

青藏高原羌塘高压变质带的特征及其构造意义

李 才¹, 董永胜¹, 翟庆国², 于介江¹, 黄小鹏¹

LI Cai¹, DONG Yong-sheng¹, ZHAI Qing-guo², YU Jie-jiang¹, HUANG Xiao-peng¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:羌塘高压变质带分布于龙木错-双湖板块缝合带的南侧,西起红脊山,经片石山、蓝岭、角木查尕日、纳若,到双湖以东的才多茶卡,长约500 km。向东已经延伸到巴青以北和昌都的吉塘地区,再向南进入滇西与澜沧江蓝片岩带共同构成一条断续延伸近2000 km的高压变质带。羌塘高压变质带主要由蓝片岩和榴辉岩构成,蓝闪石片岩中蓝闪石和多硅白云母同位素定年结果为223~215 Ma,榴辉岩的变质年龄为243~217 Ma。估算蓝片岩的变质温度为410~460℃,变质压力为0.67~0.75 GPa;榴辉岩相的变质作用温度不超过500℃,压力为1.56~2.35 GPa。羌塘高压变质岩定年研究结果确定龙木错-双湖板块缝合带最终碰撞闭合发生在晚三叠世早期。羌塘高压变质带是冈瓦纳与欧亚大陆汇聚事件的重要记录。

关键词:青藏高原;羌塘;高压变质带;龙木错-双湖缝合带;构造意义

中图分类号:P588.34

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2008)01-0027-09

Li C, Dong Y S, Zhai Q G, Yu J J, Huang X P. High-pressure metamorphic belt in Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(1):27-35

Abstract: The Qiangtang high-pressure (HP) metamorphic belt is distributed for ~500 km from Hongjiashan eastward through Pianshishan, Lanling, Jiaomuchagari and Naruo to Caiduo Caka east of Shuanghu, tectonically on the southern side of the Lungmu Co-Shuanghu suture zone. Eastward the belt extends to north of Baqên and in the Gytang area of Qamdo and connects with the Lancangjiang blueschist belt to form a HP metamorphic belt extending discontinuously nearly 2000 km. The Qiangtang HP metamorphic belt is composed mainly of blueschist and eclogite. Isotopic dating of glaucophane and phengite from blueschist yielded ages of 223 to 215 Ma and the metamorphic ages of eclogite range from 243 to 217 Ma. The metamorphic temperatures and pressures of blueschist are 410–460℃ and 0.67–0.75 GPa and those of eclogite are less than 500℃ and 1.56–2.35 GPa. The dating results of HP metamorphic rocks suggest that the final collision of the Lungmu Co-Shuanghu suture zone occurred in the early stage of the Late Triassic, and this HP belt is an important record of the convergence between Gondwana and Eurasia.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Qiangtang; high-pressure (HP) metamorphic belt; Lungmu Co-Shuanghu suture zone; tectonic significance

高压变质岩作为特殊的岩石组合,是确定板块边界和运动力学的重要元素。羌塘高压变质带是目前青藏高原内部延伸规模最大、保存较好、研究程度较高的高压变质带^[1-12]。羌塘地区有关蓝片岩的最早

报道始于1915年^[1]。1987年笔者报道了双湖恰格勒拉地区的蓝片岩^[2]。其后国内外学者先后报道了冈玛日、蓝岭、角木查尕日、双湖、红脊山等地区的蓝片岩及同位素定年结果,并对高压变质带的构造

收稿日期:2007-07-16;修订日期:2007-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40672147)与中国地质调查局项目(编号:200313000015)资助。

作者简介:李才(1953-),男,教授,从事青藏高原大地构造与区域地质研究。E-mail:licai010@126.com

意义进行了探讨^[3-12]。2006年笔者报道了羌塘中部的榴辉岩^[11-13](图1)。关于羌塘高压变质带的深入研究对于认识青藏高原的早期形成和古特提斯演化具有重要意义。

1 羌塘高压变质带的地质背景与野外产出特征

近年来对羌塘地区的地质调查和科学研究取得了许多新进展和新发现。由于地质研究程度的不断提高,许多关键地质问题的研究集中到了羌塘地区,羌塘已经成为青藏高原地学研究的热点地区之一。以龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带为界,青藏高原分为冈瓦纳和欧亚两大板块^[2,14-18]。羌塘中部地区目前没有可靠的前奥陶纪基底资料,基底问题争论较大^[19-21]。羌南地区近年来发现了稳

定台型沉积的奥陶纪-泥盆纪地层,与喜马拉雅地区和冈底斯地区的同时代地层沉积的特征和生物面貌一致,可进行对比^[22-23]。羌塘南部地区的石炭系-二叠系是一套典型的活动陆缘沉积,夹有多层冰海杂砾岩并产冷水型生物化石,地层中夹有大量的玄武岩和基性岩墙群,玄武岩获得了318 Ma的Rb-Sr等时线年龄,辉长岩岩墙获得了299~314 Ma的锆石U-Pb谐和线年龄^[24]。双湖以东的才多茶卡发现了晚泥盆世放射虫硅质岩^[25],果干加年山发现了早古生代蛇绿岩残片^[26],角木日地区发现了保存完好的蛇绿岩、放射虫硅质岩^[27]。羌塘南部地区的古生界普遍经历了高压变质作用,并有224~209 Ma的强烈的中酸性岩浆事件发生^[16,24,28]。羌北地区最早的地层是下泥盆统平沙沟组(1:25万玛依岗日幅区域地质调查报告,2005)和中泥盆统^[16],泥盆系-三叠系以浅海碳

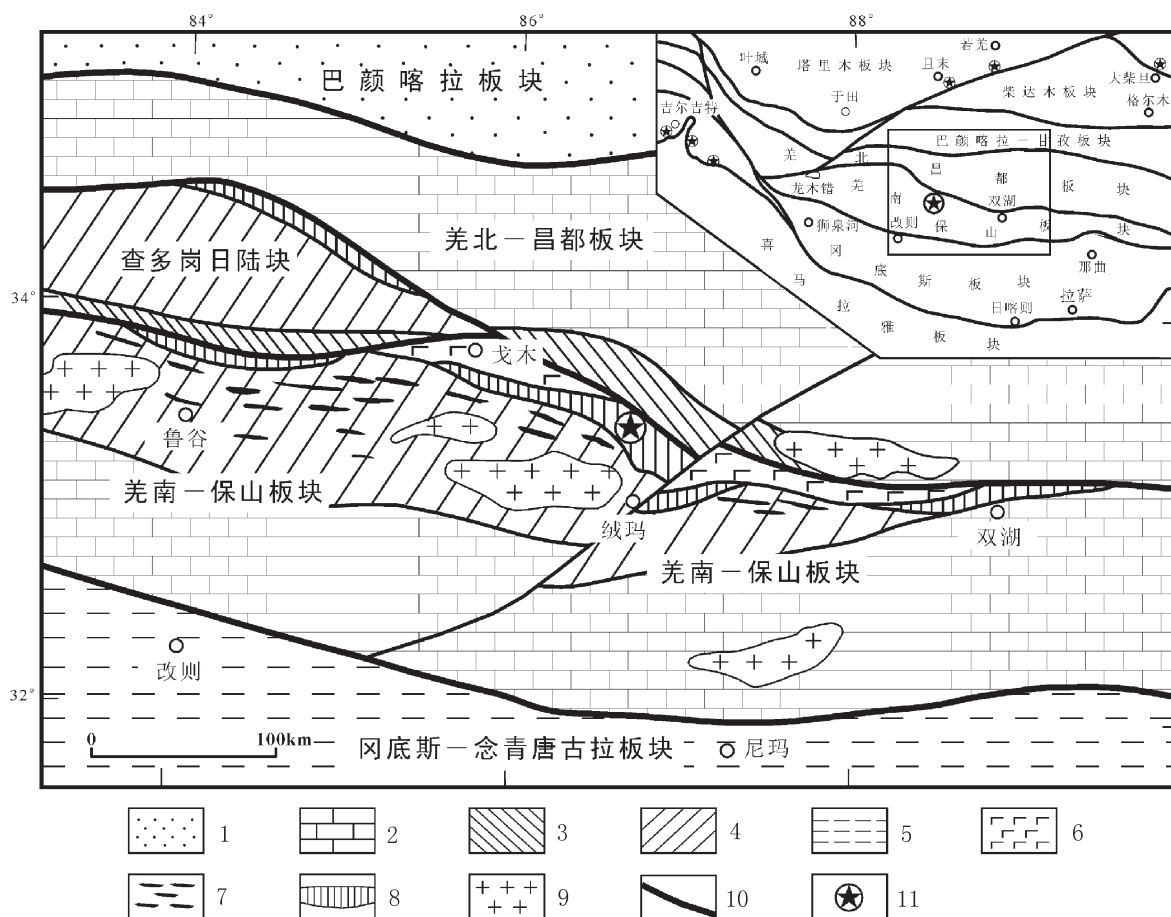


图1 青藏高原板块构造简图及羌塘高压变质带的展布

Fig. 1 Plate tectonic sketch map of the Qinghai-Tibet Plateau and Qiangtang HP metamorphic belt

1—复理石沉积岩系;2—中生代沉积;3—扬子型沉积体系;4—冈瓦纳沉积体系;5—冈底斯中生代造山带;
6—蛇绿岩/蛇绿混杂岩;7—基性岩墙群;8—蓝片岩带;9—花岗岩;10—板块缝合带;11—榴辉岩

酸盐岩沉积为主,生物繁盛且基本连续,很多层位发育生物礁体,没有明显的变质变形和强烈的岩浆活动,具有稳定大陆边缘沉积建造的特点^[18]。

羌塘地区中部的高压变质带组成的主体是蓝闪石片岩,西起冈玛日东到双湖的才多茶卡,断续分布长约500 km(图1)。最近在他念他翁山脉的南侧相当于嘉玉桥群中获得多硅白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 $230\text{ Ma}\pm 1\text{ Ma}$ ^[29],在昌都的西西群变质玄武岩中也获得了多硅白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 $226\text{ Ma}\pm 3\text{ Ma}$ (李才等,另文发表),羌塘中部的高压变质带已经延伸到巴青以北和昌都的吉塘地区,向南与滇西的高压变质带相连,滇西高压变质带已有较多的研究成果^[30-31]。羌塘中部的蓝片岩带以尼玛县荣玛北的蓝岭剖面最好(图2),南北向宽度达到10 km以上。榴辉岩只在羌塘中部的片石山出现^[12-13,32]。榴辉岩呈大小不等的透镜状产出于戈木错南东约20 km的石榴子石白云母片岩和白云母蓝闪石片岩构成的高压变质带中,大的榴辉岩透镜体长度超过3000 m,小的榴辉岩露头仅仅数厘米。榴辉岩的围岩主要是白云母石榴子石片岩、含蓝闪石石榴子石白云母片岩、大理岩等,榴辉岩透镜体整体排列方向为东西向。榴辉岩岩石坚硬致密,露头突出于地表,十分醒目(图版 I -C)。

2 高压变质岩的岩石学特征

羌塘地区的典型高压变质岩石包括蓝片岩类、榴辉岩及与其共生的含蓝闪石岩石,对其岩石学特征目前也有较多的研究。

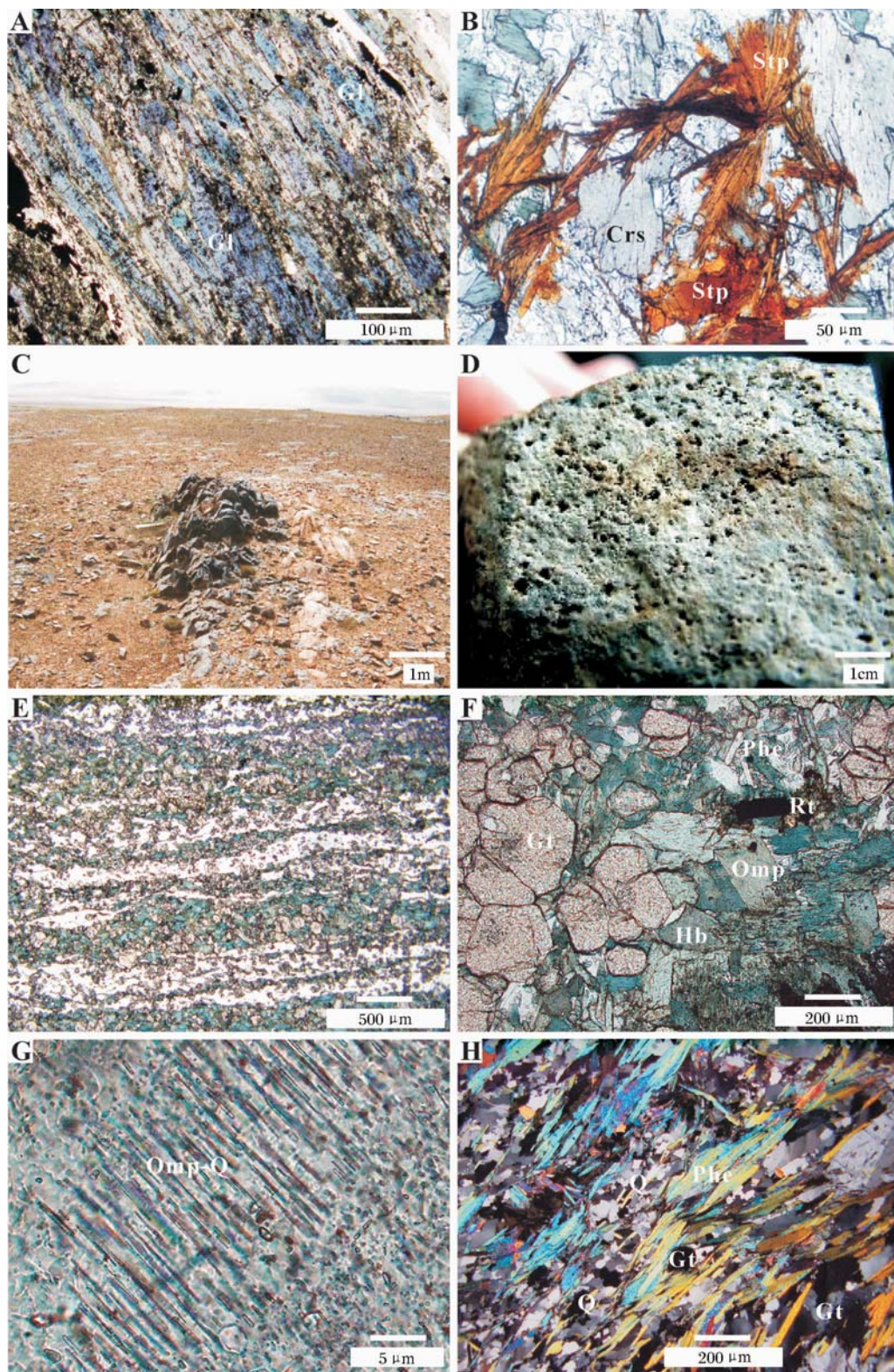
2.1 蓝片岩类

岩石多为黑绿色或灰蓝色,粒度较细,主要矿物组成为蓝闪石、青铝闪石、钠长石、绿帘石、绿泥石等,石英、磁铁矿少量,其中以蓝闪石和青铝闪石为主,定向排列构成片理。多数蓝闪石内部比较干净,颜色和干涉色均匀(图版 I -A),部分岩石中可见青铝闪石和蓝闪石共存构成的环带结构,环带的中部色深,向边部颜色逐渐变浅,中心部位出现青铝闪石的光性特点,而在环带的边部逐渐减小,色散现象也随之减弱,上述特征显示了青铝闪石形成较早,随着压力的逐渐增加,青铝闪石转变为蓝闪石。与其共生的其他片、柱状暗色矿物含量变化较大,从而构成不同的蓝片岩岩石类型,如绿泥绿帘蓝闪片岩,阳起绿帘蓝闪片岩、白云母绿帘蓝闪片岩、绿泥蓝闪片岩等。岩石变余组构较常见,可见变余杏仁构造,变余斑状结构,残留斑晶



图2 羌塘中部蓝岭蓝片岩剖面
Fig. 2 Section of blueschist in the Lanling area, central Qiangtang

图版 I Plate I



A—羌塘蓝岭蓝闪片岩; B—羌塘蓝岭青铝闪石黑硬绿泥石片岩; C—榴辉岩呈透镜体产于石榴子石白云母片岩之中;
D—气孔状榴辉岩; E—一条带状榴辉岩, 由石榴子石和绿辉石组成条带; F—榴辉岩的矿物组合; G—绿辉石的出溶结构, 栅状物为石英; H—榴辉岩的围岩——石榴子石白云母片岩。Gl—蓝闪石; Stp—黑硬绿泥石; Crs—青铝闪石; Gt—石榴子石;
Omp—绿辉石; Hb—角闪石; Rt—金红石; Phe—多硅白云母; Omp-Q—绿辉石中的石英出溶体; Q—石英

为辉石,显示原岩为玄武岩类。

此外在蓝片岩类分布区广泛出露有(蓝闪)阳起片岩,主要组成矿物为阳起石、绿帘石、钠长石等,含或不含蓝闪石。阳起石含量一般为50%~65%,阳起石中可见蓝闪石残留,从该类岩石的地质产状和镜下反应关系判断,它们应由蓝片岩转变而来。

2.2 榴辉岩

榴辉岩呈块状、条带状构造(图版 I -C、E),有的榴辉岩还保留气孔构造(图 I -D),绿黑色,石榴子石淡粉色,细粒粒状柱状变晶结构,主要矿物粒度一般为0.3~0.5 mm,个别可达1 mm。矿物成分为石榴子石(30%~35%)、绿辉石(20%~25%)、角闪石(30%~35%)、斜长石(5%~10%)及少量多硅白云母(3%)、石英、绿帘石(共1%~2%),副矿物为金红石和磷灰石(共3%~5%),其中斜长石、角闪石为榴辉岩退变质作用的产物。

榴辉岩中矿物的主要特征如下:石榴子石呈自形粒状、粒状集合体或残留状,呈环带状,但包体含量少,探针成分分析显示以铁铝榴石为主(64.7%~65.5%),其次是钙铝榴石(27.3%~29.3%)和镁铝榴石(4.5%~6.6%),在石榴子石成分图解中,全部投影在C类榴辉岩区^[33]。绿辉石多呈短柱状或他形,其硬玉分子(Jd)含量在33%~39%之间,属典型的绿辉石,见有石英的叶片状出溶现象(图版 I -F)。多硅白云母呈小板条状,与石榴子石和绿辉石平衡共生(图版 I -H),根据22个氧原子计算,其Si在6.79~7.127之间, $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 为0.60~0.68,属典型的多硅白云母,也是典型的高压变质矿物。

除上述蓝片岩类和榴辉岩外,与其伴生的一些其他岩石类型同样也遭受了高压变质作用的改造,如与蓝片岩伴生的蓝闪大理岩、蓝闪白云母片岩、青铝闪石黑硬绿泥石片岩(图版 I -B)等。作为榴辉岩围岩的石榴子石白云母片岩,其白云母与榴辉岩中的白云母成分相同,均为多硅白云母,反映了高压变质的特点。

3 羌塘高压变质带的变质年龄与变质温压条件估算

3.1 羌塘高压变质带的变质年龄

羌塘地区的蓝片岩分为2个时代。

早二叠世晚期蓝片岩:以冈玛日地区的蓝片岩为代表,已经获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄275 Ma和282 Ma,蓝闪石类矿物主要为蓝闪石^[34-35],目前是羌塘地

区获得的高压变质矿物最早的年龄。由于这组变质年龄有待进一步研究其地质意义,本文暂不讨论。

晚三叠世蓝片岩以红脊山、绒玛咸水泉、角木查尕日、双湖纳若、恰格勒拉和才多茶卡地区的蓝片岩为代表,时代在220 Ma左右,蓝闪石主要为青铝闪石。蓝闪石和多硅白云母已经获得多个单矿物的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年数据(表1)^[12]。笔者在双湖纳若获得的青铝闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $222.5 \text{ Ma} \pm 3.7 \text{ Ma}$ ^[4];Kapp等^[9]在尼玛县荣玛北蓝岭剖面东侧获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄222 Ma,在角木查尕日西侧获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄220~223 Ma,在江爱藏布西侧获得蓝闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄221 Ma;笔者在蓝岭东侧获得多硅白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄215 Ma。

羌塘榴辉岩获得含白云母榴辉岩中多硅白云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $219.3 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$,榴辉岩围岩白云母石榴子石片岩中获得多硅白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $217.2 \text{ Ma} \pm 1.8 \text{ Ma}$ ^[12]。榴辉岩中获得243 Ma的锆石SHRIMP U-Pb年龄,可能是榴辉岩相变质峰期的年龄^[36]。榴辉岩及围岩的多硅白云母年代学研究证明,榴辉岩与围岩是同一期变质作用的产物,与区域上高压变质带的时间是一致的。

他念他翁山脉南侧巴青以北西西岩群中获得多硅白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 $230 \text{ Ma} \pm 1 \text{ Ma}$ ^[29],在昌都吉塘地区西西岩群的变质玄武岩中也发现了多硅白云母, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为226 Ma(李才等,另文发表),推测羌塘中部的高压变质带已延伸到他念他翁和昌都的吉塘地区。再向南进入滇西,与澜沧江蓝片岩带^[30-31]共同构成一条断续延伸约2000 km的高压变质带。

3.2 羌塘高压变质带形成温压条件估算

羌塘中部红脊山、蓝岭、角木查尕日、双湖等地的蓝闪片岩,根据多硅白云母和蓝闪石矿物成分估算的变质温度为 $410 \sim 460^\circ\text{C}$,变质压力为 $0.67 \sim 0.75 \text{ GPa}$ ^[35]。在延伸约500 km范围内,变质作用的温压条件变化不大。

羌塘中部榴辉岩的主要变质矿物组合为Gt+Omp+Phe+Rut。变质温压条件是根据Ravna等^[37]的 Fe^{2+} -Mg交换温度计和来自以下2个反应式的内部一致温压方程式计算的:

(1)1石榴子石+1镁铝榴石+2柯石英/石英 $\rightarrow$ 3透辉石+2蓝晶石

(2)3绿帘石+2钙铝榴石+1镁铝榴石 $\rightarrow$ 6透辉石+3白云母

榴辉岩相变质温度计算是通过共生的绿辉石和成分环带不明显的细粒石榴子石或石榴子石边缘成分的 Fe^{2+} -Mg分配系数(KD)进行的。设定它们在榴辉岩相变质过程中达到了平衡。绿辉石的 $\text{Fe}^{3+}=\text{Na}-(\text{AlVI}+\text{Cr})$,石榴子石的全Fe作为 Fe^{2+} 考虑。

根据石榴子石-单斜辉石地质温度计估算榴辉岩的平衡温度为 $345\sim 374^\circ\text{C}$,据石榴子石-单斜辉石-多硅白云母组合地质压力计估计其压力为 $1.56\sim 2.27\text{ GPa}$,而利用Ellis^[38]和Powell^[39]地质温度计估算的温度分别为 $367\sim 488^\circ\text{C}$ 和 $349\sim 464^\circ\text{C}$,把温度曲线投在榴辉岩 p - T 图解上,获得的压力范围分别为 $1.56\sim 2.36\text{ GPa}$ 和 $1.56\sim 2.35\text{ GPa}$ 。也就是榴辉岩的形成温度不超过 500°C ,压力在 $1.56\sim 2.35\text{ GPa}$ 之间,属于低温型榴辉岩,这也和榴辉岩与蓝片岩共生相一致^[11]。

4 高压变质带与羌塘的构造演化

4.1 羌塘高压变质带的对比与延伸

带状分布的高压变质带是确定古俯冲带和板块缝合带的重要证据之一。羌塘中部高压变质带沿龙木错-双湖缝合带的南侧分布,西起红脊山,

经片石山、蓝岭、纳若,到双湖东侧的才多茶卡,延伸约 500 km 。有证据表明向东已经延伸到他念他翁和昌都的吉塘地区^[16,18,29]。再向南进入滇西,与澜沧江蓝片岩带^[30-31]共同构成一条断续延伸约 2000 km 的高压变质带。

羌塘高压变质带目前是青藏高原内部诸条造山带中唯一的蓝闪-榴辉岩相高压变质带^[11-13],羌塘中部榴辉岩的原岩为冈瓦纳北缘的石炭纪裂谷型沉积与洋壳型基性火山岩。大洋地壳岩石经历超高压变质的极为少见^[40-46],到目前为止洋壳岩石经历过超高压变质的只有西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas带和横贯于中亚的南天山造山带(吉尔吉斯斯坦境内的At-bashy、Makbal榴辉岩-蓝片岩带,中国的西南天山榴辉岩-蓝片岩带)^[46-49]。

在羌塘中部的榴辉岩中发现一个重要的地质现象,部分榴辉岩仍保留有玄武岩的气孔构造(图版 I-D),气孔呈密集的层状,有可能是原岩枕状构造的保留,同时也说明羌塘榴辉岩的形成条件有别于深俯冲的环境。它的形成与新疆西天山和北祁连的低温型榴辉岩类似^[50-52],而与青藏高原周缘产出的

表1 羌塘与昌都、滇西高压变质带矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年结果对比

Table 1 Comparison of mineral ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results for the Qiangtang, Qamdo and western Yunnan HP metamorphic belts

采样位置	岩石	矿物	坪年龄	资料来源
羌塘双湖纳若	蓝闪片岩	青铝闪石	222.5 Ma	李才(1997)
羌塘改则冈玛错	蓝闪片岩	蓝闪石	275 Ma	邓希光等(2000)
羌塘改则冈玛错	蓝闪片岩	蓝闪石	282 Ma	邓希光等(2000)
羌塘尼玛蓝岭东	蓝闪片岩	蓝闪石	222 Ma	Kapp et al(2003)
羌塘尼玛角木日西	蓝闪片岩	青铝闪石	220-223 Ma	Kapp et al(2003)
羌塘尼玛江爱藏布西	蓝闪片岩	青铝闪石	221 Ma	Kapp et al(2003)
羌塘尼玛片石山	石榴白云母片岩	多硅白云母	217 Ma	李才等(2006)
羌塘尼玛片石山	榴辉岩	多硅白云母	219 Ma	李才等(2006)
羌塘尼玛蓝岭东	白云母片岩	多硅白云母	215 Ma	李才等待刊数据
羌塘双湖恰格勒拉	阳起石片岩	阳起石	236 Ma	王立全等(2006)
昌都巴青巴青北	绿片岩	多硅白云母	230 Ma	王根厚等(2006)
昌都吉塘西西	阳起石片岩	多硅白云母	226 Ma	李才等待刊数据
滇西澜沧	蓝片岩	多硅白云母	238 Ma	赵靖等(1992)
滇西栗义	蓝片岩	蓝闪石	214 Ma	赵靖等(1994)
滇西栗义	蓝片岩	蓝闪石	279 Ma(视年龄)	赵靖等(1994)
滇西栗义	蓝片岩	蓝闪石	215 Ma(视年龄)	翟明国(1990)
滇西栗义	蓝片岩	多硅白云母	260-240 Ma (Rb-Sr)	周维全等(1990)

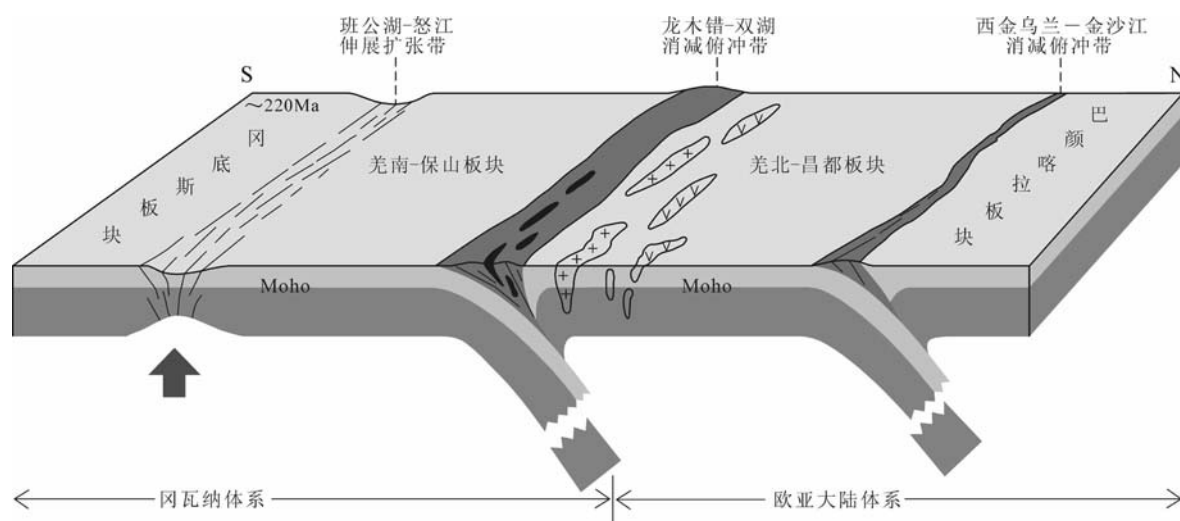


图3 羌塘中部晚三叠世构造结构模式

Fig. 3 Structure model of central Qiangtang in the Late Triassic

高温型榴辉岩差别很大^[53-63]。

4.2 羌塘地区构造演化讨论

根据高压变质矿物的定年研究结果,已经确定在晚三叠世发生了冈瓦纳与欧亚板块的碰撞闭合,羌塘中部榴辉岩-蓝片岩带是这次板块碰撞的产物。最近成都地质矿产研究所在双湖以东、才多茶卡以北的灰黑色硅质岩中获得大量晚泥盆世法门期的放射虫^[25],在双湖、角木日等地的硅质岩中获得了二叠纪的放射虫化石,在才玛尔错等地的硅质岩中获得三叠纪放射虫,初步认为羌塘中部古特提斯洋盆的形成时间至少是从晚泥盆世开始,并且持续演化到三叠纪;已经识别出的蛇绿岩有早古生代和中二叠世2个时代;高压变质岩早期为早二叠世,主期为晚三叠世;龙木错-双湖缝合带构成滇藏和扬子2个地层大区的界线^[14-15,64-68];代表冈瓦纳大陆北缘塔尔切冰期的冷水型生物和冰筏成因的冰海杂砾岩分布的北界为龙木错-双湖板块缝合带。综合这些资料,龙木错-双湖带是冈瓦纳大陆与欧亚大陆两大板块的缝合带。对于羌塘中部的构造演化,笔者提出羌塘地区古特提斯演化的6个阶段(一个完整的威尔逊旋回)显然过于简单化了^[4]。地球物理资料支持龙木错-双湖缝合带为冈瓦纳与欧亚大陆界线的观点,中国科学院吉隆-三个湖综合地球物理剖面、中美合作的双湖-龙尾错INDEPTH剖面和青藏油气勘探项目经理部所做的地球物理工作,得出近似的

结论:“沿鲁谷—俄久买—俄久卖—双湖存在一个重要的地球物理界线”(即龙木错-双湖缝合带的位置)^[69-71],羌南和羌北的电性结构有较大的差异,南北羌塘的高阻体也有较大的差异,南羌塘的高阻层厚度大、分块性明显,北羌塘高阻层较薄、厚度均匀、电阻率值偏低,反映出羌南与羌北基底性质及结构存在较大的差异^[69-72]。

4.3 羌塘晚三叠世构造结构设想

由于羌塘地质研究程度较低,对于三叠纪以前羌塘构造演化的时间轴、蛇绿岩时代与成分的相关性、羌塘可能存在的多次碰撞俯冲还缺乏充分的依据,这些正是亟待解决的关键问题。在以往资料的基础上,笔者提出羌塘中部地区晚三叠世的构造结构模式(图3),冈瓦纳板块向北消减俯冲,在217~223 Ma时期发生碰撞,发生高压变质作用和强烈的构造混杂,沿龙木错-双湖缝合带发育宽窄不等的构造混杂岩带,并且在仰冲板块一侧产生大规模的晚三叠世的钙碱性火山岩浆弧和S型花岗岩^[73-74]。三叠纪末龙木错-双湖蛇绿混杂岩带之上沉积了稳定的盖层^[13,75],与高压变质带岩石的定年结果共同记录了冈瓦纳与欧亚大陆完成拼合的历史。

本文参考了许多地质学家的科研成果,难免有阅读和理解上的欠缺,不当之处敬请谅解。

致谢:感谢肖序常院士、潘桂棠研究员等提供了大量的科学信息。

参考文献:

- [1] Hening A. Zur Petrographic and Geologie Von Sudwest Tibet[C]// Hedin S. Southern Tibet. Stockholm: 1915. Noratet, 5:220.
- [2] 李才. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, 17(2):155-166.
- [3] 胡克, 李才, 程立人, 等. 西藏冈玛错-双湖蓝片岩带及其构造意义[J]. 长春地质学院学报, 1995, 23(3):268-274.
- [4] Li Cai. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and its significance of the crossite from the blueschist in the Mid-Qiangtang area, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(1):88.
- [5] 鲍佩声, 肖序常, 王军, 等. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义[J]. 地质学报, 1999, 73(4):302-314.
- [6] Kapp P, YIN An, Manning C E. U-Pb geochronology of the Qiangtang metamorphic belt: Implications for crustal structure of northern Tibet[J]. Eos (Transactions, American Geophysical Union), 1999, 80:975.
- [7] Kapp P, YIN An, Manning C E, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. Geology, 2000, 28(1):19-22.
- [8] 邓希光, 丁林, 刘小汉, 等. 青藏高原原羌塘中部蓝片岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(4):517-525.
- [9] Kapp P, YIN An, Craig E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4):1043, doi:10.1029.
- [10] 陆济璞, 张能, 黄位鸿, 等. 藏北羌塘中部红脊山地区蓝闪石+硬柱石变质矿物组合的特征及意义[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2):70-75.
- [11] Li C, Zhai Q G, Dong Y S, et al. Discovery of eclogite and its significance from the Qiangtang area, central Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(9):1095-1100.
- [12] 李才, 翟庆国, 陈文, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J]. 岩石学报, 2006, 22(12):2843-2849.
- [13] 李才, 翟庆国, 陈文, 等. 青藏高原龙木错-双湖板块缝合带闭合的年代学证据——来自果干加山蛇绿岩与流纹岩 Ar-Ar 和 SHRIMP 年龄制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(5):911-918.
- [14] 李才, 程立人, 胡克, 等. 西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-131.
- [15] 李才, 程立人, 张以春, 等. 西藏羌塘南部发现奥陶纪-泥盆纪地层[J]. 地质通报, 2004, 23(5/6):602-604.
- [16] 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界[J]. 地学前缘, 2006, 13(4):1-12.
- [17] 李才, 翟庆国, 程立人, 等. 青藏高原原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J]. 地质通报, 2005, 24(4):295-301.
- [18] 李才, 翟庆国, 黄小鹏, 等. 龙木错-双湖缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J]. 地质通报, 2007, 23(1):13-21.
- [19] Wang G Z, Wang C S. Disintegration and age basement metamorphic rocks in Qiangtang, Tibet, China[J]. Science in China (Series D), 2001, 44(supp):86-93.
- [20] 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京:地质出版社, 2001:1-59.
- [21] 李才. 羌塘基底质疑[J]. 地质论评, 2003, 49(1):5-9.
- [22] 李才. 羌塘晚古生代地质与构造演化[J]. 西藏地质, 2005, 22:1-21.
- [23] 鲍佩声, 肖序常, 苏犁, 等. 西藏洞错蛇绿岩的构造环境: 岩石学、地球化学和年代学制约[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(3):298-307.
- [24] 李才, 和钟铎, 李惠民. 青藏高原南羌塘基性岩墙群 U-Pb 和 Sm-Nd 同位素定年及构造意义[J]. 中国地质, 2004, 31(4):384-389.
- [25] 朱同兴, 张启跃, 董瀚, 等. 藏北双湖地区才多茶卡一带构造混杂岩中发现晚泥盆世和晚二叠世放射虫硅质岩[J]. 地质通报, 2006, 25(12):1413-1418.
- [26] 翟庆国, 李才, 黄小鹏. 西藏羌塘中部古特提斯洋残片——来自果干加山变质基性岩地球化学证据[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(7):866-872.
- [27] 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构造意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12):22-24.
- [28] 黄小鹏, 李才, 翟庆国. 西藏羌塘中部玛依岗日地区印支期花岗岩的地球化学特征及其形成环境[J]. 地质通报, 2007, 26(12):1646-1653.
- [29] 王根厚, 贾建称, 王永平, 等. 藏东巴青县以北西西岩组构造片理形成及构造意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(4):1-8.
- [30] 赵靖, 钟大赉, 王毅. 滇西澜沧变质带的变质作用和变形的关系[J]. 岩石学报, 1994, 10(1):27-40.
- [31] Zhang R Y, Cong B L, Li Y G. Petrology of blueschists in western Yunnan province, China, and its Tectonic significance[J]. Science in China (Series B), 1990, 33(9):1110-1123.
- [32] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原羌塘中部发现榴辉岩及其意义[J]. 科学通报, 2006, 51(1):70-74.
- [33] Coleman R G, Lee L D, Beatty L B, et al. Eclogites and eclogites: their differences and similarities[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 1965, 76:483-508.
- [34] 邓希光, 丁林, 刘小汉, 等. 藏北羌塘中部冈玛日-桃形错蓝片岩的发现[J]. 地质科学, 2000, 35(2):227-232.
- [35] 邓希光, 丁林, 刘小汉, 等. 青藏高原羌塘中部冈玛日地区蓝闪石片岩及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. 科学通报, 2000, 45(21):2322-2326.
- [36] 翟庆国, 李才, 董永胜, 等. 西藏羌塘中部榴辉岩同位素年代学、地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2008, 待刊.
- [37] Ravna E J K, Terry M P. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists—an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22:579-592.
- [38] Ellis D J, Green E H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria[J]. Contribution Mineralogy and Petrology, 1979, 71:13-22.
- [39] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited[J]. J. Metamorph. Geol., 1985, 3:231-243.
- [40] Coleman R G, Wang X. Overview of the geology and tectonics of UHPM[C]//Coleman R G, Wang X. Ultrahigh-pressure Metamorphism. Cambridge, 1995:1-32.
- [41] Schreyer W. Ultradeep metamorphic rocks, the retrospective viewpoint[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100:8353-8366.

- [42] Lion J G, Zhang R Y, Ernst W G, et al. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks [C]//Paul L Ribbe. Ultrahigh-pressure Mineralogy, Physics and Chemistry of the Earth Deep Interior. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 1998, 37:33–138.
- [43] Carswell D A, Compagnoni R. Introduction with review of the definition, distribution and geotectonic significance of ultrahigh pressure metamorphism[C]//Carswell, Compagnoni. Ultrahigh Pressure Metamorphism. Eotvos University Press, Budapest, 2003:3–9.
- [44] Davies J H, Von Blanckenburg F. Slab breakoff, a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 129: 85–102.
- [45] Lion J G, Tsujimori T, Zang R Y, et al. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan Model [J]. Intl. Geol. Rev., 2004, 46:1–27.
- [46] Zhang L F, Ellis D J, Jiang W. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites[J]. American Mineralogist, 2002, 87:853–860.
- [47] Zhang L F, Ellis D J, Williams S, et al. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: evidence from magnetite in eclogite[J]. American Mineralogist, 2002, 87:861–866.
- [48] Zhang L, Song S, Song B, et al. SHRIMP U–Pb, zircon, dating of HP–UHP metamorphic rocks from Western Tianshan, China. Abstract of the Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Field Symposium[J]. NGU report, 2003, 055:180.
- [49] Gao Jun, Zhang Lifei, Liu Wei. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the western Tianshan Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (11):1047–1052.
- [50] Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11: 523–536.
- [51] Gao J, Klemd R. Formation of HP–LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and constraints[J]. Lithos, 2003, 66:1–22.
- [52] Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47:435–455.
- [53] Pognant U, Spencer D A. First record of eclogites from the Himalayan belt, Kaghan valley, Northern Pakistan[J]. Eur. J. mineral., 1991, 3:613–618.
- [54] Zhang L F, Song S G, Ai Y L, et al. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China[J]. American Mineralogist, 2005, 89:180–186.
- [55] Tonarini S, Villa I, Oberli F. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: implication for India–Eurasian collision [J]. Tectonophysics, 1993, 215:13–27.
- [56] Guillot S, Lardeaux J M, Mascle G. Un nouveau témoin du métamorphisme de haute pression dans la chaîne Himalayenne: les eclogites rétrogradées du Dôme du Tso Moriri (East Ladakh, Himalaya) [J]. C. R. Acad. Sci. Paris, 1995, 32(a): 931–936.
- [57] Le Fort P, Guillot S, Pecher A. HP metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya: new discoveries and significance [J]. C. R. Acad. Sci. Paris, 1997, 325:773–778.
- [58] 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报, 1996, 41(16): 1485–1488.
- [59] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报, 1998, 43(14): 154–1549.
- [60] Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China [J]. Sciences de la Terre et Des Planètes, 2001, 333:719–724.
- [61] Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Evidence for UHP metamorphism of eclogite from the Altun Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47:751–755.
- [62] Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of coesite-bearing UHP terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21:631–644.
- [63] Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China [J]. Lithos, 2003, 70:195–211.
- [64] 范影年. 中国石炭—二叠纪皱纹珊瑚的地理区系 [C]//青藏高原地质文集(16). 北京:地质出版社, 1985:87–106.
- [65] 范影年. 西藏石炭系 [M]. 重庆:重庆出版社, 1988:1–128.
- [66] 西藏地质矿产局. 西藏自治区区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1993:19–21.
- [67] 李才, 程立人, 胡克, 等. 西藏羌塘南部地区的冰海杂砾岩及其成因 [J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(4): 368–73.
- [68] 梁定益, 裴泽同, 宋志敏. 早二叠世冈瓦纳北缘构造古地理环境与杂砾岩成因剖析 [J]. 特提斯地质, 1994, 18:61–69.
- [69] 张胜业, 魏胜, 王家映, 等. 西藏羌塘盆地大地电磁测深研究 [J]. 地球科学, 1996, 21(2): 198–202.
- [70] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理剖面和岩石圈结构与动力学 [J]. 科学通报, 1999, 44(12): 1257–1265.
- [71] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究 [J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 308–315.
- [72] 赵文津, 刘葵, 蒋忠惕, 等. 西藏班公湖—怒江缝合带——深部地球物理结构给出的启示 [J]. 地质通报, 2004, 23(7): 623–635.
- [73] 王剑, 汪正江, 陈文西, 等. 藏北羌塘盆地那底岗日组时代归属的新证据 [J]. 地质通报, 2004, 23(4): 404–409.
- [74] 翟庆国, 李才. 藏北羌塘菊花山那底岗日组火山岩锆石 SHRIMP 定年及其意义 [J]. 地质学报, 2007, 81(6): 795–800.
- [75] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原羌塘中部果干加年山上三叠统望湖岭组的建立及意义 [J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1003–1008.