绿混杂岩中,反映雅鲁藏布江北带在岩体侵位时已转入大陆边缘增生杂岩演化阶段。朗县英云闪长岩体15个测点的锆石U-Pb年龄加权平均值为 $(92.58 \pm 0.72) \text{ Ma}$,证明冈底斯大陆边缘增生楔带存在90 Ma左右的深成岩浆活动。朗县英云闪长岩属于钙碱性系列,主量元素、微量元素分析结果也反映具有岛弧型火山岩的地球化学特征。该岩体6件样品在玄武岩的Th-Ta-Hf/3图解(图6-a)中落入D区(岛弧玄武岩区),而在Zr-Zr/Y图解(图6-b)中位于岛弧玄武岩(C区)与洋脊玄武岩区(B区)的重叠部位。笔者采用Sc、Ni、Th、Ta、La、Yb等微量元素图解对朗县岩体的构造背景作了进一步判别,所有样品在关于安山岩的Sc/Ni-La/Yb图解(图6-c)、Th-La/Yb图解(图6-b)和Th/Yb-La/Yb图解(图6-c),均落入大陆边缘弧或其附近。考虑到该岩体侵位于蛇绿混杂岩中以及印度/亚洲大陆于晚白垩世/古近纪之交碰撞,它很可能产生于未碰撞的增生楔环境,蛇绿岩北带在90 Ma左右很可能转化为增生岩浆弧环境。

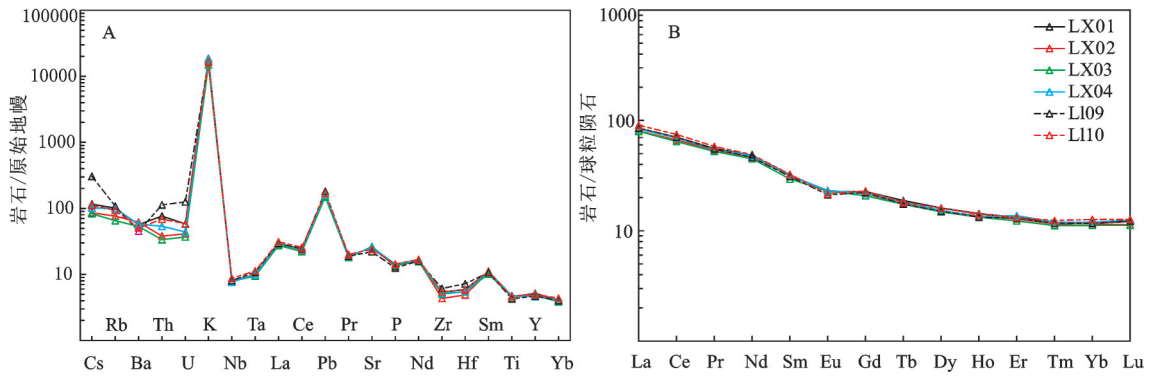


图5 朗县英云闪长岩株微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图(A)和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(B)
原始地幔标准化数据, 球粒陨石标准化数据(标准化数值据文献[28])

Fig.5 Primitive mantle normalized trace elements spider diagram (A) and chondrite-normalized REE patterns (B) of Langxian tonalite stock (normalized data after reference [28])

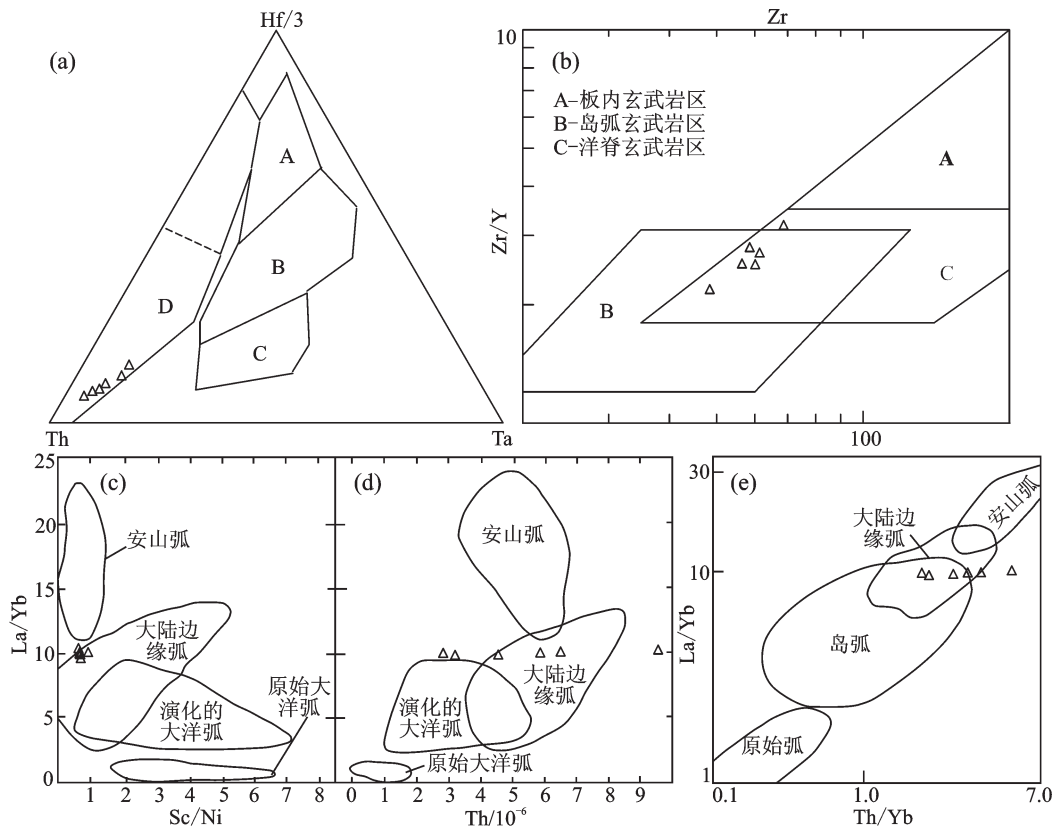


图6 朗县岩体的构造环境判别图解

(a)—Hf/3—Th—Ta图解(底图据文献[33]):A—N型MORB, B—E型MORB和板内拉斑玄武岩, C—板内碱性玄武岩, D—岛弧玄武岩; (b)—Zr—Zr/Y图解(底图据文献[34]); (c)—Sc/Ni—La/Yb图解; (d)—Th—La/Yb图解; (e)—Th/Yb—La/Yb图解(底图c、d和e据文献[35])

Fig. 6 Tectonic discrimination diagram for Langxian intrusion

(a)—Diagram of Hf/3—Th—Ta (base map after reference [33]): A—N—MORB, B—E—MORB and tholeiite intraplate basalts, C—Alkali intraplate basalt, D—Island arc basalt; (b)—Diagram of Zr—Zr/Y (base map after reference [34]); (c)—Diagram of Sc/Ni—La/Yb; (d)—Diagram of Th—La/Yb; (e)—Diagram of Th/Yb—La/Yb (base map c, d, e, after reference [35])

表3 朗县英云闪长岩株的Nd-Sr同位素成分
Table 3 Nd and Sr isotopic compositions of Langxian tonalite apophysis

样号	LX01	LX02	LX03
Rb/ 10^{-6}	63.91	48.72	41.3
Sr/ 10^{-6}	534.15	545.59	555.89
$^{87}\text{Sr}/^{84}\text{Sr}$	0.704699±2	0.704600±4	0.704558±5
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.346453	0.258571	0.215129
$I_{\text{Sr}}(93\text{Ma})$	0.70424	0.70426	0.70427
Sm/ 10^{-6}	4.94	4.83	4.51
Nd/ 10^{-6}	22.51	21.63	21.01
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512748±6	0.512738±13	0.512763±4
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.132676	0.134999	0.129775
Sample- $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(t)$	0.5126673	0.5126559	0.5126840
CHUR- $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(t)$	0.512518	0.512518	0.512518
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)(93\text{Ma})$	2.91	2.68	3.23
$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	908.3	957.0	846.6
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.74	-0.74	-0.75
$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	1480.7	1555.7	1384.5

区域上,虽然罗布莎变形地幔橄榄岩、泽当蛇绿岩中内也有多个英云闪长岩、花岗闪长岩株侵入^①,被认为形成于洋内弧环境的晚侏罗—早白垩世侵入体^[36-37];但90 Ma深成岩浆活动迄今在雅鲁藏布江增生杂岩带未见到任何的报道。从最新完成的1:5万泽当地区区域地质图上看,于泽当—罗布莎侏罗纪蛇绿混杂冲断带北3~5 km的地带,沿EW走向发育一系列超镁铁质岩岩片(被认为属于南冈底斯带),这南、北两个镁铁超镁铁岩带之间晚白垩世石英闪长岩(锆石U-Pb年龄为(89.9±0.6) Ma、花岗闪长岩深成岩浆活动非常强烈,很可能暗示着该区增生杂岩带存在90 Ma的深成岩浆活动。另外,作者近期对出露于泽当蛇绿岩旁侧、陈坝村的桑日群火山岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年,获得了(93±1.4) Ma、(91±2.2) Ma等2组加权平均值(作者未刊资料),进一步暗示该杂岩带经历过90 Ma左右的岩浆活动。在相邻的南冈底斯带,雅鲁藏布江新特提斯洋的北向消减作用造成侏罗纪—早白垩世火山—深成岩浆活动极为强烈^[10,12,15,34,35]。近年来的研究发现,南冈底斯90 Ma左右的岩浆活动也较广泛;例如,管琪等(2010,2011)报道了冈底斯南缘的米林—朗县地区存在90 Ma作用的埃达克质花岗岩、辉长岩^[40,41],近年来开展的1:5万区域地质调查工作在南冈底斯中段的谢通门、大竹卡地区发现了一系列90 Ma左右的花岗岩^{②③}。由此看来,与雅鲁

藏布江洋壳北向消减相关的岩浆活动很可能不仅仅局限于南冈底斯带,其南侧的增生楔杂岩带也经历过该时期岩浆作用。

5.2 岩石成因

朗县英云闪长岩具有的低SiO₂含量、高Mg[#]值(54~63)、富Na(Na₂O/K₂O=1.63~2.08)以及富含过渡族元素的地球化学特征,暗示着岩浆应来自岩石圈地幔。近年来的实验岩石学结果表明,在高温条件下(约1100℃)由下部陆壳变玄武质岩石脱水部分熔融可以形成低硅(SiO₂<58%)、亚铝质的熔体,但不管部分熔融程度如何,所形成的熔体均以低Mg[#]为特征(Mg[#]<42)^[42-45],从朗县英云闪长质岩石的Mg[#]值(>51)可以排除由单一深部陆壳物质熔融形成的可能性。近年来的研究也表明增生弧岩浆不能由大陆地幔楔提供^[3]。本次研究获得朗县岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于2.68~3.23,在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 中,3件样品均落在地幔趋势线上(图7),与里龙90 Ma的辉长岩较为相近,表明岩浆来源于亏损型地幔。现代弧环境中,板片流体的加入或俯冲沉积物的部分熔融可以使与俯冲有关的岩浆交代富集^[46-47]。当Th/Yb比值小于1时,为流体占主导的弧环境;当Th/Yb大于2时,表明存在大量沉积物。本文中朗县英云闪长岩的Th/Yb比值介于1.5~4.82(平均2.70),表明其源区有沉积物的贡献。由上分析可知,朗县闪长岩体既有亏损地幔物质,也有俯冲带沉积物的贡献。一般来说,幔源岩浆的Nb/Ta比值为17.5±2,而壳源岩浆的Nb/Ta比值为11~12^[40],朗县岩体的Nb/Ta比值(平均13.71)在幔源岩浆、壳源岩浆之间,可能是俯冲带沉积物参与岩浆作用造成的。

5.3 地球动力学意义

前已述及,世界上大洋俯冲—消减带的后退在形成新的增生楔的同时,于先期的增生楔上发生岛弧型岩浆活动。例如,太平洋海沟的迁移造成安第斯、爪哇—苏门答腊造山带先期增生楔上发生含铜斑岩型岩浆活动;在西昆仑带,海沟的不断后退在先期增生楔上从北向南形成3条由老变新的岛弧型钙碱性花岗岩带,年龄依次为214 Ma、210 Ma和190 Ma^[3,6-9]。雅鲁藏布江带在萨嘎之西显示出南、

①陕西省地矿局区域地质矿产研究院.中华人民共和国1:5万乃东县幅、桑日县幅、颇章幅、曲松县幅区域地质调查报告(送审稿).2011.

②陕西省地矿局区域地质矿产研究院.中华人民共和国1:5万谢通门县幅、仁钦则幅、东嘎幅、艾玛幅区域地质调查报告(送审稿).2011.

③四川省地质调查院.中华人民共和国1:5万土布加幅、奴玛幅、年木幅、联幅区域地质调查报告(送审稿).2011.

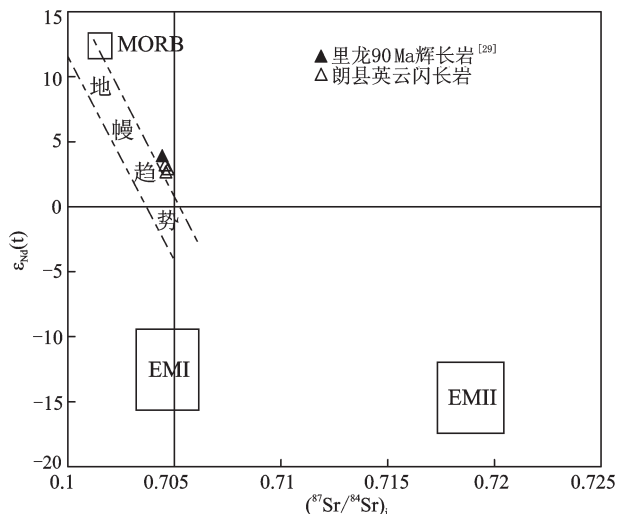


图7 朗县英云闪长岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
Fig. 7 Plot of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ for Langxian tonalite apophysis

北两支蛇绿混杂岩带夹仲巴地块的格局,以东地带以2~3条规模宏大的蛇绿混杂岩带与三叠纪裂谷背景形成的滨浅海陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造、次深海-深海复理石建造相间产出为特征,此种特征表明侏罗-白垩纪雅鲁藏布江大洋虽然发育多个消减带,但这些消减带之间仍残留着一系列三叠纪裂谷背景下形成的沉积体,洋壳的俯冲最终将它们拼合在一起。朗县增生杂岩带的岛弧型岩浆岩反映该岩带代表的消减带于92 Ma以前就已停止活动,从印度、亚洲大陆于70 Ma碰撞这一特征来看,朗县岩体很可能与该区南支蛇绿混杂岩带代表的俯冲-消减带活动有关。南支蛇绿混杂岩带变形相对较弱以及不发育中深变质岩等特征可能支持这一结论。

关于雅鲁藏布江洋壳晚白垩世俯冲方式主要有平板俯冲、洋壳熔融、洋脊俯冲等观点^[36,40,49,50]。由于平板俯冲将地幔楔挤出,很难由此产生幔源基性岩浆。至于洋壳熔融成因,由于距消减带很近,此种熔融似乎很难实现;考虑到俯冲-消减带不存在地幔楔物质,笔者赞同后一种观点,这是因为在洋脊俯冲条件下,地幔软流圈物质很可能沿洋脊部位上涌,并发生减压熔融形成玄武质岩浆,同时还提供足够热量促使俯冲-消减杂岩发生部分熔融,最后二者混合而形成英云闪长质岩浆。这种机制与南冈底斯带东部米林一带90 Ma的岩浆活动类似^[40,50]。

6 结 论

(1)通过对朗县岩体、围岩地质特征的分析以及岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年,认为该岩体形成于 $(92.58 \pm 0.72)\text{Ma}$,是侵位于雅鲁藏布江结合带朗县增生楔杂岩中的侵入体。

(2)主量元素、微量元素和Sr-Nd同位素研究表明,朗县岩体属于英云闪长岩,具有岛弧岩浆岩的地球化学特点,很可能是洋脊俯冲背景下亏损地幔熔体与增生楔杂岩熔体混合的产物。

参考文献(References):

- [1] 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1804-1816.
Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, et al. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1804-1816(in Chinese with English abstract)
- [2] 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(增刊): 22-28.
Xiao Wenjiao, Hou Quanlin, Li Jiliang, et al. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun, China[J]. Science in China(Series D), 2000, 43(S1): 134-143.
- [3] 李继亮. 增生型造山带的基本特征[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 947-951.
Li Jiliang. Basic characteristics of accretion-type orogens[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10): 947-951(in Chinese with English abstract).
- [4] 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. 地质学报, 1994, 68(1): 1-14.
Xu Zhiqin, Xu Hui Feng, Zhang Jianxin, et al. The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex in the northern Qilian mountains and its dynamics[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [5] 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 290-299.
Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Xu Hui Feng, et al. Framework of North Qilian Caledonian subduction accretionary wedge and its deformation dynamics[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(3): 290-299(in Chinese with English abstract).
- [6] Chiaradia M, Fontboté L, Beate B. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39: 204-222.
- [7] Laznicka P. Giant metallic deposits, future sources of industrial metals[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 81-152.
- [8] Marschik R, Söllner F. Early Cretaceous U-Pb zircon ages for the Copiapó plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile[J]. Mineralium Deposita, 2006, 41: 785-801.
- [9] Vallance J, Fontboté L, Chiaradia M, et al. Magmatic-dominated fluid evolution in the Jurassic Nambija gold skarn deposits

- (southeaster Ecuador)[J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44: 389–413.
- [10] 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. *地质通报*, 2011, 30(8): 1261–1274.
Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co–Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8):1261–1274(in Chinese with English abstract).
- [11] Müller D, Forrestal P. The shoshonite porphyry Cu–Au association at Bajo de la Alumbrera, Catamarca Province, Argentina[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1998, 64: 47–64.
- [12] 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据[J]. *岩石学报*, 2007: 1347–1353
Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Jianqiu, et al. Zircon U–Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdese belt, Tibet: Evidence for early Jurassic subduction of Neo–Tethyan oceanic slab[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007: 1347–1353(in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. Spatial–temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 521–533(in Chinese with English abstract)
- [14] 王行军, 王根厚, 李广栋, 等. 西藏西部札达县东北部帮果日—波库蛇绿岩带的发现及其地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1749–1761.
Wang Xingjun, Wang Genghou, Li Guangdong, et al. The discovery of Banguori–Boku ophiolite belt in northeastern Zanda County of west Tibet and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1749–1761(in Chinese with English abstract).
- [15] 陈炜, 马昌前, 宋志强, 等. 西藏冈底斯带中南部与俯冲有关的早侏罗世花岗岩闪长岩: 锆石 U–Pb 年代学及地球化学证据[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 1–11
Chen Wei, Ma Changqian, Song Zhiqiang, et al. Subduction–related early Jurassic granodiorite in Xiaodasongduo, the south of middle Gangdise in Tibet: Evidences from Zircon U–Pb geochronology and geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(6): 1–11(in Chinese with English abstract)
- [16] 张万平, 莫宣学, 朱弟成, 等. 西藏朗县蛇绿混杂岩中变辉绿岩和变玄武岩的年代学和地球化学[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(5): 538–548.
Zhang Wanping, Mo Xuanxue, Zhu Dicheng, et al. Chronology and geochemistry on gabbro and basalt of the ophiolite mélange in Lang County, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(5): 538–548(in Chinese with English abstract).
- [17] 苏学军, 段国玺, 彭兴阶, 等. 西藏乃东—米林地区雅鲁藏布江结合带的地质特征及构造演化[J]. *地质通报*, 2006, 25(6): 700–707.
Su Xuejun, Duan Guoxi, Peng Xingjie, et al. Geological characteristics and tectonic evolution of the Yarlung Zangbo junction belt in the Nêdong—Mainling area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(6): 700–707(in Chinese with English abstract).
- [18] 朱杰, 杜远生, 刘早学, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段中生代放射虫硅质岩成因及其大地构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(12): 1131–1139.
Zhu Jie, Du Yuansheng, Liu Zaixue, et al. Mesozoic radiolarian chert from the middle sector of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet and its tectonic implications[J]. *Science in China(Series D)*, 2006, 49(4): 348–357.
- [19] 李祥辉, 王尹, 徐文礼, 等. 试论西藏南部上三叠统复理石郎杰学群与涅如组[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1551–1562.
Li Xianghui, Wang Yin, Xu Wenli, et al. Constrasting the Upper Triassic flysch Languexue Group and Nieru Formation in southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10):1551–1562 (in Chinese with English abstract).
- [20] Liu Y, Hu Z, Gao S. In–situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257:34–43.
- [21] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4:1–70.
- [22] Vavra G, Gebauer D, Schmid R. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone(Southern Alps): anion microprobe (SHRIMP)study[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1996, 122:337–358.
- [23] Wu Yuanbao, Chen Daogong,, Xia Qunke, et al. In–situ trace element analyses and Pb–Pb dating of zircons in granulite from Huangtuling, Dabieshan by LA–ICP–MS[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 46(11): 1161–1170.
- [24] Le Bas M J, Le Maitre R W, treckeisen A and Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 745–750.
- [25] Maniar P D, Piccolli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1989, 101(5):635–643.
- [26] Chen F K, Hegner E, Todt W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical composition of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *Earth Science*, 2000, 88: 791–802.
- [27] Chen F K, Sibel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. *Earth Science*, 2002, 91: 469–48.
- [28] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 1989, 42: 313–345.
- [29] Taylor S R. Trace Element Abundance in Andesite II. Saipan, Bougainville and Fiji[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1969, 23 :1–26 .
- [30] Taylor S R, Kaye M. Genetic significance of Co, Cr, Ni, Sc and V content of andesites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1969, 33: 275–286.
- [31] Bruce M C, Niu Y. 2000. Evidence for Palaeozoic magmatism

- recorded in the Late Neoproterozoic Marlborough ophiolite, New England Fold Belt, central Queensland. Australian Journ. Earth Sci., 47: 1065–1076.
- [32] 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩浆杂岩的地球化学特征及形成时代[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 529–540.
- Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and zircon U–Pb ages of island–arc basic igneous complexes in the Tianshui area, West Qinling[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 529–540(in Chinese with English abstract).
- [33] Meschede M A. A method of discriminating between different types of mid–ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. Chem. Geol., 1986, 56: 207–218.
- [34] Pearce J A. Trace element characteristics of lave from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S(ed.). Andesites. Chichester: Wiley, 1982: 525–548.
- [35] Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supracrustal rocks in the southwest united states[J]. J. Geology, 1986, 94: 845–861.
- [36] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr–Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(4): 442–450.
- Wei Dongliang, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. Geochemistry and Sr–Nd isotope characteristics of tonalites in Zêtang, Tibet: New evidence for intra–Tethyan subduction[J]. Science in China(Series D), 2007, 50(6): 836–846.
- [37] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implication for continental growth and crust–mantle recycling[J]. J. Petrol., 1995, 36: 891–931.
- [38] 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 534–546
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. Late Jurassic–Early Cretaceous geodynamic setting in middle–northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 534–546(in Chinese with English abstract).
- [39] 康志强, 许继峰, 陈建林, 等. 藏南白垩纪桑日群麻木下组埃达克岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球化学, 2009, 38(4): 334–344.
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Chen Jianlin, et al. Geochemistry and origin of Cretaceous adakites in Mamuxia Formation, Sangri Group, South Tibet[J]. Geochimica, 2009, 38(4): 334–344(in Chinese with English abstract).
- [40] 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋俯冲的产物?[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2165–2179.
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, et al. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo–Tethyan ridge subduction? [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 2165–2179(in Chinese with English abstract).
- [41] 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏拉萨地块南缘晚白垩世镁铁质岩浆作用的年代学、地球化学及意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2083–2092.
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, et al. Zircon U–Pb chronology, geochemistry of the Late Cretaceous mafic magmatism in the southern Lhasa Terrane and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2083–2094(in Chinese with English abstract)
- [42] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implication for continental growth and crust–mantle recycling[J]. J. Petrol., 1995, 36: 891–931.
- [43] 段其发, 王建雄, 白云山, 等. 青海南部蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U–Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 291–299.
- Duan Qifa, Wang Jianxiong, Bai Yunshan, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating and lithochemistry of gabbro from the ophiolite in southern Qinghai Province[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 291–299(in Chinese with English abstract).
- [44] 张维, 简平. 华北北缘同阳二叠纪闪长岩–石英闪长岩–英云闪长岩套 SHRIMP 年代学[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1593–1603.
- Zhang Wei, Jian Ping. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite–quartz diorite–onalite suite in the northern margin of the North China Craton[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1593–1603(in Chinese with English abstract).
- [45] 王行军, 王根厚, 李广栋, 等. 西藏西部札达县东北部帮果日—波库蛇绿岩带的发现及其地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1749–1761.
- Wang Xingjun, Wang Genghou, Li Guangdong, et al. The discovery of Banguori–Boku ophiolite belt in northeastern Zanda County of west Tibet and its geological significance[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1749–1761(in Chinese with English abstract).
- [46] Elburg M A, van Bergen M, Hoogewerff J. Geochemical trends across an arc–continent collision zone: Magma sources and slab–wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes[J]. Indonesia Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66: 2771–2789
- [47] Guo Z, Hertogen J, Liu J, et al. Potassic magmatism in western Sichun and Yunnan provinces, SE Tibet, China: Petrological and geochemical constraints on petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 2005, 46: 33–78
- [48] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust–mantle system Chemical Geology, 1995, 120: 347–359.
- [49] Wen D R, Liu D Y, Chung S L, et al. Zircon SHRIMP U–Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. Chemical Geology, 2008, 252 (3–4): 191–201
- [50] Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, et al. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo–Tethyan mid–ocean ridge subduction?[J]. Gondwana Research, 2010, 17: 615–631