

班公湖-怒江结合带洞错地区舍拉玛高压麻粒岩的发现及其地质意义

王保弟^{1,2}, 王立全^{1,2}, 许继峰³, 陈莉^{1,2}, 赵文霞⁴, 刘函^{1,2},
彭头平⁵, 李小波^{1,2}

WANG Baodi^{1,2}, WANG Liqun^{1,2}, XU Jifeng³, CHEN Li^{1,2}, ZHAO Wenxia⁴,
LIU Han^{1,2}, PENG Touping⁵, LI Xiaobo^{1,2}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;
2. 中国地质调查局青藏高原地质研究中心, 四川 成都 610081;
3. 中国科学院广州地球化学研究所/同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
4. 中山大学测试中心, 广东 广州 510275;
5. 福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013

1. Chengdu Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;
2. Research Center for Tibetan Plateau Geology, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;
3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;
4. Instrumental Analysis and Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
5. Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, Fujian, China

摘要:青藏高原班公湖-怒江结合带内中东段八宿、安多、蓬措西等地已有高压-超高压变质岩的报道,然而西段至今尚没有发现类似岩石出露。在班公湖-怒江西段改则洞错地区舍拉玛沟中发现高压麻粒岩(可能是退变榴辉岩),岩石呈透镜状、似层状或块状产于斜长角闪岩及变质辉长岩中,详细的岩相学及矿物化学研究确认,早期矿物组合主要为石榴子石、单斜辉石及斜长石(大部分钠黝帘石化),后期发生了较强烈的退变质作用,矿物组合为角闪石和斜长石,发育典型的“白眼圈”结构。利用LA-ICP-MS锆石U-Pb方法获得高压麻粒岩的原岩时代为 254 ± 2 Ma,指示班公湖-怒江洋盆打开的时限可以追溯到晚二叠世。地质温压计估算结果表明,高压麻粒岩相变质作用发生的温度和压力条件为 $780\sim 900^{\circ}\text{C}$ 和 $13\sim 16\text{kPa}$,角闪岩相变质作用发生的温度和压力条件为 $430\sim 480^{\circ}\text{C}$ 和 $4.5\sim 5.2\text{kPa}$,极有可能是班公湖-怒江特提斯洋壳发生高压麻粒岩相(甚至达到榴辉岩相)变质作用的产物。它的发现说明在班公湖-怒江结合带内部存在高压变质带,可能是大洋深俯冲的产物,这对研究青藏高原特提斯洋的形成演化具有重要意义。

关键词: 高压麻粒岩; 高压-超高压变质带; 西藏洞错; 班公湖-怒江结合带; 青藏高原

中图分类号: P588.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2015)09-1605-12

Wang B D, Wang L Q, Xu J F, Chen L, Zhao W X, Liu H, Peng T P, Li X B. The discovery of high-pressure granulite at Shelama in Dongco area along the Bangong Co-Nujiang River suture zone and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(9): 1605-1616

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2015-06-23

资助项目: 四川省基金项目(编号: 2014JQ0025)、国家自然科学基金项目(批准号: 41272091、41303028)和中国地质调查局项目(编号: 12120114020601、1212011121262)

作者简介: 王保弟(1975-), 男, 博士, 副研究员, 从事青藏高原地质研究工作。E-mail: baodiwang@163.com; wbaodi@cgs.cn

Abstract: A high pressure metamorphic (HP) and ultrahigh pressure metamorphic (UHP) belt is exposed in Baxoi, Amdo and Pengco areas along the middle-eastern Bangongco-Nujiang suture zone (BNSZ). However, the similar HP-UHP metamorphic rocks have not discovered in the western section of BNSZ. In this paper, the authors first report the high-pressure granulite (probably retrograde eclogite) at Dongco area in the western section of the BNSZ. Dongco high-pressure granulite occurs in lenticular, stratoid and massive forms in plagioclase amphibolites and metamorphic gabbros. Based on the intensive study of petrology and mineralogical geochemistry, the authors hold that the HP granulite was made up of the early mineral assemblage of garnet (Grt)+clinopyroxene (Cpx) + plagioclase (Pl) (mostly saussuritized) and the late massive retrograde mineral assemblages amphibole (Hb)+plagioclase (Pl). Garnets in high-pressure granulites are surrounded by plagioclase which forms the corona. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded the age of original rock from the high-pressure granulite of 254 ± 2 Ma, indicating that the opening time of Bangong Co-Nujiang River oceanic basin can be traced to the Late Permian. Geological temperature pressure indicator shows that the temperature-pressure conditions of high-pressure granulite phase are $780 \sim 900^\circ\text{C}$, $13 \sim 16$ kPa, while those of retrogressive metamorphic amphibolite phase are $430 \sim 480^\circ\text{C}$, $4.5 \sim 5.2$ kPa, respectively, suggesting that the high-pressure granulites were most likely the product of granulite facies (even eclogite facies) high pressure metamorphism of the Bangong Co-Nujiang River Tethyan oceanic crust. The discovery of Dongco high pressure granulites shows that a high-pressure metamorphic belt might exist within the BNSZ, and might have been formed by the deep subduction of the Bangong Co-Nujiang River Tethyan Ocean. Further study of the high-pressure granulites is of great significance for recognizing the deep subduction process, continent-continent collision orogeny and the tectonic evolution of BNSZ in the Tibetan Plateau.

Key words: high-pressure granulites; HP-UHP metamorphic belt; Tibetan Dongco; Bangong Co-Nujiang River suture zone; Tibetan Plateau

造山带中高压-超高压变质岩是古俯冲带及古板块缝合带的重要标志,记录了地壳(陆壳或洋壳)物质俯冲、折返的构造演化过程。高压-超高压变质岩成为甄别(超)高压变质作用和认识岩石圈深俯冲作用的关键^[1]。前人在班公湖-怒江结合带中西段陆续发现了高压-超高压变质作用的产物,例如西藏八宿高压变质岩^[1-5]、巴青高压变质岩^[6]、安多麻粒岩^[7-11]及蓬错石榴辉岩相蛇绿岩^[12],但是在班公湖-怒江结合带西部一直未见关于(超)高压变质岩的报道,使得研究人员难以深入认识整个班公湖-怒江洋盆扩张-俯冲消减-闭合的演化历史与动力学过程。成都理工大学2013年在1:5万改则东区域地质调查中发现了一处疑似退变榴辉岩的出露地点^①，“青藏高原重大地质问题区区域地质专项调查”项目组在联合地质考察中首次在洞错北侧的舍拉玛沟中发现高压麻粒岩类岩石。通过对所采集系列样品的岩相学及矿物化学研究,确定其为高压麻粒岩,至少遭受了两期以上的变质作用改造,绝大部分样品已完全转变为石榴子石角闪岩,并利用LA-ICP-MS锆石U-Pb方法限定了其原岩形成年龄。本文将重点介绍该高压麻粒岩的岩石学和矿物学基本特征,进一步讨论其大地构造意义。

1 区域地质及野外地质特征

青藏高原是新生代印度板块与欧亚板块碰撞

的产物,由一系列近东西向的构造地块拼贴而成,由北往南依次是松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块(冈底斯地块)与喜马拉雅地块^[13-14],中间依次为金沙江结合带、班公湖-怒江结合带、雅鲁藏布江结合带(图1-a)。班公湖-怒江结合带主体由规模巨大的蛇绿岩与蛇绿混杂岩组成,在结合带中段与东段还有东卡错、聂荣、嘉玉桥等岛弧-变质地块呈菱形或近菱形展布其中,地块两侧均为蛇绿混杂岩带及强烈变形带所围限,局部见蛇绿岩碎块^[16-19]。

洞错蛇绿混杂岩主要出露于改则县洞错以北,去申拉以南,总体走向北西西,延伸逾100km,断续出露。蛇绿岩形态呈不规则状、长条状、透镜状等,侵位于侏罗纪木嘎岗日岩群中(图1-b)。洞错舍拉玛沟、拉他沟中蛇绿岩层序比较完整,主要由变质橄榄岩、深成杂岩、堆晶岩、枕状熔岩、岩墙(群)、斜长花岗岩、放射虫硅质岩等构造单元组成,多已被构造肢解,其中堆晶岩构造单元尤为发育,由一套含长超镁铁岩-含长纯橄岩-长橄岩-橄长岩-含长橄岩-镁铁质堆晶岩-层状辉长岩组成^[20],具明显的层状构造,但缺失韵律,均质辉长岩较常见。蛇绿混杂岩中常见洋岛岩块、火山岩岩块、外来砂岩岩块、外来灰岩岩块混杂其中,相互之间皆为断层接触,接触部位常见强烈的劈理化带(图1)。

新发现的洞错麻粒岩出露于舍拉玛沟(图1-

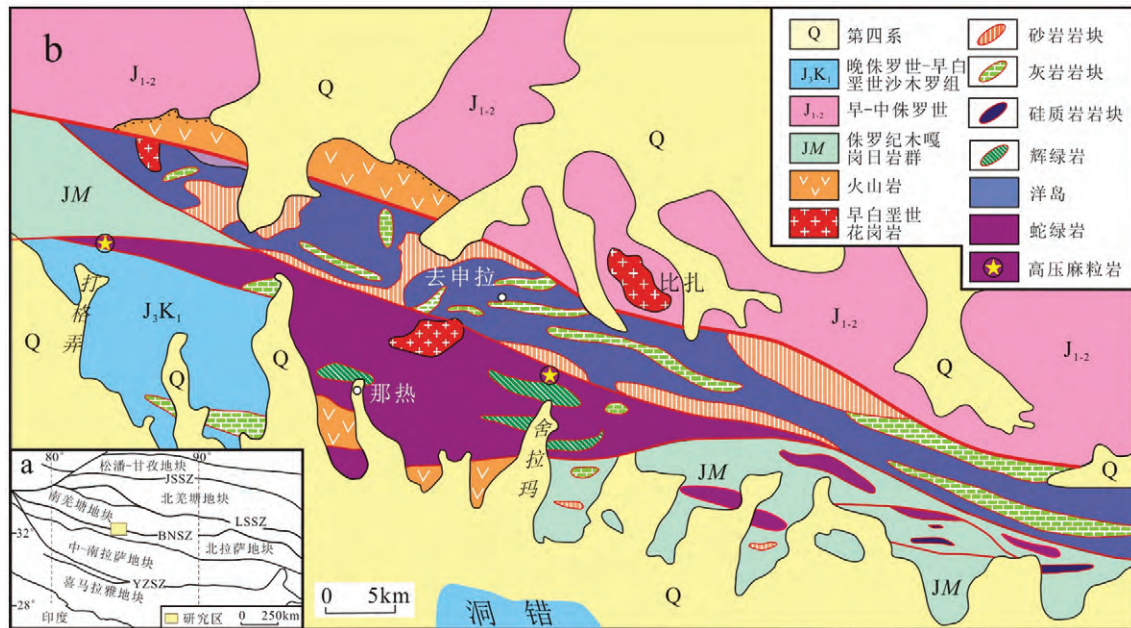


图 1 青藏高原构造格架(a)和改则县洞错地区地质简图(b)(据参考文献[15]修改)

Fig. 1 Tectonic outline of the Tibetan Plateau (a) and simplified geological map of Dongco ophiolite in Gerze County in Tibet (b)

JSSZ—金沙江结合带;LSSZ—龙木错-双湖结合带;BNSZ—班公湖-怒江结合带;YZSZ—雅鲁藏布江结合带

b), 采样位置 GPS 坐标为 N 32°19'39"、E 84° 44'11", 近东西向展布, 向西可与达格弄沟高压变质岩——榴闪岩(退变榴辉岩)^①相连, 断续出露长度超过 30km, 宽 0.2~0.5km, 呈构造透镜体、似层状或块状产于斜长角闪岩或变质辉长岩中(图 2、图 3-a), 局部地段可见与变质橄榄岩直接构造接触, 其长轴方向与围岩的片理一致。该麻粒岩与洞错蛇绿混杂岩的碳酸盐化超基性岩和辉长岩岩块、变质橄榄岩岩块、侏罗纪木嘎岗日群深海浊积岩相复理石建造

及晚侏罗世—早白垩世沙木罗组斜坡相陆源碎屑岩等呈断层接触, 并被晚白垩世竟柱山组陆相磨拉石建造角度不整合覆盖(图 1-b)。洞错麻粒岩野外呈墨绿色地貌, 手标本呈绿黑色, 岩石矿物呈半定向排列, 与区域片理方向一致; 石榴子石呈淡红色, 含量 10%~20%, 粒径大小一般小于 1~2mm(图 3-b), 个别可达 3~5mm(图 3-c), 局部可见石榴子石具有明显的“白眼圈”结构(图 3-d), 反映了岩石受到后期退变质作用的改造。

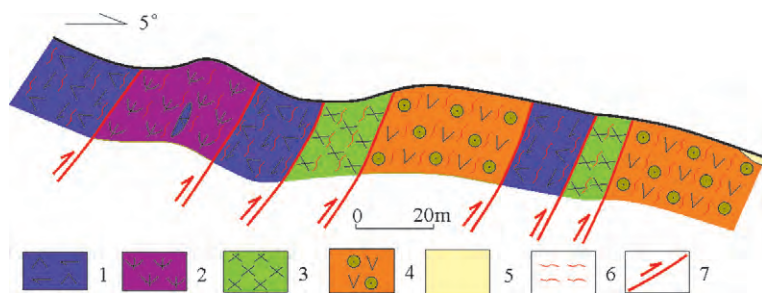


图 2 洞错高压麻粒岩剖面

Fig. 2 Geological section of the high-pressure granulite in Dongco area

1—橄辉岩;2—蛇纹石化变质橄榄岩;3—变质辉长岩;4—高压麻粒岩;5—第四系;6—劈理化带;7—逆冲断层

2 岩相学及矿物化学

矿物成分分析在成都地质调查中心测试室完成, 所用仪器为日本岛津 EPMA-1600 型电子探针仪, 测试条件为加速电压 15kV, 束电流 20nA, 束斑 5 μm, 标样为硅酸盐氧化物。样品采自洞错舍拉玛沟麻粒岩出露地的不同位置, 矿物成分列于表 1, 矿物端元组分计算使用 GeoKit 程序^[21]。显微镜下观察洞错

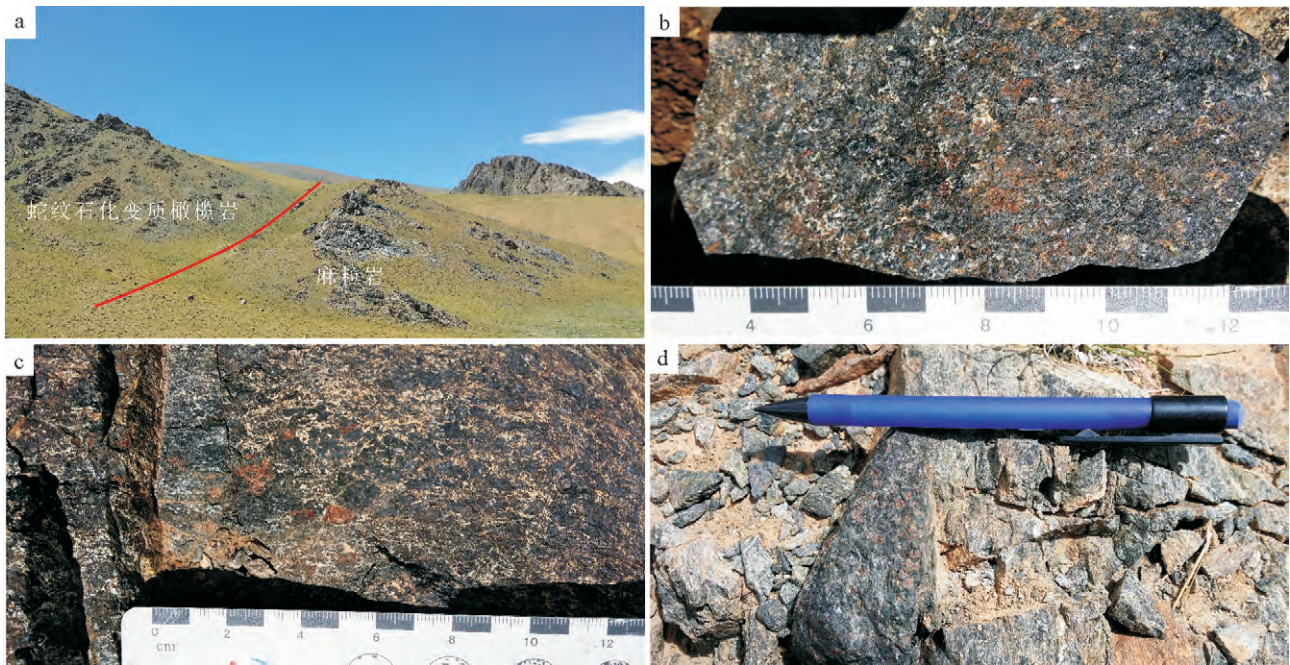


图3 洞错高压麻粒岩的野外特征

Fig. 3 Photographs showing field characteristics of high-pressure granulite in Dongco area

a—洞错麻粒岩野外产出特征;b、c—麻粒岩野外照片,可见淡红色粒状石榴子石,发生轻微退变质;d—石榴子石“白眼圈”结构,退变质明显

麻粒岩的岩相学及矿物化学特征如下。

洞错麻粒岩呈绿黑色,石榴子石呈淡粉红色,中细粒粒状变晶结构,块状构造。显微镜下矿物成分为石榴子石(15%~20%)、单斜辉石(20%~25%)、角闪石(30%~40%)、斜长石(15%~20%)、石英、钠黝帘石和绿泥石(共计5%~8%),副矿物主要为磷灰石(小于1%),其中角闪石、斜长石、钠黝帘石为退变质作用的产物(图4)。主要矿物粒度一般为1~2mm,个别达3~5mm。矿物大体可划分为2个世代,早期矿物主要为石榴子石、单斜辉石、强烈蚀变的斜长石等,晚期矿物主要为角闪石和斜长石。

石榴子石:多呈自形粒状、粒状集合体或残留状(图4-a、b),普遍具有斜长石或斜长石+角闪石后成合晶组成的退变边,显示“白眼圈”结构(图4-c、d),并被晚期绿泥石、绿帘石交代。矿物化学分析结果显示(表1),核部与边部化学成分特征大体相同,成分环带不明显。铁铝榴石(Alm)含量主要为44%~50%,镁铝榴石(Pyr)大多在15%~24%之间,钙铝榴石(Gro)含量较高,主要集中在21%~33%之间,锰铝榴石(Spe)含量低,主要在1.6%~3.2%之间(表1),说明基本仍

处于平衡状态,反映变质作用峰期成分特点。在Alm-Gro-Pyr图解(图5-a)中,投影点集中在麻粒岩相石榴子石成分的C区,集中靠近麻粒岩相区,说明洞错地区的石榴子石为麻粒岩相的变质石榴子石,同时属于C型榴辉岩石榴子石(图5-b),靠近羌塘中部榴辉岩石榴子石区^[22-25]。

单斜辉石呈浅绿色,短柱状,镜下无色或浅绿色(图4),与石榴子石颗粒大小基本一致。矿物化学成分较均匀,不同矿物颗粒成分无明显变化,FeO含量13.13%~14.62%,MgO为10.89%~11.29%,CaO为11.04%~12.08%,Na₂O含量较低,为1.50%~1.89%。根据化学成分的计算结果,可以确定分子式是CaMgSi₂O₆,为透辉石,其中硅灰石(Wo)为28%~29%,顽火辉石(En)为37%~39%,铁辉石(Fs)为26%~27%,锥辉石(Ac)为6%~8%,同时所有单斜辉石存在少量的硬玉(Jd)分子(0.02%~0.10%)(表1)。

角闪石呈蓝绿色,绿色-棕黄色-黄色多色性明显,呈半自形板柱状或其他形分布于石榴子石和单斜辉石的周围,为主要的退变质产物。角闪石的存在方式主要有2种,一种是单独的矿物形态,另一种是与

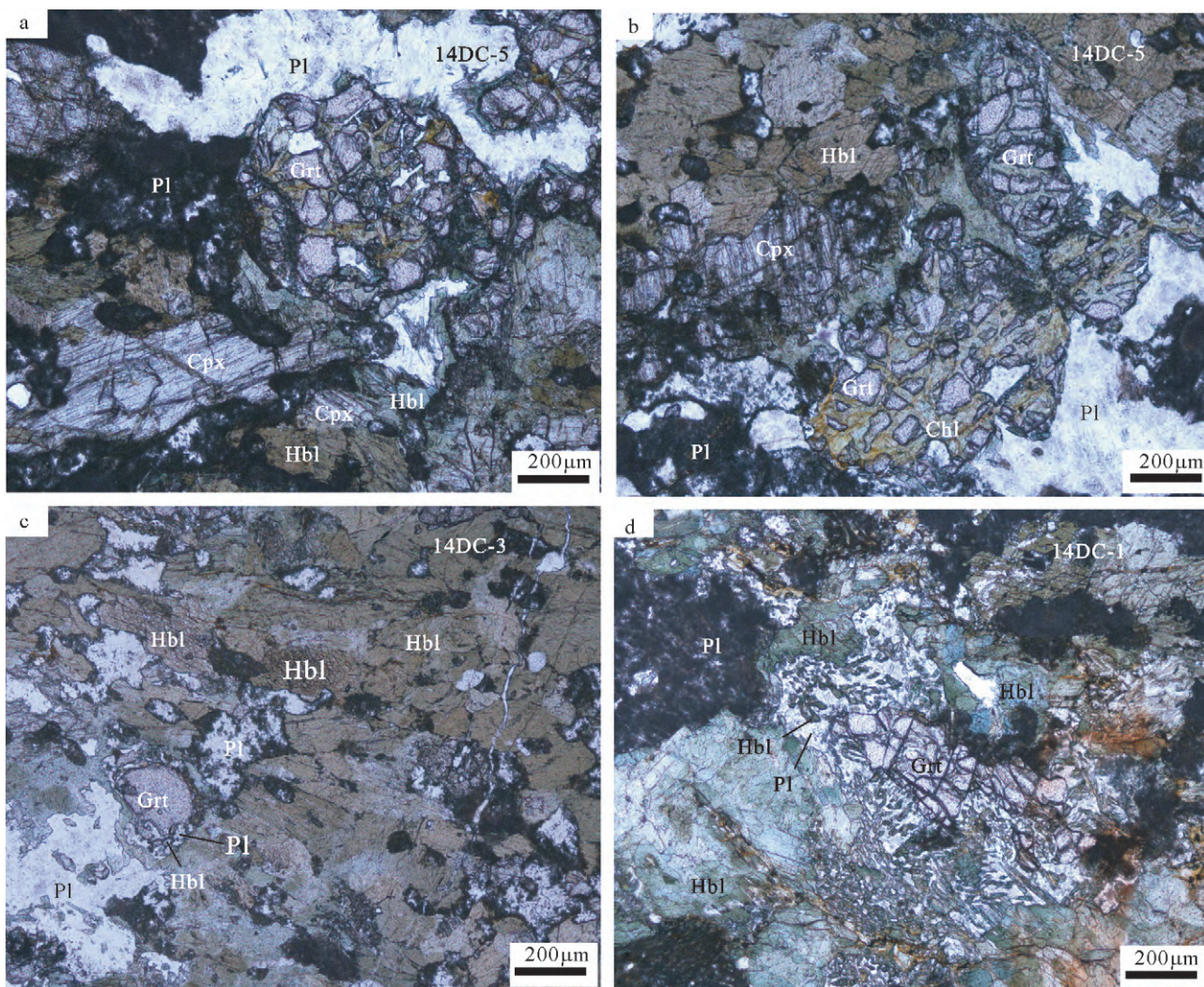


图 4 洞错高压麻粒岩的岩相学特征

Fig. 4 Petrographic characteristics for high-pressure granulite in Dongco area
 a、b—麻粒岩中石榴子石、单斜辉石均呈残留状,Grt被Chl交代,呈碎粒状;c、d—麻粒岩
 中石榴子石具有斜长石+角闪石退变边,显示“白眼圈”结构;Grt—石榴子石;
 Cpx—单斜辉石;Hbl—角闪石;Pl—斜长石;Chl—绿泥石

斜长石一起构成后成合晶,形成石榴子石的环边,是单斜辉石退变的产物。两类角闪石的粒径差别比较大,前者较大,粒径0.2~1mm,后者较小,小于0.1mm(图4)。对第一种矿物形态的角闪石进行了矿物化学分析,成分变化不大,TiO₂含量为0.33%~1.60%,FeO为9.98%~16.71%,MgO为10.69%~12.30%,NaO₂为0.54%~1.79%。

斜长石多呈灰白色,常分布在石榴子石和单斜辉石之间,主要有2种分布状态,第一种矿物颗粒较大,矿物受后期蚀变影响严重,表面显示较强的钠黝帘石

化,显示深色的板状晶型,该形态的斜长石常与石榴子石、单斜辉石的颗粒大小一致(图4),表明它们是同一世代的平衡矿物。另外一种斜长石多呈不规则状,颗粒大小一般比石榴子石、单斜辉石小,有的还与角闪石形成后成合晶,指示它们很可能为角闪岩相后期退变质作用的产物,而不是早世代的矿物组合。对2种类型的斜长石都做了少量的矿物化学分析,计算结果显示几乎皆为钠长石(Ab),钙长石(An)与钾长石(Or)含量极少,含量小于1%(表1),反映岩石明显受到后期蚀变的强烈影响。

表1 高压麻粒岩组成矿物的电子探针分析结果

Table 1 Mineral composition of HP-granulite

样品编号	14DC-1-1	14DC-1-2	14DC-1-3	14DC-1-4	14DC-5-1	14DC-5-2	14DC-5-3	14DC-5-4	14DC-5-5
矿物	石榴子石(Grt)								
SiO ₂	39.20	40.22	38.82	40.29	38.65	37.50	36.40	38.45	38.74
TiO ₂	0.32	0.28	0.30	0.224	0.17	0.21	0.33	0.10	0.11
Al ₂ O ₃	20.78	20.58	20.51	20.78	20.59	21.63	18.81	19.84	20.68
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.05	0.00	0.08	0.00	0.04	0.00	0.02
FeO	22.95	22.47	22.37	22.66	23.28	23.02	19.31	22.05	21.56
MnO	0.94	0.92	0.88	0.95	0.73	0.95	0.81	0.70	1.42
MgO	6.00	5.96	5.90	5.93	6.09	4.37	4.08	5.66	3.82
CaO	9.68	9.72	9.78	9.74	8.56	12.62	11.04	11.55	13.28
总量	99.91	100.18	98.57	100.57	98.14	100.29	90.82	98.35	99.63
Si	3.0258	3.0813	3.0335	3.0764	3.0363	2.9220	3.0841	3.0173	3.0207
Ti	0.0187	0.0163	0.0173	0.0129	0.0098	0.0121	0.0212	0.0059	0.0063
Al	1.8901	1.8582	1.8891	1.8706	1.9063	1.9861	1.8785	1.8352	1.9007
Cr	0.0022	0.0008	0.0028	0.0000	0.0052	0.0000	0.0028	0.0000	0.0012
Fe ³⁺	0.0780	0.0760	0.0742	0.0699	0.0577	0.0578	0.0485	0.1493	0.0800
Fe ²⁺	1.4034	1.3639	1.3879	1.3770	1.4717	1.4420	1.3195	1.2979	1.3258
Mn	0.0615	0.0600	0.0584	0.0615	0.0484	0.0628	0.0581	0.0464	0.0937
Mg	0.6900	0.6808	0.6876	0.6753	0.7135	0.5074	0.5147	0.6616	0.4440
Ca	0.8006	0.7978	0.8152	0.7970	0.7204	1.0537	1.0024	0.9709	1.1094
Ura	0.11	0.04	0.14	0.00	0.26	0.00	0.15	0.00	0.06
And	3.96	3.93	3.77	3.60	2.93	2.83	2.51	7.52	4.04
Pyr	23.35	23.45	23.32	23.20	24.15	16.55	17.78	22.23	14.94
Spe	2.08	2.07	1.98	2.11	1.64	2.05	2.01	1.56	3.15
Gro	23.02	23.52	23.73	23.78	21.19	31.54	31.97	25.09	33.22
Alm	47.48	46.99	47.06	47.31	49.82	47.03	45.58	43.60	44.60
矿物	斜长石(Pl)								
SiO ₂	68.90	68.84	68.81	68.41	68.49	68.59	69.73	70.12	70.42
Al ₂ O ₃	18.95	19.47	19.21	19.24	18.94	18.53	19.28	19.22	19.01
CaO	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06	0.04
Na ₂ O	11.36	11.54	11.50	11.55	11.14	11.14	11.50	11.35	11.30
K ₂ O	0.08	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
Si	3.0220	3.0036	3.0123	3.0060	3.0220	3.0357	3.0197	3.0274	3.0379
Al	0.9794	1.0012	0.9908	0.9963	0.9850	0.9663	0.9840	0.9780	0.9662
Ca	0.0018	0.0019	0.0006	0.0014	0.0014	0.0009	0.0010	0.0027	0.0018
Na	0.9659	0.9763	0.9758	0.9838	0.9531	0.9556	0.9654	0.9496	0.9447
K	0.0042	0.0019	0.0013	0.0003	0.0010	0.0010	0.0017	0.0015	0.0016
An	0.19	0.20	0.06	0.14	0.15	0.09	0.11	0.29	0.19
Ab	99.38	99.61	99.81	99.83	99.75	99.80	99.72	99.56	99.64
Or	0.43	0.20	0.14	0.03	0.11	0.11	0.18	0.16	0.17
样品编号	14DC-1-1	14DC-1-2	14DC-1-3	14DC-1-4	14DC-5-1	14DC-5-2	14DC-5-3		
矿物	单斜辉石(Cpx)								
SiO ₂	45.52	45.11	44.97	45.84	45.32	43.71	45.43		
TiO ₂	1.34	1.29	1.15	1.15	1.47	1.50	1.71		
Al ₂ O ₃	12.49	11.67	10.92	11.02	11.95	11.67	11.98		
Cr ₂ O ₃	0.06	0.03	0.02	0.03	0.02	0.07	0.05		
FeO	14.44	14.60	14.43	14.62	13.87	13.13	13.85		

续表-1

样品编号	14DC-1-1	14DC-1-2	14DC-1-3	14DC-1-4	14DC-5-1	14DC-5-2	14DC-5-3
矿物	单斜辉石(Cpx)						
MnO	0.08	0.03	0.13	0.10	0.06	0.11	0.04
MgO	11.26	11.23	11.15	11.18	10.89	11.10	11.06
CaO	11.55	12.00	12.05	12.08	12.06	11.04	11.77
Na ₂ O	1.89	1.71	1.64	1.45	1.66	1.76	1.64
K ₂ O	0.13	0.10	0.11	0.10	0.09	0.11	0.10
Si	1.7238	1.7300	1.7481	1.7591	1.7378	1.7299	1.7358
Al(IV)	0.2762	0.2701	0.2519	0.2409	0.2622	0.2701	0.2642
Al(VI)	0.2814	0.2576	0.2483	0.2575	0.2779	0.2740	0.2751
Ti	0.0381	0.0371	0.0335	0.0331	0.0423	0.0447	0.0492
Cr	0.0019	0.0008	0.0005	0.0008	0.0006	0.0021	0.0014
Fe ³⁺	0.0914	0.1039	0.0972	0.0491	0.0405	0.0677	0.0234
Fe ²⁺	0.3625	0.3603	0.3680	0.4184	0.4030	0.3646	0.4185
Mn	0.0026	0.0008	0.0043	0.0033	0.0019	0.0035	0.0014
Mg	0.6358	0.6452	0.6461	0.6394	0.6223	0.6548	0.6300
Ca	0.4687	0.4930	0.5018	0.4967	0.4957	0.4682	0.4818
Na	0.1384	0.1274	0.1237	0.1114	0.1236	0.1351	0.1213
K	0.0063	0.0049	0.0056	0.0049	0.0044	0.0056	0.0050
Wo	27.58	28.49	28.82	28.91	29.38	27.64	28.74
En	37.41	37.28	37.11	37.21	36.89	38.66	37.58
Fs	26.86	26.87	26.97	27.40	26.40	25.73	26.44
Ac	8.14	7.36	7.10	6.48	7.33	7.98	7.23
Jd	0.05	0.02	0.03	0.06	0.08	0.07	0.10
样品编号	14DC-1-1	14DC-1-2	14DC-1-3	14DC-5-1	14DC-5-2	14DC-5-3	
矿物	角闪石(Hb)						
SiO ₂	49.69	45.22	44.63	47.44	45.14	50.33	
TiO ₂	0.33	1.51	1.60	1.19	1.33	0.33	
Al ₂ O ₃	4.33	11.68	12.03	9.53	13.05	3.87	
FeO	9.98	14.17	13.55	14.64	14.25	16.71	
MnO	0.09	0.04	0.08	0.14	0.15	0.23	
MgO	12.07	10.96	11.37	12.30	10.99	12.21	
CaO	20.83	11.79	11.94	12.70	13.08	12.49	
Na ₂ O	0.55	1.56	1.79	1.39	1.71	0.54	
K ₂ O	0.03	0.13	0.11	0.10	0.10	0.04	
Si	7.2883	6.6755	6.5850	6.8525	6.5081	7.5028	
Al ^{IV}	0.7117	1.3245	1.4150	1.1475	1.4919	0.4972	
Al ^{VI}	0.0363	0.7072	0.6771	0.4743	0.7260	0.1826	
Ti	0.0363	0.1679	0.1777	0.1296	0.1447	0.0367	
Fe ³⁺	0.6173	0.6240	0.5429	0.5897	0.5130	0.7976	
Fe ²⁺	0.6070	1.1249	1.1290	1.1788	1.2052	1.2859	
Mn	0.0108	0.0051	0.0096	0.0176	0.0182	0.0290	
Mg	2.6391	2.4118	2.5018	2.6483	2.3620	2.7126	
Ca	3.2731	1.8644	1.8873	1.9652	2.0204	1.9944	
Na	0.1573	0.4462	0.5106	0.3879	0.4791	0.1555	
K	0.0054	0.0243	0.0211	0.0188	0.0184	0.0082	

注:石榴子石(Gr)、单斜辉石(Cpx)、角闪石(Hb)和斜长石(Pl)阳离子数分别以 12、6、23 和 8 个氧原子为基础计算

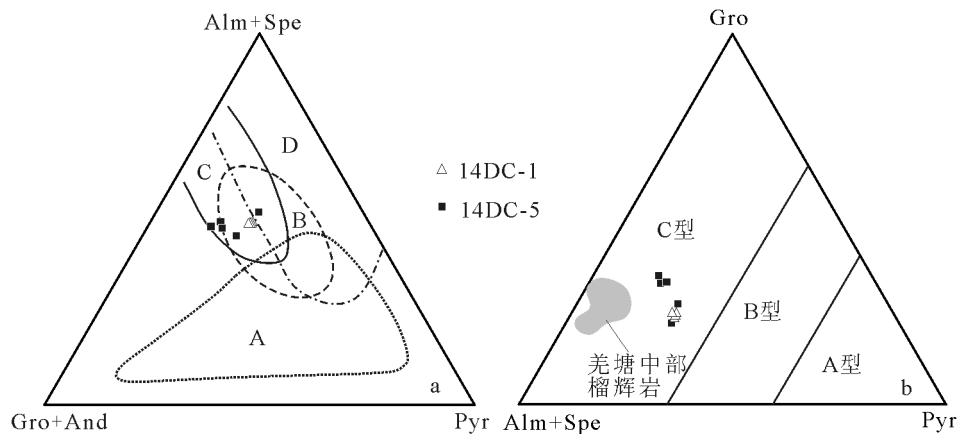


图5 麻粒岩相及榴辉岩相中的石榴子石(a)和石榴子石成分图解(b)

(羌塘中部榴辉岩数据据参考文献[22-25])

Fig. 5 Maps of garnet in granulite and eclogitic facies (a) and composition of garnets (b)

a中A、B、C分别为科尔曼3种榴辉岩成因类型石榴子石成分区,D为麻粒岩相石榴子石成分区;b中3种石榴子石据参考文献[26]定义

综合岩相学、矿物化学的研究结果,笔者认为洞错地区的麻粒岩至少经历了2期变质作用,早期的变质平衡矿物组合为石榴子石+单斜辉石+斜长石,晚期的退变质矿物组合为角闪石+斜长石。

3 变质作用期次与变质作用温压条件估算

上述岩相学及矿物化学对不同样品中的矿物成分及相互关系研究显示,洞错区麻粒岩至少经历了2期变质作用。

第一期变质作用形成了残留状分布的石榴子石、单斜辉石和斜长石,变质矿物组合是Grt+Cpx+Pl,而且石榴子石和单斜辉石从核部到边部化学成分无明显变化,可以作为达到平衡的矿物组合标志,大致代表峰期的变质条件,根据矿物组合,至少达到了麻粒岩相的变质条件。第二期退变质作用应属角闪岩相,形成了淡棕黄色的自形-半自形角闪石(Hbl)和不规则状的斜长石(Pl),它们分布于残留状的石榴子石和单斜辉石之间,推测是二者反应的产物,有时斜长石与角闪石组成环带状或帚状后成合晶,围绕石榴子石发育显著的“白眼圈”结构,该期的变质矿物共生组合是Hbl+Pl;有些薄片退变质作用较强烈,岩石完全转变为石榴子石角闪岩矿物组合,未见单斜辉石;石榴子石周围的角闪石+斜长石后成合晶及基质中普遍发育的斜长石+角闪石组合,可以反映角闪岩相的变质矿物共生组合。

从矿物组合及退变质的特点来看,该麻粒岩至少应是高压变质作用的产物,但由于岩石中尚缺少典型的绿辉石矿物,岩石中石榴子石等矿物内部包体也不发育,是否遭受了榴辉岩相变质作用及峰期前的矿物组合目前还无法确定,还需要进一步的研究证实。

对于第一期变质峰期变质条件,采用石榴子石-单斜辉石之间的Fe-Mg交换反应地质温度计^[27-31]及石榴子石-单斜辉石-斜长石地质压力计^[32-33]进行估算。第一期变质作用的温度条件为780~900℃,压力条件达到13~16kPa,由此推测,洞错区麻粒岩的变质峰期至少达到高压麻粒岩相。

第二期退变质岩石中角闪石的化学成分总体变化不大,说明在退变质过程中基本达到了平衡状态,利用角闪石-斜长石地质温度计^[34]估算获得峰期后退变质阶段温度为430~480℃;角闪石-斜长石压力计^[35]获得的压力为4.5~5.2kPa。

4 洞错高压麻粒岩原岩时代

采集洞错区高压麻粒岩样品(14DC-5)进行LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析,锆石的挑选与分选在河北省廊坊区域地质调查研究院地质实验室完成,锆石阴极发光照相由北京锆年领航科技有限公司完成。锆石U-Pb同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成,锆石U-Pb同位素测试利用LA-

ICP-MS 完成, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为配备有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005, 详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu 等^[36-37]。U-Pb 谐和图绘制和年龄加权平均值计算使用 Isoplot 软件完成^[38]。分析结果见表 2。

样品 14DC-5 共进行了 26 颗锆石分析, 多数颗粒内部具有与晶体边界基本一致、宽的岩浆结晶振荡环带(图 6-a), 而有少许锆石颗粒没有明显的岩浆结晶振荡环带, 显示均一的图像特征; 大部分锆石具有较宽结晶环带的边缘发育锆石增长边(图 6-a)。一般认为, 岩浆成因锆石的 Th/U 值大于 0.3, 且 Th 和 U 之间具有明显的正相关, 而变质重结晶锆石则小于 0.1^[39]。26 颗锆石的 U、Th 含量变化范围非常大, 介于 $1287 \times 10^{-6} \sim 40081 \times 10^{-6}$ 和 $878 \times 10^{-6} \sim 96750 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值为 0.47~2.41, 其中点 4 和 6 测年结果明显不协调, 并偏离谐和线, 可能含有 Pb 的丢失或代表更年

轻的岩浆事件, 在计算加权平均值和成图时去除。剩余 24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 246~260Ma, 年龄加权平均值为 $254 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD=1.1) (图 6-b), 可以指示洞错区高压麻粒岩原岩的形成时代。锆石颗粒最外部的增生边, 由于太窄 ($<10 \mu\text{m}$) 无法进行 U-Pb 分析, 没有获得有效的年龄数据来限定高压麻粒岩的后期退变质时代。

5 讨论

5.1 班公湖-怒江结合带高压-超高压变质岩时空展布

班公湖-怒江结合带是青藏高原的重要地质界线之一^[14], 近年来先后有研究者在该结合带的东部及周边相继发现了多处榴辉岩及高压-超高压变质岩出露地, 为探讨班公湖-怒江特提斯洋的构造演化历史提供了重要资料。

表 2 洞错高压麻粒岩(14DC-5)LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic composition of zircons for high-pressure granulite in Dongco area

测点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	校正后同位素比值						年龄 /Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	259	981	2104	0.47	0.1135	0.0218	0.4976	0.0734	0.0392	0.0013	1857	353	410	49.8	248	4.0
2	609	2699	3249	0.83	0.0610	0.0078	0.3275	0.0398	0.0402	0.0009	639	278	288	30.5	254	5.3
3	152	921	1881	0.49	0.0932	0.0280	0.2753	0.0808	0.0389	0.0013	1491	592	247	64.3	246	4.2
4	616	3242	4426	0.73	0.0840	0.0079	0.3485	0.0318	0.0323	0.0006	1294	183	304	23.9	205	3.9
5	150	878	1287	0.68	0.0335	0.0914	0.2311	0.1050	0.0398	0.0017			211	86.6	252	10
6	12196	96750	40081	2.41	0.0510	0.0018	0.2358	0.0093	0.0331	0.0005	239	75.0	215	7.6	210	3.3
7	4866	25642	15341	1.67	0.0469	0.0027	0.2618	0.0158	0.0403	0.0006	42.7	133	236	12.7	255	3.6
8	3115	16374	12866	1.27	0.0516	0.0028	0.2893	0.0159	0.0406	0.0005	265	91.7	258	12.5	256	3.2
9	2320	11436	11249	1.02	0.0569	0.0027	0.3090	0.0139	0.0395	0.0005	500	102	273	10.7	250	3.0
10	909	4273	5251	0.81	0.0489	0.0056	0.2657	0.0294	0.0408	0.0008	146	248	239	23.6	258	5.0
11	2865	14188	12695	1.12	0.0532	0.0023	0.2952	0.0130	0.0398	0.0004	345	98.1	263	10.2	252	2.5
12	479	2151	3375	0.64	0.0852	0.0106	0.4289	0.0478	0.0392	0.0009	1320	243	362	34.0	248	5.8
13	269	1238	2609	0.47	0.0734	0.0117	0.3584	0.0543	0.0394	0.0011	1026	327	311	40.6	249	4.8
14	259	1196	2204	0.54	0.0565	0.0129	0.3178	0.0668	0.0401	0.0014	472	450	280	51.4	253	4.4
15	1600	8390	7445	1.13	0.0583	0.0040	0.3120	0.0205	0.0393	0.0005	543	148	276	15.9	249	3.4
16	1370	6975	7370	0.95	0.0540	0.0050	0.2832	0.0266	0.0390	0.0006	372	207	253	21.1	246	3.9
17	8391	40446	29420	1.37	0.0488	0.0016	0.2766	0.0089	0.0411	0.0004	139	77.8	248	7.1	260	2.2
18	2265	10909	11053	0.99	0.0509	0.0027	0.2797	0.0148	0.0400	0.0005	235	124	250	11.7	253	3.0
19	12722	60687	39070	1.55	0.0512	0.0016	0.2871	0.0090	0.0406	0.0004	256	72.2	256	7.1	256	2.7
20	2061	9738	9786	1.00	0.0595	0.0031	0.3247	0.0168	0.0398	0.0005	583	115	286	12.9	251	3.2
21	712	3240	4264	0.76	0.0534	0.0073	0.2723	0.0384	0.0399	0.0008	346	116	245	30.7	252	5.2
22	633	3333	3661	0.91	0.0587	0.0095	0.2730	0.0410	0.0401	0.0010	554	361	245	32.7	253	4.1
23	2436	11799	11622	1.02	0.0484	0.0021	0.2719	0.0123	0.0406	0.0005	117	102	244	9.8	257	3.3
24	2951	14463	10923	1.32	0.0547	0.0034	0.3001	0.0183	0.0405	0.0006	398	139	266	14.3	256	3.6
25	4862	24071	23786	1.01	0.0484	0.0020	0.2712	0.0112	0.0406	0.0004	120	100	244	8.9	257	2.5
26	2062	9882	10733	0.92	0.0481	0.0027	0.2639	0.0141	0.0406	0.0005	106	126	238	11.3	256	2.9

王根厚等^[6]在西藏巴青县北首先报道了高压变质片岩,主要由石英片岩、钠长石英片岩、白云母石英片岩组成(西西岩组),片理显示近水平韧性剪切,矿物化学数据显示为高压低温蓝片岩相。随后,王根厚等^[2]又在八宿变质地体中发现了中侏罗世高压多硅白云母(Si达3.624),同时在其中发现了高压变质的退变榴辉岩^[3],但是没有发现典型的高压特征变质矿物绿辉石;在相邻的同卡地区还发现了高压麻粒岩^[4];八宿及周边的高压变质岩被认为是早侏罗世大陆俯冲所形成的^[1, 5]。最近,在安多地区发现了高压基性麻粒岩等,其峰期变质矿物组合为石榴子石+单斜辉石+石英+金红石等^[7-11],被认为可能与安多微陆块和羌塘地体中生代时期的弧-陆碰撞作用有关^[7-8]。由此笔者认为,八宿地区及安多地区的高压变质岩代表大陆俯冲或陆-陆碰撞的产物。

近年来,夏斌等^[12]在班公湖-怒江结合带中段的蓬湖西发现了超高压镁质榴辉岩,根据矿物出溶关系可分出3个世代的单斜辉石、3个世代的石榴子石和对应的3个单斜辉石-石榴子石矿物对,记录了班公湖-怒江洋壳深俯冲与折返过程,但没有获得原岩及变质时代,需要进一步证实变质作用形成的时间。

本研究在洞错区蛇绿岩中新识别出高压麻粒

岩,与成都理工大学1:5万改则县东^①区域地质调查发现发现的达格弄沟榴辉岩总体上在一个带上(图1-b),近东西向展布,东西断续长约30km,南北宽约0.2~0.8km。岩相学及矿物化学的研究表明,洞错高压麻粒岩经历了至少2期以上的变质过程,洞错舍拉玛沟高压麻粒岩的发现,填补了班公湖-怒江结合带西段没有高压变质作用记录的空白。本研究未发表的这些高压麻粒岩的地球化学数据显示其原岩为正常洋壳N-MORB型亲缘性的基性岩类(另文发表),代表洋壳的物质组成,洞错高压麻粒岩的发现指示班公湖-怒江西段的洞错洋壳曾经发生了深俯冲。本次新发现的洞错高压麻粒岩与蓬湖西的榴辉岩质蛇绿岩^[12]在空间上位于同一个构造带,班公湖-怒江高压-超高压变质带东西延伸超过500km,它们很可能是同期大洋深俯冲作用形成的,指示班公湖-怒江特提斯洋曾经发生了规模较大的大洋深俯冲。

5.2 地质意义

通常认为班公湖-怒江洋壳形成于晚三叠世-早侏罗世,中侏罗世洋壳开始俯冲消减,班公湖-怒江洋盆的关闭时间在不同的地段虽然略有差异,但晚白垩世竟柱山组的磨拉石建造被学术界代表了班公湖-怒江洋的彻底消失,此后羌塘地块与拉萨地块的碰撞才真正开始^[13, 15-16, 40]。

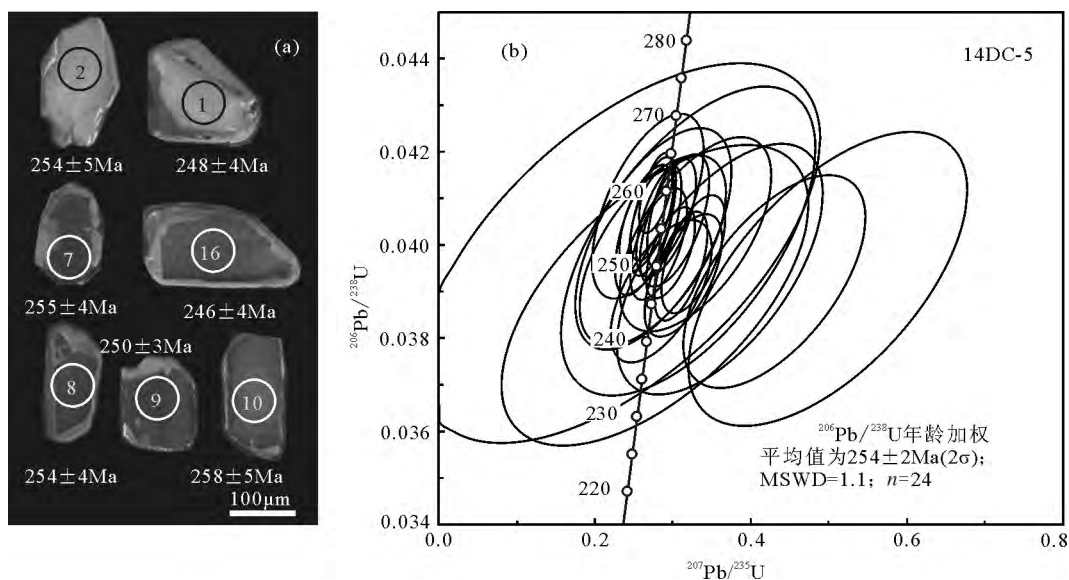


图6 洞错高压麻粒岩(14DC-5)锆石CL图像(a)及年龄谐和图(b)
Fig. 6 Cathodoluminescence images showing the internal structures of the analyzed zircon grains from sample (14DC-5) (a) and concordia plots of representative zircon grains of the Dongco high-pressure granulite

班公湖-怒江结合带西段洞错地区舍拉玛沟的高压麻粒岩以透镜体状或似层状岩块的形式产于斜长角闪岩岩块或变质辉长岩岩块中,二者之间为构造接触关系,局部地段可见直接与蛇纹石化变质橄榄岩构造接触。那么,该高压麻粒岩是班公湖-怒江洋壳深俯冲的产物?还是班公湖-怒江洋盆闭合后羌塘地块与拉萨地块碰撞的产物?还是反映其他或更早期的碰撞事件?

另外,对于洞错蛇绿岩的形成时代目前还存在争议,前人根据洞错地区蛇绿岩上覆硅质岩中的放射虫化石将蛇绿岩的形成年龄限定于侏罗纪^[40];邱瑞照等^[41]获得洞错堆晶辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $191 \pm 22 \text{Ma}$, K-Ar 年龄为 $140 \pm 4 \text{Ma}$ 和 $152 \pm 4 \text{Ma}$, 认为洞错舍拉玛沟地区洋盆的张开时代为早侏罗世, K-Ar 年龄为洋盆俯冲年龄;但是鲍佩声等^[20]获得洞错堆晶橄长岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 $132 \pm 3 \text{Ma}$, 玄武岩全岩 Ar-Ar 年龄为 $137 \pm 3 \text{Ma}$ 和 $141 \pm 3 \text{Ma}$, 将其解释成为洋盆形成和发展年龄。Wang 等^[15]根据所测的高精度锆石 U-Pb 年龄,结合前人在班公湖-怒江结合带公开发表的数据,认为班公湖-怒江 MORB 型洋壳主要形成于早一中侏罗世,洋盆持续到早白垩世晚期。上述资料都显示,班公湖-怒江结合带的洞错洋壳在侏罗纪之前就已经存在。

本研究说明,班公湖-怒江结合带西段的洞错地区存在有高压麻粒岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明,该高压麻粒岩的原岩形成时代约为 254Ma , 地球化学研究显示其原岩为正常洋壳 N-MORB 型基性岩,因此推断,班公湖-怒江洋壳很可能在晚二叠世就已经存在,晚二叠世-侏罗纪已经发育成熟,是一个复杂洋壳,班公湖-怒江洋盆的开启时间比以前认知的还要早。洞错高压麻粒岩极有可能是特提斯洋壳深俯冲而发生麻粒岩相(甚或是榴辉岩相)高压-超高压变质作用的产物,之后由于拉萨地块与羌塘地块的碰撞而折返。其发现也说明,在班公湖-怒江结合带西段存在高压麻粒岩,同时也很可能指示班公湖-怒江结合带存在一条高压变质带,因此对洞错及邻区高压麻粒岩开展更详细的矿物学、岩石学、变质作用 pT 轨迹和折返机制研究,将对探讨青藏高原特提斯洋的构造演化历史、构造属性及陆-陆碰撞造山过程具有重要意义。

6 结 论

(1)在班公湖-怒江结合带西段洞错舍拉玛沟中新发现高压麻粒岩,岩相学及矿物化学分析确认其峰期变质矿物组合为石榴子石、单斜辉石及斜长石,晚期退变质矿物组合为角闪石和斜长石,并发育典型的“白眼圈”结构。

(2)地质温压计估算结果表明,洞错高压麻粒岩至少经历了麻粒岩相和角闪岩相2期变质作用改造,温度和压力条件分别是 $780 \sim 900^\circ\text{C}$ 、 $13 \sim 16 \text{kPa}$ 和 $430 \sim 480^\circ\text{C}$ 、 $4.5 \sim 5.2 \text{kPa}$,极有可能是班公湖-怒江特提斯洋壳发生深俯冲的产物,说明在班公湖-怒江结合带内存在高压变质带。

(3)洞错高压麻粒岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $254 \pm 2 \text{Ma}$,指示班公湖-怒江洋盆发育时限可以追溯到晚二叠世,比原先认知的要早。

致谢:在野外考察过程中与中国地质科学院地质研究所杨天南研究员进行了有益的探讨,在岩相学研究及成文过程中,中国地质科学院地质研究所张泽明研究员,吉林大学董永胜教授、张修政博士及成都地质调查中心耿全如、刘宇平研究员提供帮助,徐金沙协助完成电子探针测试分析,审稿人提出许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]张开均,唐显春.青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义[J].科学通报,2009,54(13):1804-1814.
- [2]王根厚,张维杰,周详,等.西藏东部嘉玉桥变质杂岩内中侏罗世高压剪切作用:来自多硅白云母的证据[J].岩石学报,2008,24(2):395-400.
- [3]董永胜,谢尧武,李才,等.西藏东部八宿地区发现退变质榴辉岩[J].地质通报,2007,26(8):1018-1020.
- [4]张万平,王立全,强巴扎西,等.西藏同卡地区高压麻粒岩的发现、 pT 轨迹及其大地构造意义[J].岩石学报,2010,26(6):1915-1924.
- [5]Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. First report of eclogites from central Tibet, China: evidence for ultradeep continental subduction prior to the Cenozoic India-Asian collision[J]. Terra Nova, 2008, 20(4): 302-308.
- [6]王根厚,贾建称,万永平,等.藏东巴青县北部西西岩组构造片麻岩形成及构造意义[J].地学前缘,2006,13(4):180-187.
- [7]张晓冉,史仁灯,黄启帅,等.青藏高原安多高压基性麻粒岩的发现及其地质意义[J].科学通报,2010,55(27/28):2702-2711.
- [8]张修政,董永胜,解超明,等.安多地区高压麻粒岩的发现及其意义[J].岩石学报,2010,26(7):2106-2112.

- [9]Zhang X, Shi R, Huang Q, et al. Early Jurassic high-pressure metamorphism of the Amdo terrane, Tibet: Constraints from zircon U - Pb geochronology of mafic granulites[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(3/4): 975-985.
- [10]Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(3): 236-249.
- [11]Zhang Z M, Dong X, Santosh M, et al. Metamorphism and tectonic evolution of the Lhasa terrane, Central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 170-189.
- [12]夏斌, 刘维亮, 周国庆, 等. 西藏蓬湖西镁质榴辉岩中的出溶物及其地质意义[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2013, 49(3): 356-396.
- [13]潘桂棠, 丁俊, 姚东生, 等. 青藏高原及邻区地质图(1:1500000)[M]. 成都:成都地图出版社, 2004.
- [14]Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53(7): 3-14.
- [15]Wang B D, Wang L Q, Chung S L, et al. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan ocean: Insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites[J]. *Lithos*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.016>.
- [16]王立全, 潘桂棠, 丁俊, 等. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1500000)[M]. 北京:地质出版社, 2013.
- [17]潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1500000)[M]. 北京:地质出版社, 2013.
- [18]Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1429-1454.
- [19]王保弟, 许继峰, 曾庆高, 等. 西藏改则地区拉果蛇绿岩地球化学特征及成因[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1521-1530.
- [20]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.
- [21]路远发. GeoKit:一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459-465.
- [22]翟庆国, 李才. 藏北羌塘中部戈木日榴辉岩的岩石学、矿物学及变质作用 pT 轨迹[J]. *地质通报*, 2009, 28(9): 1207-1220.
- [23]翟庆国, 王军, 王永. 西藏改则县冈玛错地区发现榴辉岩[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1720-1724.
- [24]Zhai Q G, Zhang R Y, Jahn B M, et al. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: Petrology, geochronology and metamorphic $p-T$ path[J]. *Lithos*, 2011, 125(1/2): 173-189.
- [25]李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 70-74.
- [26]Coleman R, Lee D, Beatty L, et al. Eclogites and eclogites: their differences and similarities[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(5): 483-508.
- [27]Ellis D, Green D. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71(1): 13-22.
- [28]Dahl P S. The thermal-compositional dependence of Fe^{2+} -Mg distributions between coexisting garnet and pyroxene: applications to geothermometry[J]. *Am. Mineral.*, 1980, 65: 852-866.
- [29]Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3(3): 231-243.
- [30]Krogh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99(1): 44-48.
- [31]Pattison D, Newton R. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1989, 101(1): 87-103.
- [32]Newton R, Perkins D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz[J]. *American Mineralogist*, 1982, 67(3/4): 203-222.
- [33]Eckert J O, Newton R, Kleppa O. The H of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry[J]. *American Mineralogist*, 1991, 76(1/2): 148-160.
- [34]Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 116(4): 433-447.
- [35]Bhadra S, Bhattacharya A. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages[J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(4): 491-502.
- [36]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [37]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 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(1/2): 34-43.
- [38]Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [39]Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- [40]西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [41]邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代[J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 262-268.
- ①成都理工大学. 1:5万改则东6幅区域地质调查报告. 内部资料. 2013.