

青藏高原北羌塘盆地多彩地区 蛇绿岩地球化学特征及构造环境

李善平^{1,2} 潘 彤¹ 李永祥³ 王 磊⁴

温得银² 王树林² 常有英² 黄青华² 王钦元¹

(1.青海省地质矿产研究所 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海 西宁 810012;
2.青海省地质调查院,青海 西宁 810012;3.青海省第八矿产勘查院,青海 西宁 810001;
4.青海省第五矿产勘查院,青海 西宁 810001)

摘要:多彩蛇绿岩是通天河蛇绿混杂岩的组成部分,区域上隶属西金乌兰—金沙江缝合带北延部分。多彩蛇绿岩各岩石组分呈构造岩块、岩片产出,出露零星,面积小,但岩石组分较齐全,主要由异剥橄榄岩、单斜辉石岩、辉长岩、玄武岩、辉绿岩及硅质岩等组成,缺乏地幔橄榄岩,蛇绿岩组分均与围岩呈构造接触关系。异剥橄榄岩以富 MgO、贫 TiO₂、贫 P₂O₅ 为特征, Eu 不显异常或显弱负异常,是具有 SSZ 型蛇绿岩的重要岩石组分;辉长岩具高 TiO₂、Al₂O₃;玄武岩与辉绿岩具相似的特性,玄武岩 Th/Ta 平均为 1.78, Ta/Hf > 0.15, 而 Ta/Hf = 0.15~0.2, 与大洋板内玄武岩相似;硅质岩 Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃) 比值为 0.9, (La/Ce)_N 值为 1.81, 可能具有陆源海特性。由上述特征并结合蛇绿岩形成时代及构造环境判别图解,推测多彩蛇绿岩形成于俯冲带构造环境。

关键词:青藏高原;北羌塘盆地;蛇绿岩;西金乌兰—金沙江缝合带;俯冲带

中图分类号: P588.12*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)06-1592-15

金沙江缝合带、班公湖—怒江缝合带、雅鲁藏布江缝合带等组成青藏高原重要的板块俯冲—碰撞缝合带,近年来,随着对这三个带的深入研究,人们对青藏高原早期的构造演化认识逐渐加深^[1-3]。其中金沙江缝合带蛇绿岩的研究主要集中在缝合带的东段^[6-7],而对其向西延入治多地区及西金乌兰湖等地的研究相对较少。长期以来对金沙江缝合带的构造属性存在分歧:翟庆国^[8]认为早二叠世在盆地中部发育完整的蛇绿岩组合,并存在威尔逊旋回过程;王培生^[9]认为蛇绿岩形成于中—晚石炭世至晚三叠世岛弧环境;莫宣学等^[7]认为金沙江洋在早石炭世打开,出现了洋脊—准洋脊型玄武岩,最终关闭于晚三叠世晚期;张旗、钟大赉^[10-11]则持小洋盆的观点。前人 1:20 万区域地质调查^①在金沙江缝合带内仅确定超基性

岩和辉长岩、辉绿岩多处,并将枕状玄武岩归为晚三叠世巴塘群,而此提供了蛇绿岩研究的重要信息。笔者等对多彩、当江等地区出露蛇绿岩岩石组合的研究,将为金沙江缝合带西延至北羌塘盆地的构造属性提供重要的岩石地球化学依据。

1 地质特征

金沙江缝合带位于羌塘块体与松潘—甘孜块体之间(图 1),作为两者的分界线,大致呈北西—南东向展布。该带延入治多地区之后,由 SN 向转为 NW 向,延伸至西金乌兰湖等地。多彩蛇绿岩是笔者在进行 1:25 万区域地质调查时新厘定的非正式构造岩石地层单位,是通天河蛇绿混杂岩的组成部分,在区域上属西金乌兰—金沙江缝合带的物质组分。其分

收稿日期:2010-02-05;改回日期:2010-10-30

基金项目:青海省重大科技专项(2010-J-A1)与中国地质调查局“1:25 万治多、杂多幅区域地质调查”项目(146C003004,146C004004)资助。

作者简介:李善平,男,1974 年生,硕士,工程师,主要从事区域地质及矿产研究工作;E-mail:lishanping1952@163.com。

①青海省第二区域地质调查队 1:20 万杂多县幅、吉多幅区域地质矿产调查报告,1984。

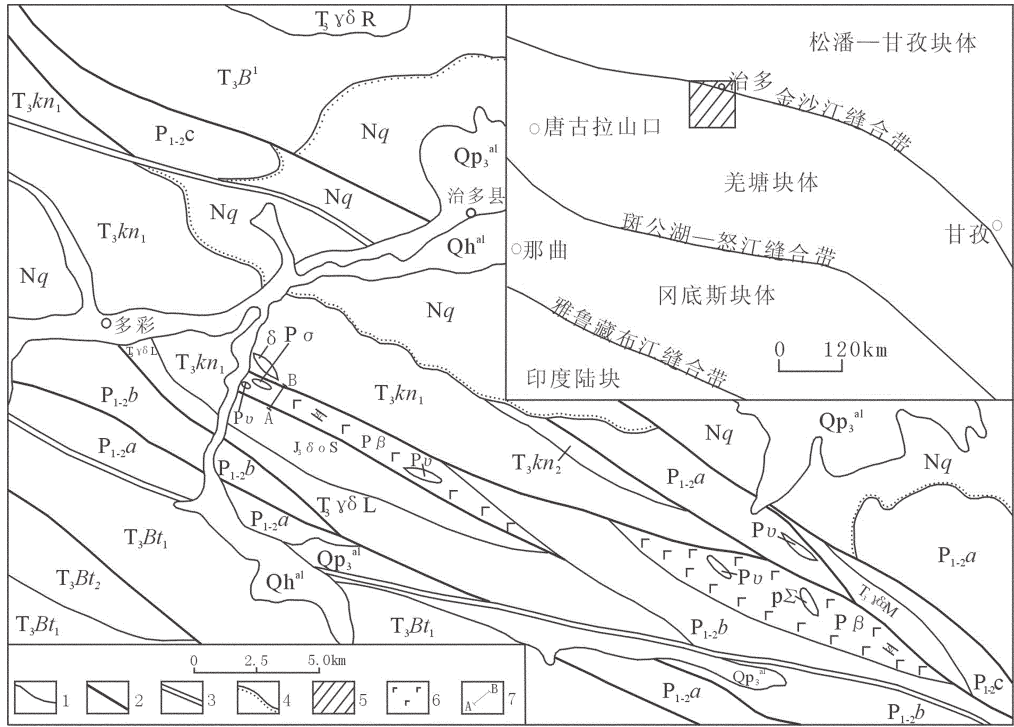


图 1 多彩地区地质略图

1—地质界线; 2—断层; 3—韧性剪切带; 4—角度不整合界线; 5—研究区位置; 6—玄武岩; 7—剖面位置; P_{1-2a}—早中二叠世碎屑岩组; P_{1-2b}—早中二叠世火山岩组; P_{1-2c}—早中二叠世碳酸盐岩组; P_v—二叠纪辉长岩; P β —二叠纪玄武岩; P Σ —二叠纪变质橄榄岩; T_v—三叠纪辉长岩; T β —三叠纪玄武岩; T Σ —三叠纪变质橄榄岩; T_{3Bt1}—晚三叠世巴塘群下碎屑岩组; T_{3Bt2}—晚三叠世巴塘群火山岩组; T_{3kn1}—晚三叠世柯南群下碎屑岩组; T_{3kn2}—晚三叠世柯南群火山岩组; T_{3B'}—晚三叠世巴颜喀拉山群; T_{3 γ δ R}—晚三叠世日勒花岗岩闪长岩; T_{3 γ δ L}—晚三叠世拉地贡玛花岗岩闪长岩; T_{3 γ δ O M}—晚三叠世绵切英云闪长岩; J_{3 δ o S}—晚侏罗世赛莫涌石英闪长岩; Nq—新近系曲果组; Qh^{al}—冲积; Qp₃^{al}—冲积

Fig.1 Geological sketch map of the Duocai area

1—Geological boundary; 2—Fault; 3— Ductile shear zone; 4—Angular unconformity; 5—Study area; 6—Basalt; 7—Profile position; P_{1-2a}—Early-middle Permian clastic rocks formation; P_{1-2b}—Early-middle Permian volcanic formation; P_{1-2c}—Early-middle Permian carbonate formation; P_v—Permian gabbro; P β —Permian basalt; P Σ —Permian ultramafic rocks; T_v—Triassic gabbro; T β —Triassic basalt; T Σ —Triassic ultramafic rocks; T_{3Bt1}—Late Triassic Batang group clastic rock formation; T_{3Bt2}—Late Triassic Batang group volcanic group; T_{3kn1}—Late Triassic Kenan group clastic rock formation; T_{3kn2}—Late Triassic Kenan group volcanic formation; T_{3B'}—Late Triassic Bayankalashan group; T_{3 γ δ R}—Late Triassic Riqin granodiorite; T_{3 γ δ L}—Late Triassic Ladigongma granodiorite; T_{3 γ δ O M}— Late Triassic Mianche tonalite rocks, J_{3 δ o S}—late Jurassic Saimoyong quartz diorite; Nq—Neogene Quguo formation; Qh^{al}—Alluvium; Qp₃^{al}—Alluvium

布在征毛涌、缅切、聂恰曲、日啊日曲、多彩、当江等地,与围岩一起均受到后期构造作用的强烈影响,蛇绿岩原始层位已完全被改造,呈不连续长条状、透镜状构造岩块产出(图 2-a),零星出露,但组分较齐全。多彩蛇绿岩岩石组合类型较为复杂,主要为蛇纹石化异剥橄榄岩、阳起石化辉石岩、绿帘石化辉长岩、强绢云母化辉长辉绿岩、阳起石化杏仁状玄武岩和硅质岩等,缺乏地幔橄榄岩。

蛇纹石化异剥橄榄岩在纳穷一带呈不连续长条状、透镜状产于多彩蛇绿岩带中,与围岩呈构造接触(图 2-b),边部具有强烈的片理化、糜棱岩化和碎裂结构,局部可见构造碎块及蛇纹岩的错动滑痕,滑动面上具滑腻感的黄绿色蜡状薄壳;阳起石化辉石岩呈透镜状产于蛇绿岩带中,透镜体边部岩石成条纹

状、眼球状斜长角闪质糜棱岩、角闪片岩,与蛇绿岩各岩块之间以构造界面接触;辉长岩、玄武岩出露普遍,构成蛇绿岩的主体,玄武岩与各蛇绿岩岩块之间均以构造界面接触,以枕状或块状玄武岩为主,枕状玄武岩直径最大可达 1.5 m (图 2-c),边缘具冷凝边、放射状裂隙,暗示枕状熔岩为海底水下喷发的产物;中细粒辉长岩是蛇绿岩带中最常见的岩石(图 2-d),构成蛇绿岩的主体,岩体或透镜体边部岩石片理化发育或具有韧性变形而成为阳起石片岩、斜长角闪片岩、条纹状眼球状斜长角闪质糜棱岩或糜棱岩化辉长岩;辉绿岩多数韧性变质变形成为条纹状、眼球状斜长角闪质糜棱岩,均呈透镜状分布,广泛发育于中细粒辉长岩、通天河蛇绿混杂岩石中;灰褐色硅质岩出露在当江一带,呈夹层、岩块产于异剥

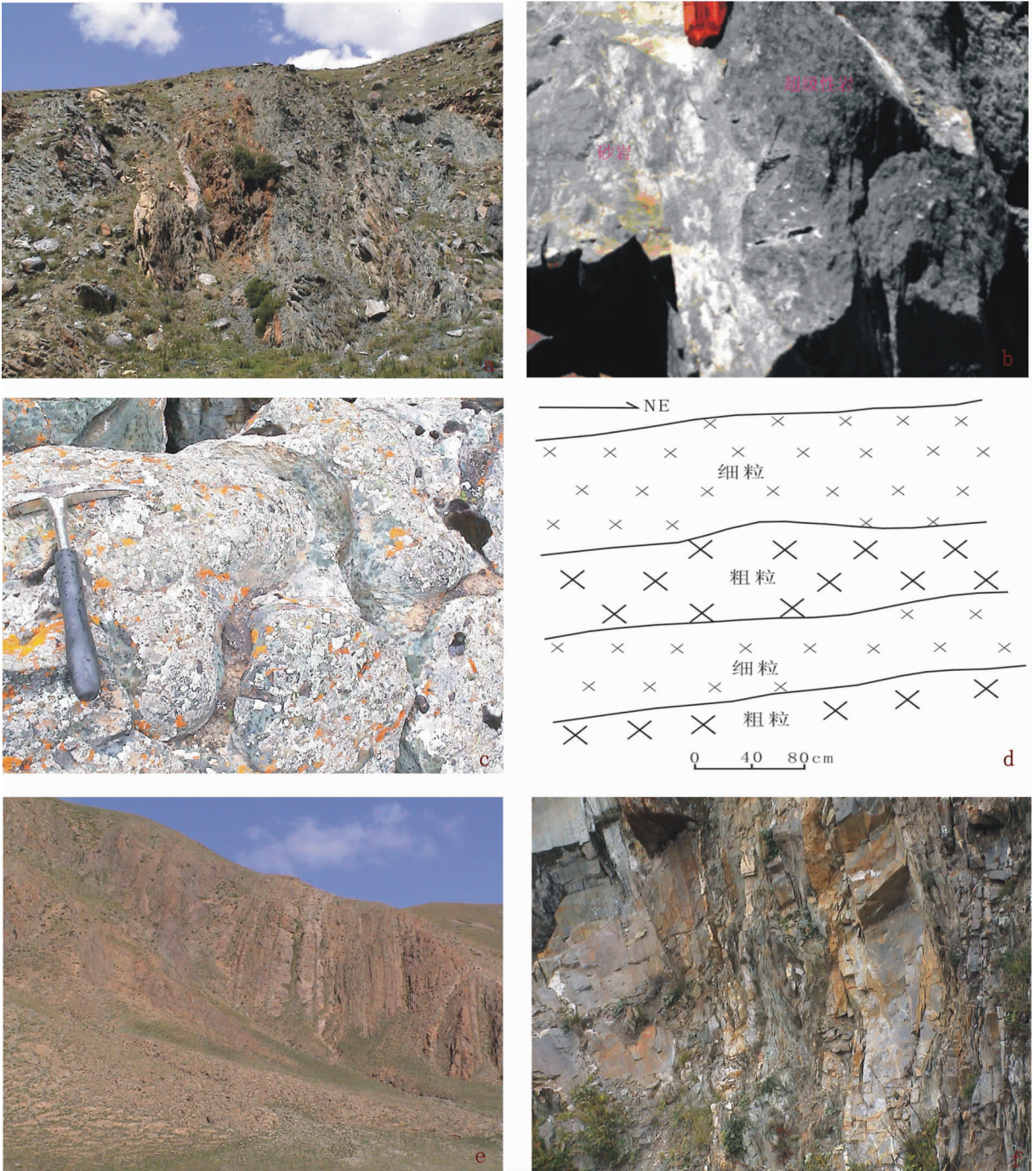


图2 多彩蛇绿岩照片及素描图

a—多彩地区蛇绿岩；b—砂岩与蛇绿岩中超基性岩块片理化构造界面(据Ⅷ003P2剖面)；c—蛇绿岩中玄武岩枕状构造(Ⅷ003P2剖面)；d—蛇绿岩中层状辉长岩(据Ⅷ003P2剖面)；e—当江一带多彩蛇绿混杂岩中放射虫硅质岩构造岩块；f—聂恰曲沟口多彩蛇绿混杂岩中砂岩变形特征

Fig.2 Photographs and sketch of ophiolite in Duocai area

a—Ophiolite in Duocai area；b—Schistosity structure interface of ultrabasic rock in sandstone and ophiolite (after Ⅷ 003P2 profile)；c—Pillow structure of basalt in ophiolite (after Ⅷ 003P2 profile)；d—Layered gabbro in ophiolite (after Ⅷ 003P2 profile)；e—R-5nguan-xue,1998):ronment discrimination diagrams of ophiolite of the Duocai area radiolarian chert structure rock of ophiolite in Dangjiang—Duocai area；f—Deformation characteristics of sandstone of Duocai ophiolite in Nieqia River mouth

橄榄岩、枕状玄武岩残块及中-薄层灰岩中(图 2-e),局部硅质岩出露厚可达 1.8 m,面积约 150 m²。而分布于金沙江蛇绿岩带共卡道班附近的紫红色放射虫硅质岩岩块纯度高,不含粘土矿物和陆源碎屑,是在强烈非补偿的洋盆环境中长期缓慢沉积而成^[4]。各蛇绿岩岩块之间均以构造界面关系接触,并与古一中元古代宁多群、多彩蛇绿混杂岩中的当江荣火山岩、龙切杂砂岩(图 2-f)混杂产出。各组分均经受了不同程度的变质变形作用,尤以异剥橄榄岩变质变形程度最为强烈,且其中广泛发育韧性剪切带,岩石以糜棱岩化或糜棱岩形式产出。

蛇绿岩在多彩—当江一带出露较好,呈构造肢解的残块赋存于强烈剪切的杂砂岩、火山岩及灰岩组成的基质中,层序不完整,以构造岩块产出,呈近北西—南东向展布。北侧与三叠纪查涌蛇绿混杂岩构造接触(断层或强片理化带),南侧与晚侏罗世侵入岩呈断层接触(图 3),剖面中二云母构造片岩野外露头较宽,达 100.05 m,其次灰绿色玄武岩为 41.52 m,其中异剥橄榄岩是形成于俯冲带环境蛇绿岩中堆晶岩底部的重要岩石组分,可认为是壳-幔过渡带的产物。

2 岩石组合及其特征

蛇绿岩岩石组合主要为蛇纹石化异剥橄榄岩、阳起石化辉石岩、绿帘石化辉长岩、强绢云母化辉长辉绿岩、阳起石化杏仁状玄武岩和硅质岩,缺乏地幔

橄榄岩。

(1)堆晶岩类

蛇纹石化异剥橄榄岩:暗绿色-墨绿色,蚀变纤维变晶结构,块状构造,矿物成分为橄榄石及其假象(80%~92%),含钛普通辉石及其假象(8%~18%)、磁铁矿等金属矿物(1%)。岩石蚀变强烈,其中橄榄石绝大多数被蛇纹石或蛇纹石及滑石集合体取代。部分沿橄榄石的不规则裂隙发育蛇纹石化,并析出他形粒状磁铁矿。普通辉石被蛇纹石和纤闪石交代,呈交代残留状出现在橄榄石假象之间,在普通辉石的大晶体中包含着橄榄石假象显示包橄结构的特征。金属矿物呈自形粒状,0.012~0.22 mm,呈浸染状分布在岩石中。

阳起石化辉石岩:灰绿色,粒状变晶结构,块状构造,部分呈片状构造。矿物成分为:辉石及其假象 84%~90%,斜长石及假象 9%~15%,不透明金属矿物 1%。辉石被阳起石全部交代,阳起石呈浅绿色,呈粒状或柱状变晶,部分阳起石排列具定向性,并显示 S-C 组构特征。斜长石被绿帘石所交代,绿帘石集合体呈柱状或粒状轮廓,并具波状消光。

绿帘石化辉长岩:灰绿色、深灰色,辉长结构,块状构造,含斜长石 43%~52%、普通角闪石 1%~3%、辉石及其假象 47%~54%等矿物,副矿物主要有磁铁矿、锆石、榍石等。辉石多被绿色角闪石或阳起石所替代,斜长石部分蚀变为绢云母、黝帘石、次闪石、绿泥石等。岩石普遍糜棱岩化,糜棱面理走向 NW-

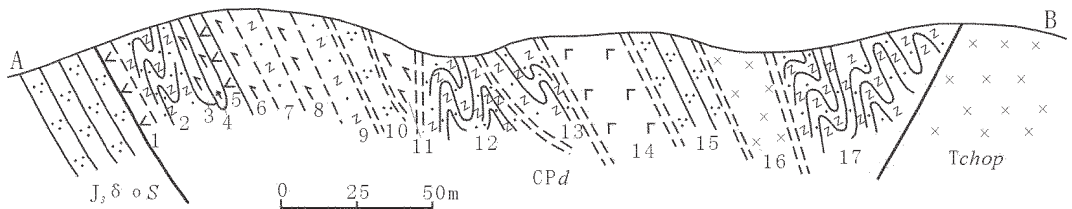


图 3 青海省治多县多彩乡地区构造剖面图(VIII003P2)

- 1—灰绿色眼球状斜长角闪质糜棱岩;2—灰色构造片岩夹眼球状斜长角闪质糜棱岩;3—蛇纹石化异剥橄榄岩;
- 4—蛇纹石化橄榄辉石岩;5—眼球状斜长角闪岩质糜棱岩;6—辉石岩;7—灰色二云母构造片岩;8—阳起石化辉长岩夹玄武岩;9—细粒二云母构造片岩;10—灰白色石英岩;11—中粒辉石岩;12—二云母构造片岩;13—黑云斜长片麻岩;14—灰绿色玄武岩;15—石英岩;16—阳起石化辉长辉绿岩;17—二云母构造片岩;Jδ o S—石英闪长岩;CPd—多彩蛇绿岩;Tchop—查涌蛇绿岩(角闪石化辉长岩)

Fig.3 Structural profiles of Duocai area of Zhiduo County in Qinghai Province

- 1—Grayish green augen amphibolite mylonite; 2—Gray schist intercalated with structure augen schist amphibolite mylonite;
- 3—Serpentinized wehrlite; 4—Serpentinized peridotite pyroxenite; 5—Eyeball-shaped plagioclase amphibolite mylonite;
- 6—Pyroxenite; 7—Tectonic gray two-mica schist; 8—Actinolitized gabbro intercalated with basalt; 9—Fine-grained two-mica schist structure; 10—White quartzite; 11—Medium-grained pyroxenite; 12—Tectonic two-mica schist; 13—Biotite-plagioclase gneiss; 14—Grayish green basalt; 15—Quartzite; 16—Actinolitized gabbro-d diabase; 17—Tectonic two-mica schist;
- Jδ o S—Quartz diorite; CPd—Ophiolite of Duocai area; Tchop—Ophiolite of Chayong area (hornblendized gabbro)

SE,局部近东西向。

(2)辉绿岩脉

灰绿色、深灰色,变余辉绿结构,呈片状构造、条纹状构造,部分为块状构造,由辉石 45%~53%、拉长石 46%~54%、黑云母 1%及少量磷灰石、榍石等组成,矿物蚀变强烈,辉石基本上被角闪石或阳起石交代,阳起石集合体呈充填状分布在柱状斜长石构成的间隙中,显示辉绿结构特征。透镜体边部岩石糜棱岩化强烈,岩石发育强烈的糜棱结构,条纹状眼球状构造,10%~20%的碎斑为角闪石集合体,为辉石矿物的蚀变产物,呈边界光滑的眼球状,两端分布有重结晶角闪石组成的结晶尾而构成“σ”型碎斑系,部分眼球被基质中的碎粒化普通角闪石连接呈“串珠”状定向排列。

(3)杏仁状玄武岩

灰绿色,斑状结构,基质具填间结构,块状构造,杏仁状构造,斑晶含量 5%,其中斜长石 3%,辉石假象 2%±,基质 73%~80%,由斜长石 25%~30%;绿泥石 6%,粒状辉石假象 10%;阳起石 30%、榍石 1%组成。岩石蚀变强烈,阳起石化、绿泥石化、绿帘石化发育。

(4)硅质岩

青灰色、灰紫色、薄-中层状,隐晶质-显微粒状结构,矿物粒径 0.09~0.16mm,矿物成分主要由石英和纤维状玉髓 98%、有机质和其他杂质 2%、少量碳酸盐矿物组成。岩石中含放射虫化石遗迹,结构构造由于重结晶作用已不存在。岩石受后期的变质重结

晶作用影响而形成灰白色石英岩。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素特征

多彩蛇绿岩组合中各类岩石的主量元素分析结果见表 1,其中:

玄武岩的 SiO₂ 含量为 46.48%~50.55%, 平均 48.93%;TiO₂ 为 0.76%~1.55%,平均 1.19%,略低于或接近洋脊玄武岩 TiO₂ 的平均值(1.5%)^[13],以低 Ti 为特征;K₂O/Na₂O 值为 0.08~0.33,平均 0.19,比值相对较低;固结指数 SI 值 31.07~49.20,平均为 39.12;MgO/FeO 平均值为 1.19。在硅—碱图(图 4)及 AFM 图解(图 5)中玄武岩具有拉斑玄武岩的特性。而在云南德钦县境内白马雪山、共卡一带出露蛇绿岩中玄武岩的 SiO₂ 为 51.04%~55.17%, 平均为 53.63%;TiO₂ 为 1.01%~1.87%, 平均为 1.44%;MgO 含量为 4.05%~8.76%,具 MORB 玄武岩特征^[14],与本区玄武岩含量相似。

辉绿岩 SiO₂ 含量为 51.32%~54.86%, 平均 52.33%;TiO₂ 为 1.01%~1.49%, 平均 1.34%;K₂O/Na₂O、MgO/FeO 平均值分别为 0.25、0.81;SI 值 26.97~36.84,平均为 31.57,总体化学成分特征与玄武岩近似。在硅—碱图及 AFM 图解中投点显示具有拉斑玄武岩的特性(图 4、5)。辉绿岩具中等的 TiO₂(0.89%~1.79%)和 MgO(3.91%~8.35%)含量,与 MORB 类似^[14]。

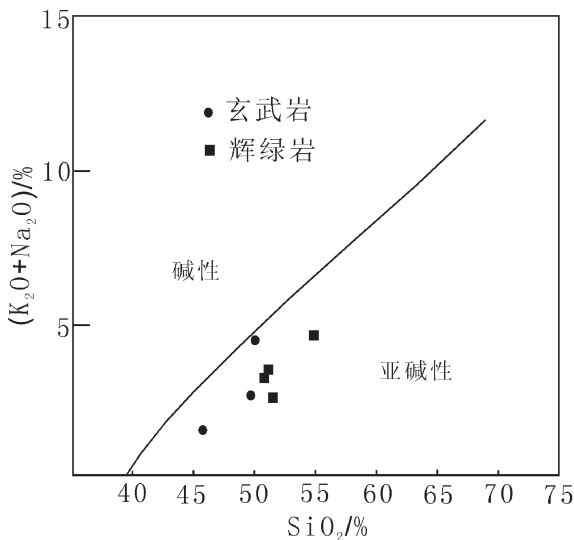


图 4 SiO₂—(K₂O+Na₂O)图解
Fig.4 SiO₂—K₂O+Na₂O diagram

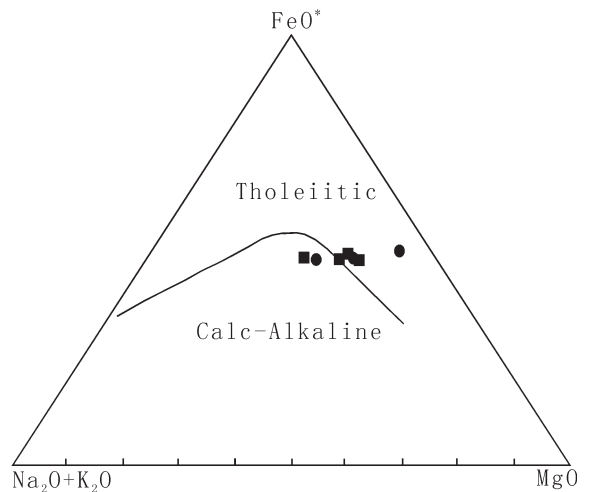


图 5 FeO*—(K₂O+Na₂O)—MgO 图解
Fig.5 FeO*—(K₂O+Na₂O)—MgO diagram

表 1 多彩蛇绿岩主量元素(%)分析结果

Table 1 Analytical results of major elements of ophiolite suite in Duocai area

样品编号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O+	LOS	Σ
3P2GS18-2	硅质岩	93.68	0.18	2.24	0.09	0.67	0.02	0.91	0.82	0.34	0.48	0.03	0.45	0.38	100.29
3GS941-2	玄武岩	49.56	0.75	13.26	1.42	4.68	0.13	6.20	14.81	3.32	1.09	0.13	2.70	1.65	99.70
3GS346-3	玄武岩	49.65	1.55	13.42	4.11	8.38	0.21	6.90	9.80	2.61	0.21	0.14	2.80	0.06	99.84
3P2GS34-1	玄武岩	45.66	1.23	12.99	2.59	8.83	0.17	12.57	10.81	1.33	0.23	0.12	1.71	1.15	99.39
3P2GS17-1	辉长辉绿岩	50.65	1.00	14.50	3.84	6.58	0.18	7.91	9.12	2.15	0.99	0.12	1.65	1.02	99.71
3P2GS26-1	辉绿岩	53.95	1.47	14.32	1.91	8.71	0.16	5.67	6.88	4.46	0.27	0.19	0.35	1.21	99.55
3P2GS31-1	辉绿岩	51.15	1.44	14.78	2.52	8.57	0.20	6.42	9.76	1.98	0.60	0.15	1.20	1.44	100.21
3P2GS36-1	辉绿岩	50.57	1.37	14.52	1.40	10.12	0.20	6.58	8.44	3.01	0.47	0.12	1.71	1.12	99.63
3GS694-1	辉长岩	49.00	2.87	13.85	2.31	11.02	0.21	4.96	10.57	2.88	0.30	0.18	1.53	0.10	99.78
3GS345-3	辉长岩	47.14	0.95	14.40	1.93	7.27	0.18	8.19	12.45	1.98	0.29	0.09	3.07	1.88	99.82
3GS346-1	辉长岩	46.77	1.52	15.54	2.80	7.00	0.18	6.78	12.55	2.34	0.40	0.31	3.15	0.42	99.76
3GS346-2	辉长岩	50.98	1.94	13.47	3.32	8.62	0.22	6.19	9.23	2.71	0.19	0.23	2.68	0.06	99.84
3P2GS23-1	辉长岩	47.70	0.97	11.83	2.47	7.99	0.17	14.48	9.66	1.66	0.29	0.02	1.21	1.15	99.6
3GS941-1	辉石岩	44.13	0.85	17.61	3.24	5.21	0.14	11.21	9.08	1.69	0.91	0.07	4.17	1.25	99.56
3P2GS18-1	异剥橄榄岩	41.52	0.54	7.92	3.22	6.47	0.14	23.04	7.71	0.05	0.16	0.06	5.36	3.53	99.72
3GS941b	异剥橄榄岩	40.78	0.59	10.76	1.86	7.76	0.14	23.35	6.49	0.09	0.14	0.07	5.69	2.52	100.24
3GS941a	异剥橄榄岩	38.60	0.57	9.58	4.72	6.34	0.16	26.26	3.83	0.07	0.25	0.06	8.17	1.54	100.15

注:样品由武汉综合岩矿测试中心测试,分析方法:XRF,单位为%。

辉长岩类中 SiO₂ 含量 47.08%~51.09%, 平均 48.78%; TiO₂(0.97%~2.88%, 平均 1.66%) 含量相对较高, Al₂O₃(12.02%~15.64%, 平均 13.95%) 含量略高, SI 值为 23.10~53.85, 平均为 36.63; K₂O/Na₂O、MgO/FeO 平均值分别为 0.13、1.02。而位于金沙江缝合带共卡一带辉长岩 SiO₂ 含量为 49.07%~51.43%, 平均 49.77%, Al₂O₃ 含量(12.47%~19.28%, 平均 16.90%) 略高^[14], 与研究区辉长岩含量相似。

异剥橄榄岩的 SiO₂ 为 39.14%~43.16%, 平均 41.34%, TiO₂ 含量相对较低(0.56%~0.60%), MgO/FeO 为 3.01~4.14, 平均 3.57; K₂O/Na₂O 为 1.56~3.57, 平均 2.78; SI 值较为接近, 平均为 70.02; Mg[#] 值为 0.711~0.713, 平均 0.712, 为堆晶岩底部的超基性岩。而金沙江缝合带书松一带堆晶橄榄岩中 SiO₂ 为 46.96%~49.73%, 平均 48.35%; TiO₂ 含量(0.20%~0.42%) 较低; Mg[#] 值为 0.78~0.81, 平均 0.80^[14], 与研究区相比堆晶橄榄岩岩石化学含量稍高。

辉石岩的 SiO₂ 为 44.98%、TiO₂ 为 0.86%、K₂O/Na₂O 值为 0.54、MgO/FeO 值为 2.15、Al₂O₃(17.91%) 含量相对较高。而位于金沙江缝合带云南境内吉义

独一带辉石岩 SiO₂ 为 52.43%、Al₂O₃ 为 5.16%、TiO₂ 为 0.45%^[14], 除 SiO₂ 含量相对较高外, 其余均比研究区辉石岩含量略低。

硅质岩 SiO₂(93.76%) 含量较高, (FeO+MgO) 为 1.58%, K₂O/Na₂O 值为 1.41, Al₂O₃ 含量(2.24%) 较低。Mn 在成岩过程中具有一定的活动性, 对微量元素指标带来较大的影响, 用 Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃) 指标更为适宜。对于在洋中脊环境下发育的热水成因硅质岩, 其值常小于 0.4, 而大洋盆地内硅质岩的该比值通常为 0.4~0.7, 大陆边缘硅质岩中可高达 0.5~0.9^[15]。研究区硅质岩 Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃) 比值为 0.96, 表明硅质岩具有大陆边缘的特性。而处于同一带内扎河北东部邦巴塘曲卡一带的硅质岩中 SiO₂ 含量为 71.56%~88.24%, Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃) 比值为 0.65~0.95, 平均为 0.77, 形成于大陆边缘的洋盆中^[16], 与研究区硅质岩指示的环境相似。

3.2 稀土元素特征

多彩蛇绿岩组合中各类岩石样品的稀土元素分析结果见表 2。

玄武岩: ΣREE=46.41×10⁻⁶~50.77×10⁻⁶, LREE/

表 2 多彩蛇绿岩稀土元素(10^{-6})分析结果Table 2 Analytical results of REE elements(10^{-6}) of ophiolite suite in Duocai area

样品编号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
3P ₂ XT18-2	硅质岩	8.03	11.59	2.03	6.07	1.27	0.13	0.99	0.16	0.94	0.19	0.55
3XT941-2	玄武岩	6.60	15.34	2.43	9.77	2.83	0.89	3.11	0.57	3.60	0.76	2.19
3XT346-3	玄武岩	3.20	10.08	1.74	9.31	2.88	1.22	4.51	0.85	5.47	1.13	3.28
3P ₂ XT34-1	玄武岩	4.77	11.84	2.05	10.07	3.23	1.17	3.76	0.65	3.87	0.78	1.97
3P ₂ XT17-1	辉长辉绿岩	5.85	12.00	1.78	8.06	2.73	1.01	3.44	0.67	3.90	0.83	2.28
3P ₂ XT26-1	辉绿岩	14.24	27.28	4.01	17.07	5.02	1.65	6.60	1.08	7.63	1.59	4.56
3P ₂ XT31-1	辉绿岩	8.43	17.34	2.60	11.82	3.57	1.22	4.68	0.83	5.49	1.13	3.18
3P ₂ XT36-1	辉绿岩	7.66	18.53	2.67	11.68	3.71	1.35	5.28	0.95	6.12	1.31	3.71
3XT694-1	辉长岩	11.00	25.18	3.96	18.18	5.24	1.92	6.15	1.02	6.18	1.17	3.06
3XT345-3	辉长岩	2.80	6.41	1.08	5.50	2.07	0.92	3.00	0.56	3.73	0.77	2.22
3XT346-1	辉长岩	7.37	16.50	2.61	11.82	3.27	1.43	3.57	0.60	3.50	0.71	1.86
3XT346-2	辉长岩	7.38	19.17	3.25	15.28	4.90	1.79	6.41	1.10	7.10	1.53	4.14
3P ₂ XT23-1	辉长岩	3.45	8.50	1.54	7.27	2.35	0.99	3.01	0.51	3.06	0.68	1.82
3XT941-1	辉石岩	2.33	7.11	1.19	5.45	1.98	0.84	2.36	0.49	3.44	0.68	1.94
3P ₂ XT18-1	异剥橄榄岩	2.31	4.70	0.85	3.94	1.38	0.45	1.70	0.29	1.83	0.36	0.96
3XT941b	异剥橄榄岩	1.58	4.11	0.68	3.42	1.28	0.51	1.52	0.29	1.98	0.43	1.27
3XT941a	异剥橄榄岩	1.65	4.45	0.76	3.62	1.27	0.49	1.50	0.30	2.07	0.44	1.34
样品编号	岩性	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Ce) _N	dEu
3P ₂ XT18-2	硅质岩	0.09	0.61	0.10	4.03	36.78	8.02	8.88	3.98	1.31	1.81	0.34
3XT941-2	玄武岩	0.33	2.04	0.31	19.85	70.62	2.93	2.18	1.47	1.23	1.12	0.91
3XT346-3	玄武岩	0.52	3.13	0.47	28.93	76.72	1.47	0.69	0.70	1.16	0.83	1.03
3P ₂ XT34-1	玄武岩	0.29	1.71	0.25	17.45	63.86	2.49	1.88	0.93	1.77	1.05	1.02
3P ₂ XT17-1	辉长辉绿岩	0.35	2.23	0.33	18.84	64.30	2.24	1.77	1.35	1.24	1.27	1.01
3P ₂ XT26-1	辉绿岩	0.72	4.45	0.65	35.14	131.69	2.54	2.16	1.78	1.20	1.36	0.88
3P ₂ XT31-1	辉绿岩	0.51	3.10	0.45	27.70	92.05	2.32	1.83	1.49	1.22	1.27	0.91
3P ₂ XT36-1	辉绿岩	0.58	3.64	0.54	31.71	99.44	2.06	1.42	1.30	1.17	1.08	0.93
3XT694-1	辉长岩	0.48	2.89	0.45	26.84	113.72	3.06	2.57	1.32	1.72	1.14	1.03
3XT345-3	辉长岩	0.35	2.04	0.31	19.10	50.86	1.45	0.93	0.85	1.19	1.14	1.13
3XT346-1	辉长岩	0.28	1.65	0.25	19.00	74.42	3.46	3.01	1.42	1.75	1.16	1.27
3XT346-2	辉长岩	0.67	4.07	0.61	35.49	112.89	2.02	1.22	0.95	1.27	1.00	0.98
3P ₂ XT23-1	辉长岩	0.28	1.74	0.25	14.93	50.38	2.12	1.34	0.92	1.40	1.06	1.14
3XT941-1	辉石岩	0.32	1.98	0.34	16.46	46.91	1.64	0.79	0.74	0.96	0.85	1.19
3P ₂ XT18-1	异剥橄榄岩	0.15	0.95	0.14	7.71	27.72	2.14	1.64	1.05	1.44	1.28	0.90
3XT941b	异剥橄榄岩	0.20	1.29	0.21	11.80	30.57	1.61	0.83	0.78	0.95	1.00	1.12
3XT941a	异剥橄榄岩	0.21	1.26	0.21	10.89	30.46	1.67	0.88	0.82	0.96	0.97	1.08

注:样品由武汉综合岩矿测试中心测试,分析方法为 ICP-MS,元素含量单位为 10^{-6} 。

HREE=1.47~2.93, $(La/Sm)_N$ 为 0.70~1.47, 平均 1.03, 显示轻重稀土分馏不甚明显; $\delta Eu=0.91\sim 1.03$, 平均 0.99, 无铕异常, 稀土配分曲线为近平坦型(图 6-a)。玄武岩中 La 平均含量小于 Nd, 尤其在氧含量较低的洋脊型拉斑玄武岩中 La 的含量比 Nd 要低得多^[7]。研究区玄武岩 $La=3.20\times 10^{-6}\sim 6.60\times 10^{-6}$, 平均为 4.86×10^{-6} , $Nd=9.31\times 10^{-6}\sim 10.07\times 10^{-6}$, 平均 9.72×10^{-6} ; La 显著小于 Nd, 暗示具有洋脊型拉斑玄武岩的特性。而在云南德钦县境内白马雪山、共卡一带出露蛇绿岩中玄武岩 LREE 略富集型 $(La_N/Yb_N)=1.1\sim 1.9$, $La=5.68\times 10^{-6}\sim 10.30\times 10^{-6}$, $Nd=7.73\times 10^{-6}\sim 13.90\times 10^{-6}$, La 含量小于 Nd^[4], 与研究区玄武岩中的元素含量相似。

辉绿岩: 稀土总量 $\Sigma REE=45.46\times 10^{-6}\sim 96.55\times 10^{-6}$, $LREE/HREE=2.06\sim 2.54$, 变化范围较小; $(La/Yb)_N$ 为 1.42~2.16, 平均 1.79; $(La/Sm)_N$ 为 1.30~1.78, 平均 1.48; 显示轻稀土弱富集性特征, $\delta Eu=0.91\sim 1.01$, 平均 0.93, 铕呈弱负异常或不显异常, 稀土配

分模式曲线为略显右倾的平滑曲线(图 6-b)。

辉长岩: ΣREE 介于 $31.76\times 10^{-6}\sim 81.88\times 10^{-6}$, 平均 57.38×10^{-6} , $LREE/HREE$ 为 1.45~3.06, $(La/Sm)_N$ 为 0.85~1.42, 平均 1.09; $(Gd/Yb)_N$ 为 1.19~1.75, 平均 1.46, 而 $(La/Yb)_N$ 为 0.93~3.01, 平均 1.81; 表明轻重稀土具初步分馏, 呈重稀土略显富集的特征。 $\delta Eu=0.98\sim 1.27$, 平均 1.11, 显示铕呈无异常或弱正异常。岩石稀土配分模式曲线为近平坦型或略向右倾斜(图 6-c), 而共卡一带辉长岩的 REE 分布为 LREE 略亏损至 LREE 富集型 $(La_N/Yb_N)=0.9\sim 2.5$ ^[4]。

辉石岩: ΣREE 为 30.45×10^{-6} , $LREE/HREE$ 为 1.64, $(La/Sm)_N$ 为 0.74, $(La/Yb)_N$ 为 0.79, 表明重稀土略显富集型, $\delta Eu=1.19$, 呈无异常或弱正异常, 稀土配分模式曲线为近平坦型(图 6-d)。

异剥橄榄岩: ΣREE 为 $18.77\times 10^{-6}\sim 30.45\times 10^{-6}$, $LREE/HREE$ 值为 1.61~2.14; $(La/Sm)_N$ 为 0.74~1.05, 平均 1.04; $(Gd/Yb)_N$ 为 0.95~1.44, 平均 1.08; 轻

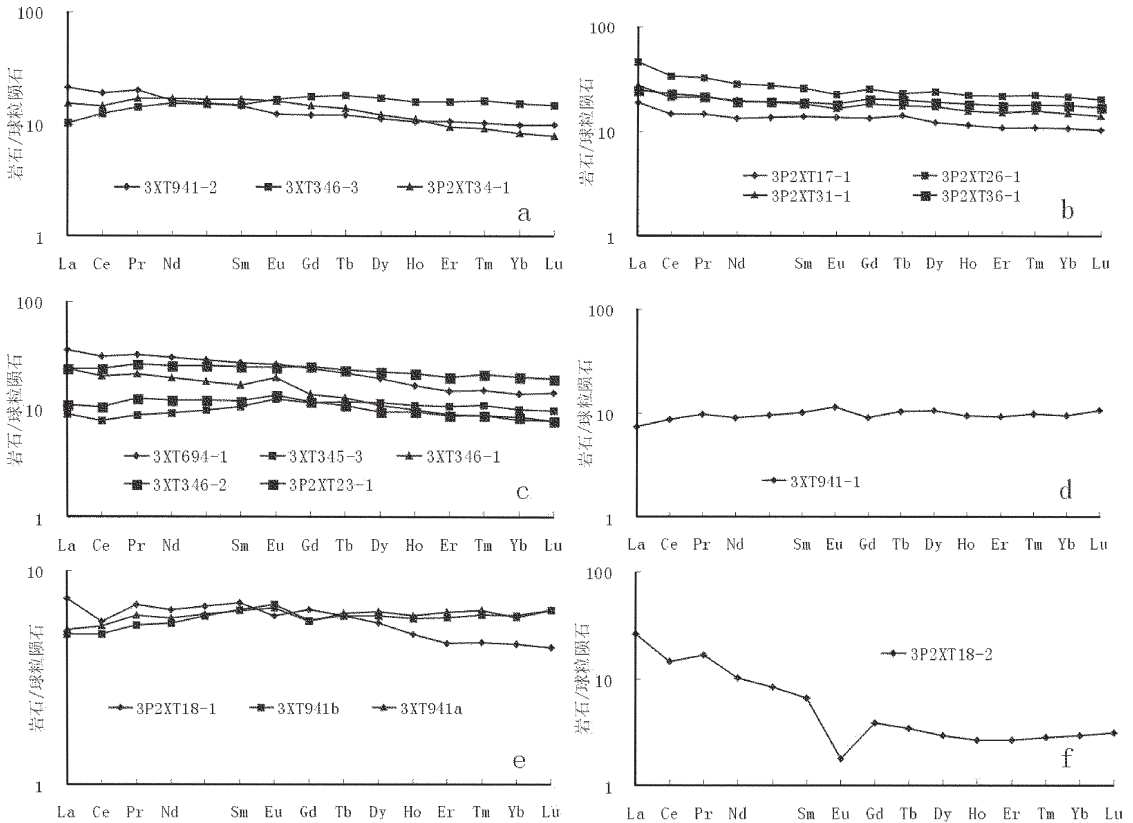


图 6 多彩地区蛇绿岩 REE 分布图

a—玄武岩;b—辉绿岩;c—辉长岩;d—辉石岩;e—异剥橄榄岩;f—硅质岩

Fig.6 REE distribution diagram of Duocai area ophiolite

a—Basalts;b—Diabase;c—Gabbro;d—Pyroxenite;e—Ultramafic rocks;f—Chert

重稀土分馏不甚明显。 $\delta \text{Eu}=0.9\sim 1.19$, 平均 1.07, 表明 Eu 不显异常, 稀土配分曲线总体呈平坦型(图 6-e)。而书松一带堆晶橄榄岩的 REE 丰度变化很大, 这可能与全岩成分中单斜辉石含量有关^[14]。

硅质岩: ΣREE 为 32.75×10^{-6} , $\text{LREE}/\text{HREE}=8.02$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 3.98, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 8.88, 显示轻稀土富集性特征, δEu 为 0.34, 铈具明显负异常, 在稀土配分模式曲线图(图 6-f)也显负异常, 稀土配分模式图向右倾斜, 属轻稀土富集型。 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 可以反映硅质岩中 Ce 的异常特征, 大陆边缘硅质岩的 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 值 ≈ 1 , 大洋盆地为 2~3, 而洋中脊附近发育的硅质岩则大于 3.5^[15]。研究区硅质岩 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 值为 1.81, 反映可能具有陆缘海的特性。而扎河北东邦巴塘曲卡一带的硅质岩中 LREE 与 HREE 分异不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.34~2.79, 平均值为 1.85; $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 值为 0.79~1.30, 平均值为 1.08, 其形成于大陆边缘环境^[16]。两者的形成环境可能相似。

3.3 微量元素特征

多彩蛇绿岩组合中各类岩石样品的微量元素分析数据见表 3。

蛇绿岩各岩石组分富集大离子亲石元素, 贫高场强不活动元素, 在微量元素蛛网图上, 多数显示 Nb 弱负异常。而负 Nb 异常是大陆地壳的特征, 暗示大陆地壳参加了岩浆活动过程^[18]。玄武岩以 Rb、Ta、Th 等元素的明显富集和 Y、Yb 的轻微亏损为特征, Nb 明显亏损(图 7-a); 大洋板内洋岛、海山链玄武岩的 $\text{Th}/\text{Ta}<1.6$, $\text{Ta}/\text{Hf}>0.1$, 其中拉斑玄武岩的 $\text{Ta}/\text{Hf}=0.1\sim 0.3$, 碱性玄武岩 $\text{Ta}/\text{Hf}>0.3$ ^[19], 研究区玄武岩 Th/Ta 平均为 1.78, $\text{Ta}/\text{Hf}>0.15$, 而 $\text{Ta}/\text{Hf}=0.15\sim 0.2$, 显示为拉斑玄武岩, 与大洋板内玄武岩的特性相似; 而白马雪山和共卡玄武岩的 Ti/V 比值为 20~50, 属于拉斑系列^[14], 与本区玄武岩微量元素特征相似。辉绿岩中 Nb 略呈亏损, 在微量元素蛛网图(图 7-b)上 Ce、Zr、Hf、Sm 等元素曲线呈平坦型, 反映在后期变质过程中保持相对稳定。辉长岩 Rb、Ba 元素相对富集, 在微量元素蛛网图曲线(图 7-c)上呈“M”型单隆起, Th 略呈负异常, 其他元素含量相近。辉石岩 Sr、K、Rb、Ba、Th 等元素明显富集, Ta、Nb 等元素略显富集, Zr、Hf、Sm、Y 等元素相对亏损, 在微量元素蛛网图曲线(图 7-d)呈台阶式变化特征。异剥橄榄岩 Rb、Ba、Ta、Th 相对较富集, 而 Ce、Zr、Hf、Sm 等元素含量相近(图 7-e); 而书松一

带堆晶橄榄岩 Cr 与变质橄榄岩相当, 贫 Ni、Sr、Ba、Y、V 等^[14], 与本区异剥橄榄岩微量元素含量相似。硅质岩在微量元素蛛网(图 7-f)中 Th 明显富集, 而 Sr、Sm、Y、Yb 等元素显著亏损, Nb 也具有弱亏损特征。用 U/Th 指标可以揭示硅质岩的沉积物源与热水沉积的关系, 热水沉积物中 U 相对富集, 故热水沉积岩中 U/Th 值大于 1, 而非热水沉积岩中 U/Th 值小于 1^[20], 研究区硅质岩的 U/Th 值为 0.12, 系非热水沉积环境中的产物。

4 蛇绿岩形成时代

多彩蛇绿混杂岩带区域上是海西期构造运动的产物。与其处于同一构造带内的巴音查乌马辉长岩中已获得 Rb-Sr 等时线年龄为 $(266 \pm 41)\text{Ma}$ ^[21], 属于晚古生代中二叠世; 在霞若及奔子栏蛇绿岩的硅质岩中发现放射虫化石, 其时代为早二叠世^[22]; 金沙江缝合带东侧奔子栏—霞若一带推测蛇绿岩所代表洋盆的时代主要为二叠纪^[14]; 在研究区东北缘邦巴塘曲卡一带硅质岩中发现放射虫化石, 其中以 *Pseudoalbaillella* 属最丰富, *P. longtanensis* 种数量最多, 该放射虫动物群的时代为中二叠世^[16]; 在金沙江蛇绿岩带滇西共卡道班附近红色硅质岩中的 *Pseudoalbeillella* 动物群的时限是从 *Sakmarian* 期延续到 *Guadalupian* 期, 时代属早二叠世^[12]; 本次在当江以北硅质岩中获得 *Pseudoalbaillella fusiformis* (纺锤形假阿尔拜虫) 和 *Pseudoalbaillella* spp (假阿尔拜虫众多未定种) 的放射虫化石, 经中科院南京地质古生物研究所鉴定, 其时代为 P_1 — P_2 。研究区出露的浅灰褐色硅质岩呈夹层或岩块产于异剥橄榄岩、枕状玄武岩残块中, 在区域上与西金乌兰湖、金沙江地区发现的放射虫硅质岩具有很好的对比性, 其化石分子相同, 均为早—中二叠世的放射虫组合。因此, 将研究区蛇绿岩形成时代确定为早—中二叠世。

5 构造环境判别

多彩蛇绿岩受强烈的构造肢解而支离破碎, 组成蛇绿岩的各岩石单元零星出露, 变质变形程度较高, 呈现明显的混杂作用特征。孙晓猛^[12]认为金沙江古特提斯洋经历了较完整的威尔逊旋回; 金沙江和哀劳山洋盆是在早中石炭世打开的^[14], 发生裂谷扩张及裂解作用, 并伴随有大量的大陆裂谷玄武岩喷发; 扩张期主要为晚石炭世至早二叠世^[12], 此时金沙

表 3 多彩蛇绿岩微量元素 (10^{-6}) 分析结果
Table 3 Analytical results of trace elements (10^{-6}) of ophiolite suite in Duocai area

样品编号	岩性	Li	Be	Sc	Ga	Th	Sr	Ba	V	Co	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Ag	As	Sn	Rb	U	Hf	Zr	Au	Ta	Yb	Sb	Nb
3FDY18-2	辉长岩	2.7	0.25	2.6	2.0	4.2	14	54	17	5.5	98	55	6.5	3.5	13	0.38	0.23	0.038	0.30	1.1	4.8	0.5	5.5	218	0.50	0.5	0.7	0.12	2.9
3DY41-2	玄武岩	15.0	1.00	27.0	5.7	1.0	63	99	127	22.0	171	107	61.0	1.0	52	0.45	0.20	0.063	1.10	0.6	13.0	0.5	2.5	95	0.50	0.5	3.8	0.14	1.6
3DY346-3	玄武岩	12.1	0.33	49.0	16.6	0.4	112	39	380	45.7	221	67	78.2	1.6	141	0.41	0.21	0.043	1.41	1.6	6.0	0.1	2.6	82.7	0.49	0.3	5.1	0.29	5.4
3FDY34-1	玄武岩	8.4	1.50	34.0	20.0	1.0	125	88	297	64.0	764	337	95.0	0.9	100	0.86	0.20	0.054	0.10	1.5	7.5	0.5	3.4	119	0.60	0.5	1.9	0.05	1.1
3FDY17-1	辉长辉 绿岩	19.0	1.2	41.0	16.0	1.5	179	165	278	37.0	399	74	71.0	1.0	82	0.73	0.20	0.018	1.60	0.7	70.0	0.5	2.2	77	0.50	0.5	2.5	0.20	2.1
3FDY25-1	辉绿岩	4.2	2.1	36.0	18.0	4.8	180	220	302	34.0	106	45	54.0	4.2	86	0.66	0.20	0.100	2.20	2.2	13.0	0.9	4.6	154	0.70	0.5	4.3	0.44	4.4
3FDY31-1	辉绿岩	13.0	1.9	41.0	14.0	2.6	129	105	354	37.0	84	52	56.0	2.0	132	0.66	0.20	0.043	2.30	1.1	21.0	0.7	4.2	141	0.60	0.5	3.2	0.27	4.4
3FDY35-1	辉绿岩	13.0	1.8	40.0	18.0	1.9	196	118	336	40.0	155	48	116.0	2.2	94	0.93	0.20	0.074	1.70	1.4	22.0	0.7	3.2	88	1.00	0.5	3.1	0.34	2.3
3DY694-1	辉长岩	11.8	1.44	63.8	27.6	2.7	253	94.6	513	44.7	76	21	44.3	4.0	137	1.21	0.34	0.019	1.96	1.5	14.5	0.4	3.5	133	0.68	0.3	2.9	1.01	24.2
3DY345-3	辉长岩	20.1	0.24	50.0	16.4	0.1	156	80.6	312	41.2	597	155	102.0	3.6	70	0.64	0.22	0.069	14.00	0.6	30.0	0.1	1.3	54.4	1.48	0.24	3.3	0.49	9.0
3DY346-1	辉长岩	16.9	0.18	49.7	15.3	0.1	196	285	307	42.0	177	87	181.0	0.6	73	0.98	0.18	0.112	5.15	1.0	8.2	0.1	2.4	55	1.76	0.3	2.3	0.61	9.3
3DY346-2	辉长岩	16.9	0.28	53.1	16.8	0.1	139	149	299	43.2	177	88	194.0	0.7	70	0.90	0.18	0.129	6.53	0.9	5.6	0.1	2.0	58.5	1.12	0.3	2.6	0.13	2.4
3DY23-1	辉长岩	8.8	1.5	33.0	14.0	1.0	203	82	267	59.0	780	364	94.0	1.0	83	0.93	0.20	0.068	0.70	1.1	10.0	0.5	3.1	76	1.30	0.5	2.0	0.29	0.96
3DY941-1	辉石岩	55.0	1.0	38.0	19.0	1.0	578	210	159	45.0	208	182	67.0	1.0	56	0.45	0.20	0.080	1.10	1.8	18.0	0.5	1.4	64	0.50	0.5	2.2	0.16	11.0
3FDY18-1	异斜辉 橄岩	5.5	0.78	22.0	7.6	1.0	40	67	160	70.0	2024	773	42.0	1.4	79	0.66	0.20	0.020	4.48	1.0	13.0	0.5	1.2	64	0.60	0.5	1.2	0.23	1.3
3DY941b	异斜辉 橄岩	11.0	0.6	28.0	5.9	1.0	8.3	39	101	86.0	1675	778	58.0	1.0	66	0.52	0.20	0.067	3.10	0.9	7.5	0.5	1.1	38	0.60	0.5	1.5	0.20	0.8
3DY941a	异斜辉 橄岩	28.0	0.6	28.0	6.9	1.0	18	44	109	85.0	1916	837	42.0	1.0	74	0.66	0.20	0.058	14.00	1.1	18.3	0.5	1.1	43	0.60	0.5	1.6	0.11	1.2

注: 样品由武汉综合岩矿测试中心测试, 分析方法是 ICP-MS。

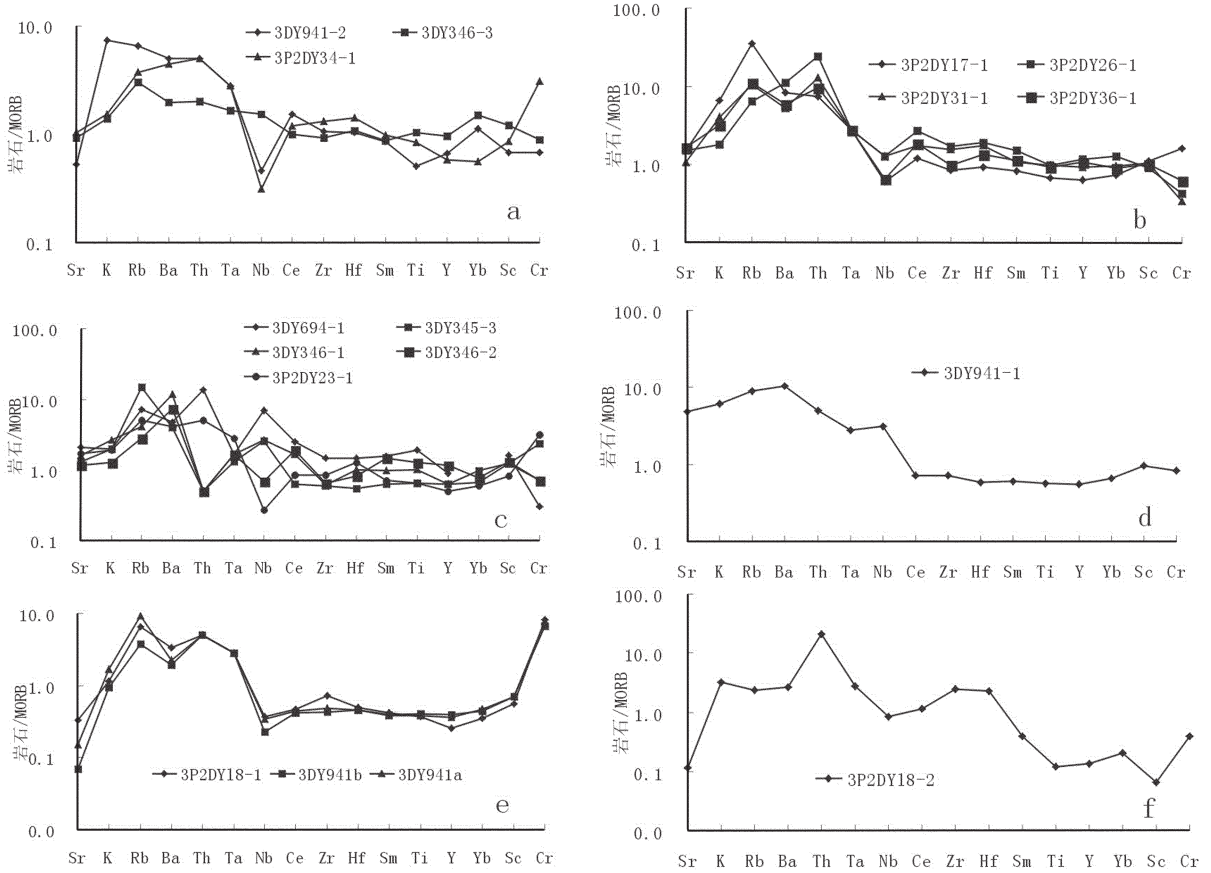


图7 多彩地区蛇绿岩微量元素蛛网图

a—玄武岩;b—辉绿岩;c—辉长岩;d—辉石岩;e—超镁铁质岩;f—硅质岩

Fig.7 MORB-normalized trace element spidergram from Duocai area ophiolite

a—Basalts;b—Diabase;c—Gabbros;d—Pyroxenite;e—Ultramafic rocks;f—Chert

江带扩张作用达到高潮,形成金沙江洋壳。中、晚二叠世时洋盆已开始缩小,洋壳开始向西俯冲,早、中三叠世时,义敦地块和羌塘—昌都地块碰撞拼合,形成金沙江缝合带及代表板块缝合线的蛇绿混杂岩带。研究区蛇绿岩中的硅质岩产于大陆边缘环境,区域上该带出露的硅质岩也具有大陆边缘环境的特性^[16,23]。堆晶岩底部出露异剥橄榄岩,是具有SSZ型蛇绿岩的重要岩石组分,且枕状熔岩、辉长岩、辉绿岩均有明显的Nb、Zr、Hf的亏损,推测多彩蛇绿岩形成于俯冲带环境。

因高场强元素 Nb、Ta、Nd、P、Hf、Zr、Eu、Ti、Tb、Y、Yb 等在海水蚀变及变质过程中是稳定或比较稳定的不活动性元素,在后期变质过程中相对保持稳定,可代表原岩的成分^[24]。在蛇绿岩岩石组合中,玄武岩和辉绿岩最具成因及构造环境鉴定意义^[25]。因此,用玄武岩、辉绿岩的微量元素对多彩蛇绿岩进行

构造环境的综合分析。在 Ti/100-Zr-Sr/2 三角图解^[26](8-a)中,玄武岩及辉绿岩类多数样品落入大洋玄武岩区;在 Ti/100-Zr-Y×3 三角图解^[26](8-b)中多数点落在板内玄武岩区,有1个点落在C区且靠近板内玄武岩区,而玄武岩的 Zr/Y 值为 2.86~6.82,平均 4.82,与板内玄武岩(Zr/Y>3, MORB 的 Zr/Y<31)的特征^[26]相似。在 La/Nb-La 图解^[27](8-c)中,玄武岩样品投点在洋中脊玄武岩及岛弧拉斑玄武岩区中,辉绿岩投在岛弧拉斑玄武岩区,说明金沙江蛇绿岩的 MORB 型岩浆中混有 IAB 的因素。在 V-Ti/1000 图解(8-d)中,绝大多数样品投在大洋玄武岩区,而研究区玄武岩具拉斑玄武岩特性,表明玄武岩具有洋底玄武岩的特征。由此,反映多彩蛇绿岩在构造侵位过程中经历了俯冲消减、再逆冲推覆上升的复杂的构造作用。

综上所述,结合岩石学、元素地球化学及构造环

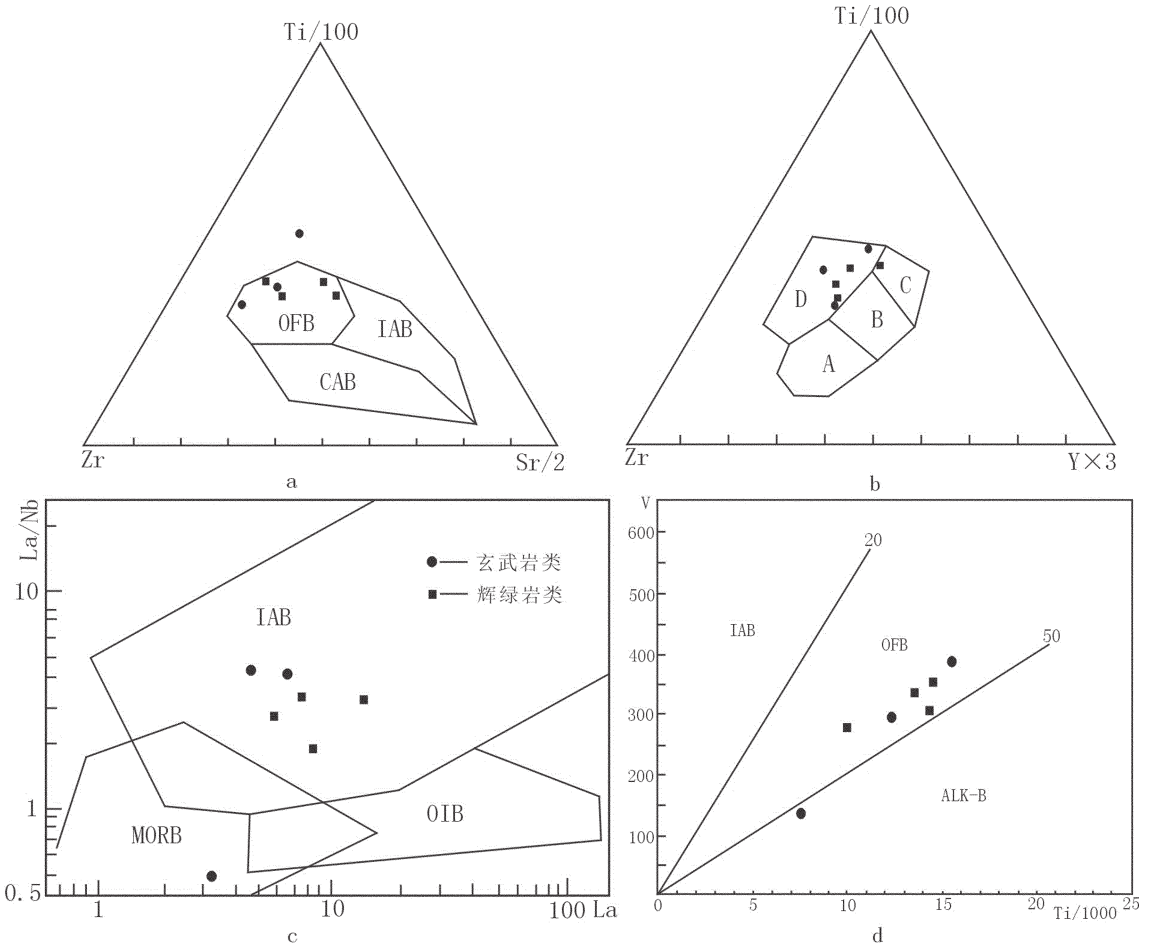


图 8 多彩蛇绿岩构造环境判别图

A—Zr-Sr/2-Ti/100(仿 Pearce and Cann,1973):OFB-大洋玄武岩,CAB-岛弧钙碱性玄武岩,IAB-岛弧拉斑玄武岩;b—Zr-Y×3-Ti/100(仿 Pearce and Cann,1973):A+B-低钾岛弧拉斑玄武岩,B+C-钙碱性岛弧玄武岩,B-洋底玄武岩,D-板内玄武岩;c—La/Nb-La 图(据李曙光,1993):MORB-洋中脊玄武岩,IAB-岛弧拉斑玄武岩,OIB-板内玄武岩;d—V-Ti/1000 判别图(仿莫宣学,1998):IAB-岛弧玄武岩,OFB-大洋玄武岩,ALK-B-碱性玄武岩

Fig.8 Tectonic environment discrimination diagrams of ophiolite in Duocai area

a—Zr-Sr/2-Ti/100 (after Pearce and Cann, 1973): OFB—Oceanic basalt; CAB—Island arc calc-alkaline basalt; IAB— Island arc tholeiite;b—Zr-Y×3-Ti/100 (after Imitate Pearce and Cann,1973): A+B—Low potassium tholeiitic basalts,B+C—Calc-alkaline island-arc basalt;B—Ocean floor basalt; D—Intraplate basalt;c:La/Nb-La diagrams(after Li Shu-guang 1993):MORB— Mid-ocean ridge basalt; IAB—Island arc tholeiite; OIB—Intraplate basalt;d—V-Ti/1000 diagrams (after Mo Xuan-xue, 1998): IAB—Island arc basalt; OFB—Oceanic basalt; ALK-B—Alkaline basalt

境判别等特征,玄武岩及辉绿岩具有相同或相似 的亲源性,构造判别图显示具洋底拉斑玄武岩的特性; 区域上,金沙江古特提斯洋位于义敦地块和羌塘— 昌都地块之间,晚石炭世至早二叠世为扩张期,早、 中二叠世金沙江洋壳开始向西俯冲并在中三叠世末 期碰撞拼合形成金沙江缝合带。因此,推测多彩蛇 绿岩产于俯冲带环境。

6 结论

(1)金沙江蛇绿岩各组分呈不连续长条状、透镜

状构造岩块、岩片产出,各组分之间均以构造界面接 触,其原始层位已完全被改造,与围岩一起受后期蚀 变较强,普遍具绿泥石化、绿帘石化及绢云母化,出 露零星。

(2)蛇绿岩各岩石组分轻重稀土分馏不甚明显或 LREE 弱富集。辉绿岩和玄武岩锶不显异常或显弱 负异常,稀土配分模式图呈近平坦型或略向右倾斜; 硅质岩(La/Ce)_N 值为 1.81,形成环境可能具有陆缘 海的特性;蛇绿岩各岩石组分富集大离子亲石元素, 贫高场强不活动元素,在微量元素蛛网图上,多数显

示 Nb 呈弱负异常。玄武岩微量元素 Rb、Ba、Ta 等相对较富集, 而 Ce、Zr、Hf、Sm 等元素含量相近, Th/Ta 平均为 1.78, Ta/Hf>0.15, 而 Ta/Hf=0.15~0.2, 具有洋底玄武岩的特征。

(3)金沙江古特提斯洋扩张期主要为晚石炭世至早二叠世, 洋盆持续时间短, 早、中二叠世金沙江洋壳开始向西俯冲并在中三叠世末期义敦地块和羌塘—昌都地块碰撞拼合, 形成金沙江缝合带, 推测研究区多彩蛇绿岩形成于俯冲带环境。

致谢:参加野外工作及室内研究的还有王毅智、刘生军、祁生胜、王永文、丁玉进、安守文等, 在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

- [1] 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 等. 哀牢山缝合带中两类火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地球化学, 2000, 29(1):6-13.
Dong Yunpeng, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Geochemistry of the two-type volcanic rocks from Ailaoshan suture zone and their tectonic implication[J]. *Geochimica*, 2000, 29(1):6-13(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘志飞, 王成善, 李祥辉. 西藏南部雅鲁藏布江缝合带的沉积—构造演化[J]. 同济大学学报, 2000, 28(5):537-541.
Liu Zhifei, Wang Chengshan, Li Xianghui. Sedimentary-tectonic evolution of the Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet[J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(5):537-541(in Chinese with English abstract).
- [3] 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 特提斯喜马拉雅带中段桑秀组玄武岩的地球化学和岩石成因[J]. 地球化学, 2005, 34(1):7-19.
Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Sangxiu formation basalts in the central segment of Tethys Himalaya[J]. *Geochimica*, 2005, 34(1):7-19(in Chinese with English abstract).
- [4] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学—地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力 [J]. 中国地质, 2006, 33(2):221-238.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):221-238(in Chinese with English abstract).
- [5] 王冉, 夏斌, 胡敬仁, 等. 仁布蛇绿混杂带洋岛型辉绿岩地球化学: 藏南特提斯洋内热点[J]. 地球化学, 2006, 35(1):41-54.
Wang Ran, Xia Bin, Hu Jingren, et al. Geochemistry of oceanic island diabase from ophiolitic mélange zone in Renbu area: Implications for hotspot within Tethys in southern Xizang (Tibet)[J]. *Geochimica*, 2006, 35(1):41-54(in Chinese with English abstract).
- [6] 孙晓猛, 简平. 滇川西部金沙江古特提斯洋的威尔逊旋回 [J]. 地质论评, 2004, 50(4):343-350.
Sun Xiaomeng, Jian Ping. The Wilson cycle of the Jinshajiang Paleo-tethys ocean, in western Yunnan and western Sichuan Provinces[J]. *Geological Review*, 2004, 50(4):343-350(in Chinese with English abstract).
- [7] 莫宣学, 沈上越, 朱勤文. 三江中南段火山岩—蛇绿岩与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1998:86-167.
Mo Xuanxue, Shen Shangyue, Zhu Qingwen. Mineralization of volcanic rocks-ophiolite in the middle-south sanjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:86-167 (in Chinese with English abstract).
- [8] 翟庆国, 李才, 程立人, 等. 西藏羌塘角木日地区二叠纪蛇绿岩地质特征及意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12):1228-1230.
Zhai Qingguo, Li Cai, Cheng Liren, et al. Geological features of Permian ophiolite in the Jiaomuri area, Qiangtang, Tibet, and its tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(12):1228-1230(in Chinese with English abstract).
- [9] 王培生. 云南德钦蛇绿岩中基性熔岩的岩石化学特征初步研究 [C]//青藏高原地质文集(9). 北京:地质出版社, 1985:207-209.
Wang Peisheng. Preliminary study to petrochemical characteristic of the basalts of ophiolite in Deqing area, Yunnan [C]//Geological collection of Qinghai-Tibet plateau(9), Beijing: Geological Publishing House, 1985:207-209(in Chinese with English abstract).
- [10] 张旗, 周国庆, 王焰. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境[J]. 岩石学报, 2003, 19(1):1-8.
Zhang Qi, Zhou Guoqing, Wang Yan. The distribution of time and space of Chinese ophiolites and their tectonic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [11] 钟太赟, 丁林. 从三江及邻区特提斯演化讨论冈瓦纳大陆离散与亚洲增生[C]//亚洲的增生. 北京:地震出版社, 1993:5-25.
Zhong Dalai, Ding Lin. Discussion on Gondwanaland tethyan and Asia hyperplasia from the evolution of Tethyan of the Sanjiang and adjacent areas [C]//Asia hyperplasia. Beijing: Seismological Press, 1993:5-25(in Chinese with English abstract).
- [12] 孙晓猛, 张保民, 聂泽同, 等. 滇西北金沙江带蛇绿岩、蛇绿混杂岩形成环境及时代[J]. 地质论评, 1997, 43(2):113-121.
Sun Xiaomeng, Zhang Baomin, Nie Zetong, et al. Formation age and environment of ophiolite and ophiolitic mélange in the Jinshajiang belt, northwestern Yunnan[J]. *Geological Review*, 1997, 43(2):113-121(in Chinese with English abstract).
- [13] 叶培盛, 吴珍玟, 胡道功, 等. 西藏东巧蛇绿岩的地球化学特征及其形成的构造环境[J]. 现代地质, 2004, 18(3):309-316.
Ye Peisheng, Wu Zhenhan, Hu Daogong, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of ophiolite of Dongqiao, Tibet [J]. *Geoscience*, 2004, 18(3):309-316 (in Chinese with English abstract).
- [14] 韩松, 贾秀勤, 黄忠祥, 等. 云南金沙江蛇绿岩的地球化学特征及其成因的初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(5):203-212.
Han Song, Jia Xiuqin, Huang Zhongxiang, et al. A preliminary

- geochemical river ophiolites and genetic study of Jinsha Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1996, 15 (5):203-212(in Chinese with English abstract).
- [15] Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert general principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4):213-232.
- [16] 段其发, 王建雄, 何龙清, 等. 青海南部金沙江缝合带二叠纪硅质岩地球化学特征及沉积环境 [J]. *华南地质与矿产*, 2006, 3: 24-30.
- Duan Qifa, Wang Jianxiong, He Longqing, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environments of the Permian siliceous rock in the Jinshajiang suture zone, southern Qinghai, China [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2006, 3: 24-30(in Chinese with English abstract).
- [17] 武莉娜, 王志畅, 汪云亮. 微量元素 La、Nb、Zr 在判别大地构造环境方面的应用[J]. *华东地质学院学报*, 2003, 26(4):343-348.
- Wu Lina, Wang Zhichang, Wang Yunliang. On the application of La, Nb and Zr in identifying the tectonic settings[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 2003, 26(4):343-348(in Chinese with English abstract).
- [18] 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜. 岩石地球化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2000:110-119.
- Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi. *Petrology and Geochemistry*[M]. Hefei:University of Science and Technology of China Press, 2000, 110-119(in Chinese with English abstract).
- [19] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3):413-421.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3):413-421(in Chinese with English abstract).
- [20] Rona P A. Hydrothermal mineralization at oceanic ridges [J]. *Canadian Mineralogist*, 1998, 26:431-465.
- [21] 苟金. 唐古拉巴音查乌马地区超基性岩的基本特征 [J]. *西北地质*, 1990, 1:1-5.
- Gou Jin. The basic characteristics of ultrabasic rock of Bayinchawuma area in Tanggula [J]. *Northwest Geology*, 1990, 1: 1-5(in Chinese with English abstract).
- [22] 王传尚. 滇西德钦地区放射虫化石新发现 [J]. *华南地质与矿产*, 1999(2):32-35.
- Wang Chuanshang. New discovery of the radiolarians from Deqing area, west Yunnan [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1999(2):32-35(in Chinese with English abstract).
- [23] 孙晓猛, 聂泽同, 梁定益. 滇西北金沙江带硅质岩沉积环境的确定及大地构造意义[J]. *地质论评*, 1995, 41(2):174-178.
- Sun Xiaomeng, Nie Zetong, Liang Dingyi. Determination of sedimentary environments and tectonic significance of silicolites in Jinsha river belt, NW Yunnan [J]. *Geological Review*, 1995, 41(2): 174-178(in Chinese with English abstract).
- [24] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997: 113-138.
- Zhao Zhenhua. *Geochemistry of the Principle of Trace Elements* [M]. Beijing: Science Press, 1997:113-138(in Chinese with English abstract).
- [25] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. *Marginal Basin Geology*, 1984:77-94.
- [26] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1973, 19:290-300.
- [27] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. *岩石学报*, 1993, 9(2):146-157.
- Li Shuguang. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(2): 146-157(in Chinese with English abstract).

Geochemistry of the Duocai ophiolite in north Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet plateau: environments for tectonics

LI Shan-ping^{1,2}, PAN Tong¹, LI Yong-xiang³, WANG Lei⁴, WEN De-yin², WANG Shu-lin²,
CHANG You-ying², HUANG Qing-hua², WANG Qin-yuan¹

(1. Qinghai Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810012, Qinghai, China; 2. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China; 3. No. 8 Institute of Mineral Exploration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China; 4. No. 5 Institute of Mineral Exploration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: Duocai ophiolite is a component part of mélangé ophiolite in Tongtian River area, and regionally belongs to the northward extension part of Xijianwulan-Jinsha River suture zone. Each Duocai ophiolite occurs in the form of tectonite and rock chips exposed as small and scattered outcrops, but has fairly complete kinds of rocks, mainly composed of diallage-peridotite, pyroxenite monoclinic pyroxinite, gabbro, basalt, diabase and siliceous rocks, with no mantle peridotite. Ophiolite components assume tectonic contact with wall rocks. Diallage-peridotite is characterized by rich MgO, poor TiO₂ and P₂O₅, with no or only weak negative Eu anomaly. Diallage-peridotite is an important rock of SSZ type. Gabbro has high TiO₂ and Al₂O₃ content; basalt and diabase have similar characteristics. Th/Ta of basalt has an average value of 1.78, Ta/Hf > 0.15, and Ta/Hf = 0.15-0.2, and characteristics of these elements are similar to those of oceanic intraplate basalts. Al₂O₃/(Al₂O₃ + Fe₂O₃) ratio of siliceous rocks is 0.9, (La/Ce)_N is 1.81, showing characteristics of a land-based sea. Based on the above-mentioned characteristics in combination with the age of ophiolite as well as tectonic setting discrimination diagrams of basalt and diabase, the authors hold that Duocai ophiolite was formed in a subduction zone tectonic setting.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; north Qiangtang Basin; ophiolite; Xijianwulan-Jinsha River suture zone; subduction zone

About the first author: LI Shan-ping, male, born in 1974, engineer, master, engages in the study of regional geology and mineral resources; E-mail: lishanping1952@163.com.