

柴北缘都兰地区含石榴石、蓝晶石片麻岩的变质演化历史

于胜尧 张建新 宫江华 李云帅

(大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 在柴北缘超高压变质带东段, 新识别出一个高压麻粒岩单元, 其主要的岩石组合包括基性(长英质)高压麻粒岩、花岗质片麻岩、富铝质片麻岩(片岩)、石榴角闪岩和英云闪长岩。岩相学和变质反应序列、矿物化学和温压估算结果表明, 蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩共经历了4阶段的变质演化: I 早期进变质阶段, 以石榴石核部发育的黑云母、白云母、斜长石和石英等矿物包裹体为特征; II 峰期高压麻粒岩相阶段, 矿物组合为石榴石+蓝晶石+条纹长石+斜长石+石英; III 金红石 Zr 温度计和 GASP 压力计限定其峰期温压条件为: $t = 800 \sim 840^\circ\text{C}$ 和 $p = 1.4 \sim 1.6 \text{ GPa}$; IV 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段, 矿物组合为石榴石(边部)+黑云母+长石+石英; IV 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段, 以蓝晶石周围出现的 $\text{Ms} + \text{Pl} \pm \text{Zo}$ 和 $\text{Mrg} + \text{Qtz} \pm \text{Ms} \pm \text{Pl}$ 后成合晶为特征。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果指示高压麻粒岩相变质时代为 431 Ma。蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩具有顺时针的 p_t 演化轨迹, 与基性高压麻粒岩形成于相同的动力学过程。

关键词: 柴北缘 都兰 副片麻岩; 变质演化

中图分类号:P588.34⁺5

文献标识码:A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0441-17

Metamorphic evolution of garnet- and kyanite-bearing paragneiss in Dulan area of the North Qaidam Mountains, western China

YU Sheng-yao, ZHANG Jian-xin, GONG Jiang-hua and LI Yun-shuai

(State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: A high-pressure granulite unit was recognized in Dulan area at the eastern end of the North Qaidam UHP metamorphic belt. The HP granulite unit comprises mafic (felsic) HP granulite, granitic gneiss, pelitic schist (gneiss), garnet amphibolite and tonalite. Based on the petrographic features and metamorphic reaction, mineral chemistry and p_t calculations, the authors divided the paragneiss into four metamorphic stages: Stage I, which is the pre-peak prograde metamorphic stage characterized by biotite, muscovite, plagioclase and quartz inclusions within the core of zoned garnet porphyroblasts; Stage II, the peak HP granulite-facies metamorphic stage, which is characterized by the mineral assemblage of garnet + kyanite + ternary-feldspar + plagioclase + quartz, with peak p_t conditions of $t = 800 \sim 840^\circ\text{C}$ and $p = 1.4 \sim 1.6 \text{ GPa}$; Stage III, the initial decompressional retrogression began at the high amphibolite-facies stage characterized by garnet + biotite + plagioclase + quartz; Stage IV, final retrogression under greenschist-facies conditions was developed at shallow crustal levels, characterized by the existence of $\text{Ms} + \text{Pl} \pm \text{Zo}$ and $\text{Mrg} + \text{Qtz} \pm \text{Ms} \pm \text{Pl}$ assemblages around kyanite.

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 自然科学基金青年基金资助项目(41202037)

作者简介: 于胜尧(1981-), 博士, 构造地质学专业, 主要从事造山带的变质作用及深熔作用研究, E-mail: yushengyao1981@163.com

Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yielded peak HP granulite-facies metamorphic age of 431 Ma. The combination of petrographic textures, mineral compositions and thermobarometric data defined a single clockwise p - t path for the Dulan paragneiss, similar to that of HP mafic granulite.

Key words: northern margin of Qaidam Basin; Dulan; paragneiss; metamorphic evolution

近年来,在全球不同时期造山带广泛分布的高压麻粒岩因其在造山带演化过程中的重要作用而逐渐成为国内外地质学家关注的热点(Liu and Zhong, 1997; Zhao et al., 2001; Indares, 2003; O'Brien and Rötzler, 2003)。典型的基性高压麻粒岩是以岩石中出现石榴石+单斜辉石+斜长石+石英稳定组合,而长英质岩石和泥质岩石中以出现石榴石+蓝晶石+钾长石+石英稳定组合为特征(Carswell and O'Brien, 1993; O'Brien and Rötzler, 2003)。高压麻粒岩的研究不仅对于认识深层次地壳内的构造作用、陆壳底部物质组成具有重要意义(Carswell and O'Brien, 1993; Rötzler and Romer, 2001; O'Brien and Rötzler, 2003; O'Brien, 2006),而且查明高压麻粒岩与相关岩石(如榴辉岩或石榴橄榄岩等)之间的关系对探讨大陆碰撞造山带根部带的构造热演化、揭示碰撞造山带的造山过程和造山机制具有重要意义。近些年来,中国许多地区均报道有高压麻粒岩的出露,主要包括:①华北克拉通(翟明国等,1992,1994;郭敬辉等,1993;李江海等,1998;刘文军等,1998;魏春景等,2001;Zhao et al., 2001;刘福来等,2002;Guo et al., 2002, 2005;周喜文等,2004);②喜马拉雅造山带(Liu and Zhong, 1997;丁林等,1999;Guilmette et al., 2011);③中央造山带(西昆仑、阿尔金-柴北缘、秦岭地区、大别-苏鲁造山带)(刘良等,1994,1995,1996;Chen et al., 1998, 2008;张建新等,2005, 2007, 2009;Zhang et al., 2005, 2008a;曲军峰等,2007;于胜尧等,2009, 2010, 2013;Yu et al., 2011, 2012),而其中泥质高压麻粒岩仅在华北的贺兰山、千里山、胶北和河北宣化,以及喜马拉雅的南迦巴瓦等少数地区出露(马军等,1995;Liu and Zhong, 1997;丁林等,1999;周喜文等,2004;Zhou et al., 2008;Guilmette et al., 2011; Tam et al., 2012)。

柴北缘高压-超高压变质带是最近20年厘定的一条主要由榴辉岩、石榴橄榄岩和相关片麻岩(花岗片麻岩和副片麻岩)组成的早古生代大陆深俯冲变质带(杨建军等,1994;杨经绥等,2001)。该带自西向东依次出露有鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩单元

(YLU)绿梁山石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元(LLU)锡铁山榴辉岩-片麻岩单元(XTU)和都兰榴辉岩-片麻岩单元(DLU)等3个榴辉岩单元和1个石榴橄榄岩单元(Zhang et al., 2008a)。值得注意的是,柴北缘高压-超高压变质带内的绿梁山和都兰单元先后报道有典型高压麻粒岩的出露,岩相学特征显示绿梁山高压麻粒岩属榴辉岩叠加型。而关于都兰高压麻粒岩的成因则存在较大争议:一种观点认为都兰基性高压麻粒岩属榴辉岩叠加型(Song et al., 2003);而另一种观点则认为都兰基性高压麻粒岩具有与相邻榴辉岩不同的变质演化历史,而非榴辉岩在抬升过程中热松弛作用的产物(于胜尧等,2009, 2010;张建新等,2009; Yu et al., 2011, 2012)。但到目前为止,关于都兰地区基性高压麻粒岩的围岩是否也经历了高压麻粒岩相变质作用,至今仍没有一个明确的认识。基于此,本文选取柴北缘都兰榴辉岩-片麻岩单元的石榴-蓝晶-黑云二长片麻岩为研究对象,在详细的野外调查的基础上,通过岩相学、矿物化学和温压估算确立变泥质片麻岩的 p - t 轨迹,这不仅对查明高压麻粒岩与围岩的关系具有重要意义,也将为全面深入探讨大陆碰撞造山带根部带的构造热演化提供重要证据。

1 区域地质背景

都兰榴辉岩-片麻岩单元分布在柴北缘东端的野马滩-沙柳河一带,主要由花岗质片麻岩、副片麻岩(泥质片岩)少量大理岩及榴辉岩和蛇纹石化超基性岩透镜体所组成(图1b)。片麻岩普遍具有角闪岩相的叶理,其走向为北西到近东西向,未变形的野马滩花岗岩体切割了片麻岩的叶理(吴才来等,2004)。已有的年代学资料显示都兰榴辉岩的变质年龄变化在422~450 Ma之间,并认为榴辉岩相变质作用可持续20~30 Ma(Mattinson et al., 2006; Zhang et al., 2010)。与柴北缘其他地区的榴辉岩相似,都兰地区榴辉岩的原岩主要形成在新元古代(800 Ma左右)的大陆裂谷环境(Zhang et al., 2010; Yu et al., 2013),也有少量榴辉岩的原岩可能形成在

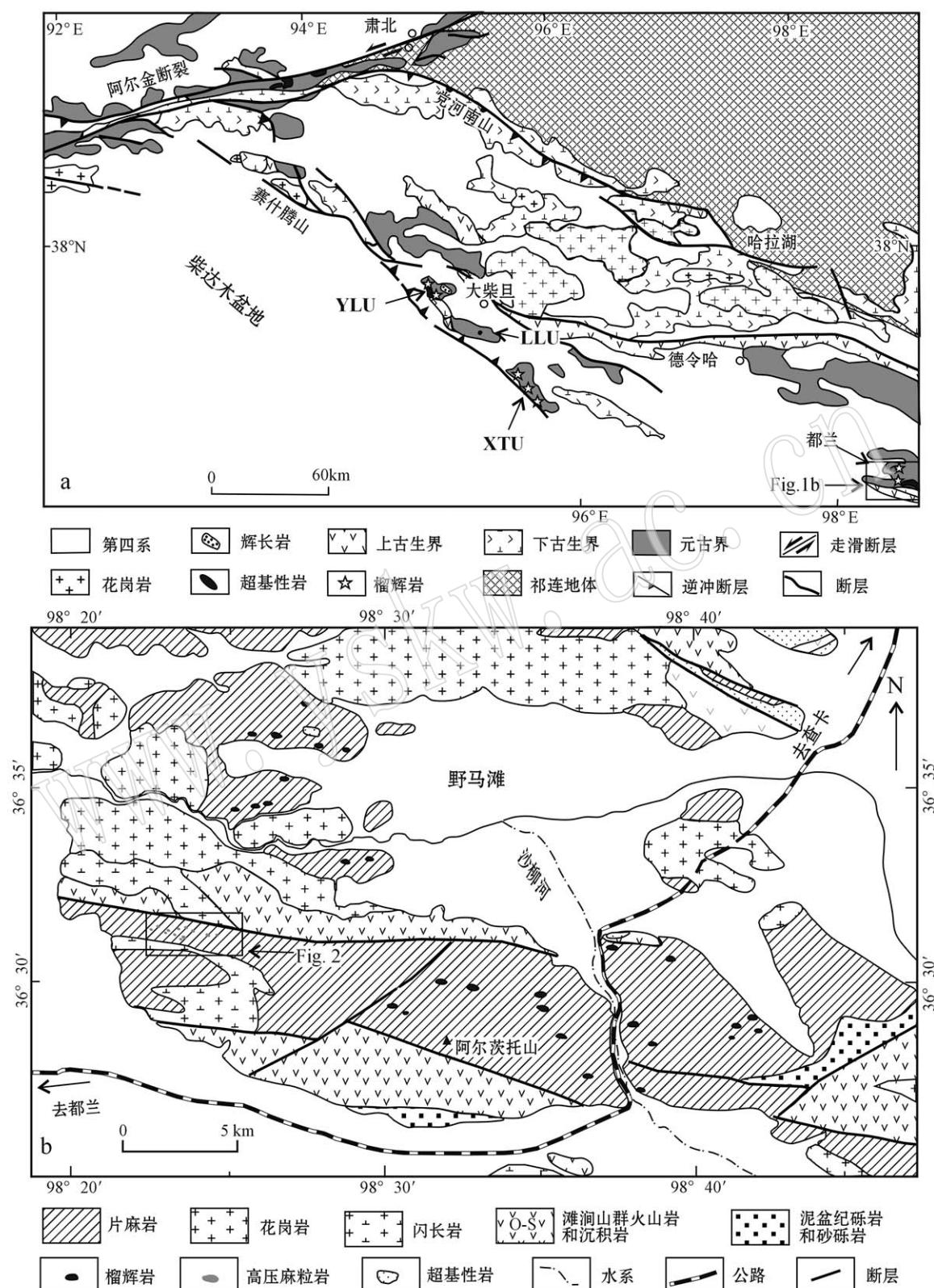


图 1 柴北缘 UHP 变质带(a)和都兰榴辉岩-片麻岩单元(b)的地质简图

Fig. 1 Geological map of North Qaidam UHP metamorphic belt (a) and Dulan eclogite-gneiss unit (b)

寒武纪,认为其形成在洋壳环境(Zhang et al., 2008b)。早先的研究根据空间分布、岩石组合和形成的 $p-t$ 条件等将其进一步分为北亚带和南亚带,二者在岩石组合和 $p-t$ 演化等方面有明显的差异(Song et al., 2003),其间被韧性剪切带所分隔(Xu et al., 2006)。最新的研究结果显示南北亚带的榴辉岩并没有明显差别(Zhang et al., 2009a, 2009b,

2010),而重要的差别是在南带中新识别出一个高压麻粒岩次级单元。

高压麻粒岩单元分布在阿尔茨托山的西侧,主要出露在都兰县南戈滩北大约 $5\sim6\text{ km}^2$ 的范围内(图2),其北以断层与滩涧山群浅变质火山沉积岩相隔,南侧为闪长岩体,其东侧至阿尔茨托山西断层,为大面积出露的花岗质片麻岩夹(石榴)角闪岩。在

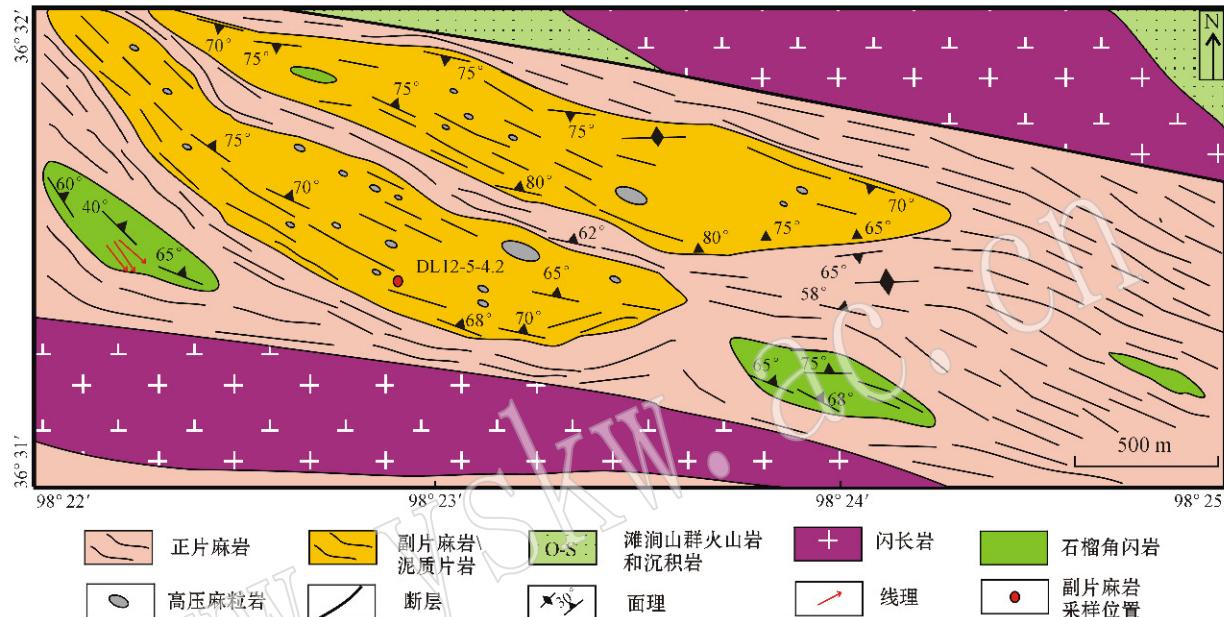


图2 高压麻粒岩单元的岩石组合特征

Fig. 2 Simplified geological map showing petrological assemblage of the HP granulite unit

1:25万地质图资料的基础上,结合详细的野外工作,推测高压麻粒岩单元与相邻的含榴辉岩的岩石单元为断层接触,高压麻粒岩仅出露在断层西侧,而榴辉岩则出露在断层东侧。高压麻粒岩单元主要的岩石类型包括基性高压麻粒岩、花岗质片麻岩、富铝质片麻岩(片岩)、石榴斜长角闪岩和花岗闪长岩。基性高压麻粒岩在野外露头上成明显的正地形产出,单个露头长数百米,但由于局部植被发育或第四系松散堆积物覆盖,高压麻粒岩的分布范围和分布状态尚不十分明确。基性高压麻粒岩的直接围岩为含石榴石的白云母片岩和片麻岩,它们之间的原地关系界限比较清楚(图3),其外围为石榴斜长角闪岩和花岗质片麻岩。岩相学、矿物化学分析结果显示高压麻粒岩的峰期变质条件为: $p=1.45\sim1.85\text{ GPa}$, $t=800\sim950^\circ\text{C}$, 形成于增厚下地壳的根部环境(于胜尧等, 2009; Yu et al., 2011, 2012)。

2 主要测试方法及流程

为了精确定量限定片麻岩的变质演化历史,对片麻岩中不同部位的主要矿物石榴石、斜长石、黑云母和白云母进行了成分测试,并且对晶型较好的石榴石颗粒进行X-Ray成分扫描和矿物化学成分剖面测试。矿物的电子探针成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所JXA-8230型电子探针上完成,分析条件均为15 kV加速电压,20 nA电子束流。除少数矿物包裹体采用 $2\text{ }\mu\text{m}$ 束斑外,其它矿物束斑为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。其中石榴石中的 Fe^{3+} 采用Droop(1987)的电价平衡法计算。本文也对片麻岩中金红石进行了电子探针微量元素分析。在进行金红石微量元素分析时,为了获得更低的检测极限,采用了加大电流、增加计数时间和优化背景峰值的方法,具体测试条件

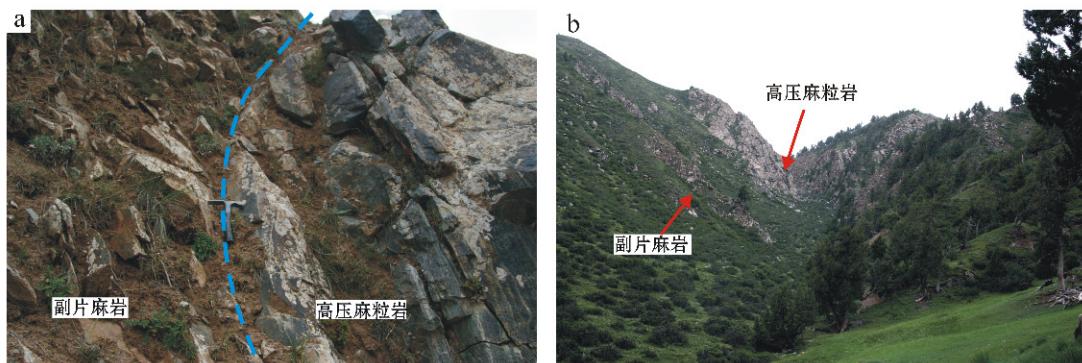


图 3 石榴-蓝晶-黑云二长片麻岩的空间展布及其与基性高压麻粒岩的野外关系

Fig. 3 Field views showing the relationship between the HP granulite and country rocks

为加速压 20 kV, 束流 100 nA, 束斑 5 μm 。实验过程中前后进行了 2 次分析(第 2 次未分析 Nb), 每次分析之前、中间和之后都使用了 ZrO_2 标样进行 Zr 峰位的校准, 同时使用了不含 Zr 的合成金红石标样做 Zr 的含量检验。实验过程中 Zr 含量分析误差约为 $\pm 15 \mu\text{g/g}$ (1σ), 详细实验流程见 Chen 等(2008)。

锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。信号较小的²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁴Pb(+²⁰⁴Hg)、²⁰²Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, ²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 信号用法拉第杯接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据, 均匀锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度(2σ)均为 2% 左右, 对锆石标准的定年精度和准确度在 1% (2σ)左右。MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127 (U: 923×10^{-6} ; Th: 439×10^{-6} ; Th/U: 0.475。Nasdala *et al.*, 2008) 为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进行校正, 并测量一个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010), 测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$, 未进行普通铅校正, ²⁰⁴Pb 由离子计数器检测, ²⁰⁴Pb 含量

异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。

3 岩相学及矿物化学

都兰蓝晶-石榴-黑云二长片麻岩呈灰白色, 斑状变晶结构, 片麻状构造, 主要由石榴石(10%~15%)、蓝晶石(2%~5%)、正条纹长石(15%~25%)、斜长石(5%~10%)、石英(25%~30%)和黑云母(10%~15%)等矿物组成, 并含少量白云母、金红石和榍石等矿物(图 4)。

3.1 石榴石

石榴石主要以半自形-自形、中-粗粒变斑晶形式存在, 粒度变化于 1~5 mm 之间, 外部常被黑云母、石英等矿物包围。石榴石变斑晶的核部通常含有黑云母、石英和白云母等矿物包裹体, 这些包裹体粒度一般变化于 20~100 μm , 形状不规则且没有明显的定向性, 因而排除它们是随着后期流体通道进入石榴石变斑晶核部的可能性。副片麻岩中石榴石电子探针成分分析结果见表 1, 总体上讲, 副片麻岩中石榴石的化学成分相对稳定, 以富含铁铝榴石、钙铝榴石和镁铝榴石为主要特征, 锰铝榴石含量相对较低。粗粒石榴石发育明显的成分环带(图 5), 在石榴石内核部位的铁铝榴石、镁铝榴石组分和 X_{Mg} [$\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$] 比较均一, 没有明显变化, 而从外核到边部区域, 镁铝榴石组分和 X_{Mg} 逐渐升高, 铁铝榴石组分逐渐降低, 显示出典型进变质生长环带的特征(O'Brien, 1997)。在距离边部 200~300 μm 范围

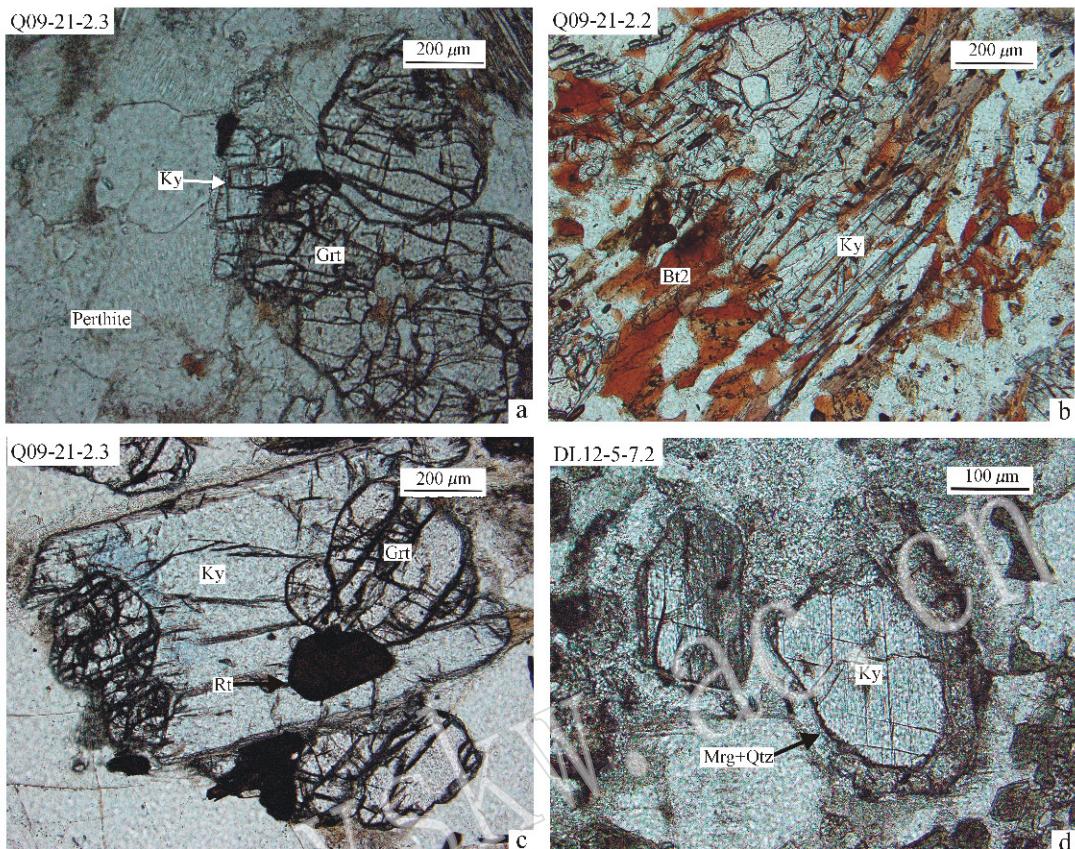


图4 石榴-蓝晶-黑云二长片麻岩的显微结构特征(矿物缩写据沈其韩,2009)

Fig. 4 Microphotographs showing typical textures of the paragneiss (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

a—石榴石、蓝晶石、条纹长石等矿物平衡共生; b—晚期黑云母围绕石榴石、蓝晶石等矿物生长; c—金红石生长在蓝晶石及石榴石颗粒边界;
d—蓝晶石边部转变为珍珠云母+石英后成合晶
a—garnet, kyanite, perthite in equilibrium; b—late biotite growing around garnet and kyanite; c—rutile growing between the boundary of kyanite and garnet; d—kyanite replaced by symplectite of margarite and quartz

内,镁铝榴石组分和 X_{Mg} 几乎同时达到峰值,随后铁铝榴石开始逐渐升高,而镁铝榴石组分和 X_{Mg} 则开始略有降低,显示出类似于退变质扩散环带的特征(Janak *et al.*, 1996),这种组分的变化可能是由后期退变质降温过程中石榴石与其它镁铁质矿物(如黑云母)发生Mg-Fe再交换导致的。

3.2 蓝晶石

蓝晶石主要以变斑晶形式存在,内部常常包裹石榴石、金红石等矿物,并与石榴石、条纹长石等矿物平衡共生;在强烈退变质区域,蓝晶石常被珍珠云母、白云母和石英等组成的矿物集合体围绕,指示了晚期退变质作用的叠加。考虑到蓝晶石化学成分(Al_2SiO_5)相对稳定,因此未做矿物化学分析。

3.3 云母类矿物

黑云母主要存在两种类型:①石榴石变斑晶核

部的黑云母包裹体(Bt1);②基质中褐色黑云母(Bt2),围绕石榴石、蓝晶石等矿物生长,形态规则,定向生长指示面理方向,可能为退变质后期大规模结晶生成。矿物化学分析结果显示,同一样品中不同成因类型或同一黑云母不同微区的成分均有差别。相对于基质中粗粒黑云母而言,石榴石核部的细粒黑云母具有低含量的Ti和更高的 X_{Mg} 值。基质中同一颗粒黑云母的不同微区成分也略有差别,即与石榴石直接接触的黑云母边缘的 X_{Mg} 一般高于黑云母中心的 X_{Mg} 。以上结果显示黑云母的成分不仅受控于全岩的化学成分、变质 P_f 条件,而且与退变质阶段与其它铁镁质矿物之间的Fe-Mg交换程度密切相关。

岩石中的白云母含量相对较少,但也存在两种类型:①主要以后成合晶形式生长在蓝晶石周围,为晚期退变质作用而成;②少数白云母包裹生长在

表1 副片麻岩中主要矿物成分分析结果

Table 1 Representative composition of major minerals in the paragneiss

 $w_B/\%$

样品号	Bt(Inc)	Bt(M)	Bt(R)	Ms	Ms	Ms	Grt(R)	Grt(C)	Grt(C)	Grt(R)	Pl	Pl	Pl	Pl	P(M)	P(M)
SiO ₂	37.35	37.75	37.45	47.09	47.32	46.33	46.91	36.72	36.66	36.05	35.57	36.23	36.14	36.82	65.97	63.68
TiO ₂	2.44	3.74	3.60	2.08	2.04	1.79	0.11	0.03	0.12	0.02	0.10	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	18.63	16.88	17.74	32.14	32.17	32.54	33.09	22.33	22.17	22.15	22.05	22.24	22.49	21.12	21.37	22.78
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.04	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
FeO	14.23	13.54	15.25	1.30	1.16	1.32	1.36	27.87	26.78	28.26	28.58	27.65	28.37	26.75	0.021	0.005
MnO	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.44	0.48	0.81	0.60	0.53	0.44	0.42	0.01	0.00
MgO	14.13	14.81	13.02	1.64	1.59	1.60	1.46	5.85	4.84	2.06	1.73	2.67	5.34	5.64	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	6.84	9.04	10.62	10.72	10.56	7.01	7.65	0.77	1.69
Na ₂ O	0.02	0.22	0.18	0.36	0.39	0.35	0.33	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	11.37	10.31
K ₂ O	9.52	9.59	9.37	10.23	10.39	10.44	10.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.206	0.208
Total	96.32	96.57	96.64	94.89	95.14	94.66	95.42	100.17	100.00	100.15	99.31	99.81	99.57	99.80	101.10	99.45
O	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	8.00	8.00
Si	2.732	2.755	2.746	3.148	3.155	3.112	3.121	2.981	2.888	2.921	2.971	2.989	2.867	2.993	2.917	2.904
Ti	0.134	0.206	0.199	2.532	2.528	2.576	2.595	0.006	0.002	0.007	0.001	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
Al	1.606	1.452	1.533	0.105	0.104	0.103	0.090	1.991	1.998	1.975	1.984	1.928	1.992	1.962	1.083	1.110
Cr	0.003	0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	0.004	0.002	0.000	0.000	0.001	0.003
Fe ³⁺	0.224	0.225	0.260	0.072	0.064	0.074	0.076	0.008	0.016	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.646	0.602	0.675	0.000	0.000	0.000	0.000	1.722	1.748	1.881	1.863	1.824	1.874	1.728	0.001	0.000
Mn	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.029	0.032	0.055	0.041	0.036	0.030	0.028	0.000	0.000
Mg	1.541	1.611	1.423	0.163	0.158	0.161	0.145	0.684	0.568	0.245	0.208	0.318	0.632	0.660	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.575	0.763	0.909	0.927	0.902	0.596	0.644	0.036	0.080
Na	0.003	0.031	0.025	0.046	0.050	0.046	0.042	0.003	0.000	0.005	0.000	0.000	0.002	0.960	0.881	0.823
K	0.888	0.893	0.876	0.873	0.884	0.895	0.889	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047	0.012	0.011
Sum	7.776	7.775	7.740	6.944	6.947	6.969	6.959	8.000	8.014	8.001	7.999	8.004	8.000	8.018	5.044	4.998
															5.029	5.015

注: Inc—包裹体, M—基质, C—核部, R—边部。

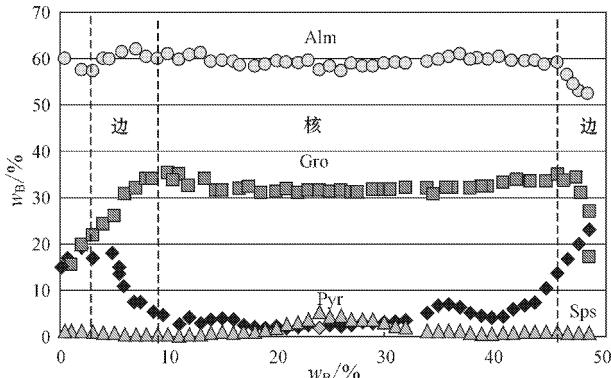


图5 石榴-蓝晶-黑云二长片麻岩中石榴石的成分剖面

Fig. 5 Zoning profiles for garnet in garnet-, kyanite- and biotite-bearing paragneiss

石榴石变斑晶的核部。本文只对石榴石核部的白云母进行了化学成分分析,数据结果显示白云母具有较低的Si值,变化于3.11~3.16之间。

3.4 长石类矿物

钾长石颗粒中常有斜长石、钠长石微晶,应为正条纹长石。斜长石主要有两种形式存在:(1)钾长石中出溶的斜长石微晶;(2)以基质形式存在。两种类型的斜长石成分具有明显差别,基质中晚期大颗粒斜长石具有更高的钙含量。

4 变质阶段划分及温压计算

根据岩石的岩相学结构和矿物之间的相互关系,都兰蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩主要可以识别出4期变质演化阶段:I早期进变质阶段;II峰期高压麻粒岩相阶段;III高角闪岩相退变质阶段;IV晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段(图6)。

4.1 早期进变质阶段(M1)

与世界上大多数麻粒岩地体相类似,都兰蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩同样没有保留太多早期进变质阶段的结构和矿物学信息。中-粗粒石榴石变斑晶核部发育了少量的黑云母、白云母、斜长石和石英等矿物包裹体,可能代表了早期进变质阶段的矿物组合特征。主要证据如下:(1)石榴石核部的矿物包裹体无明显的定向排列,且未见明显裂隙与之相连,从而排除了峰期后退变质阶段矿物重结晶或成分交换的可能性(Whitney, 1996);(2)石榴石变斑晶内核成分均一,表现为低 X_{Mg} 的特征,且明显不同于其它部位石榴石成分,所以石榴石核部应该是早期残

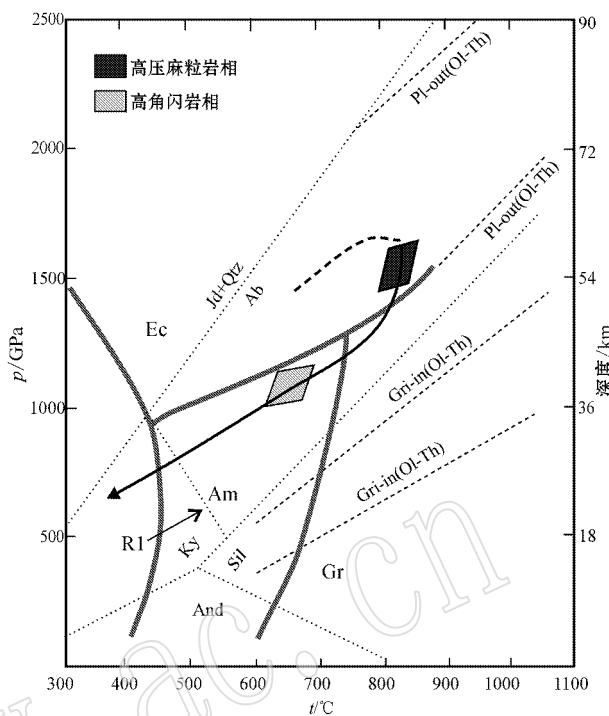


图6 石榴-蓝晶-黑云二长片麻岩的变质演化 p - t 轨迹

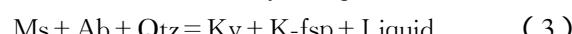
Fig. 6 p - t path for the metamorphic evolution of the garnet-, kyanite- and biotite-bearing paragneiss
Ol-Th—橄榄拉班玄武岩;Q-Th—石英拉班玄武岩;Ec—榴辉岩相;Gr—麻粒岩相;Am—角闪岩相;R1— $Ky + Zo + H_2O \rightarrow Mrg + Qtz$;Pl-out 和 Grt-in 界线引自 O'Brien and Rötzler(2003)及相关文献

Ol-Th—olivine tholeiite; Q-Th—quartz tholeiite; Ec—eclogite-facies; Gr—granulite-facies; Am—amphibolite-facies; R1— $Ky + Zo + H_2O \rightarrow Mrg + Qtz$; Pl-out and Grt-in boundary after O'Brien and Rötzler (2003) and associated references

留的石榴石。但从矿物化学分析结果来看,石榴石所包裹的黑云母、斜长石等成分已经明显遭受后期变质作用的改造,因此无法定量估算早期进变质阶段的温压信息。

4.2 峰期高压麻粒岩相变质阶段(M2)

都兰蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩的峰期矿物组合为:石榴石+蓝晶石+条纹长石+金红石+斜长石+石英。与早期进变质阶段(M1)相比而言,峰期高压麻粒岩阶段出现了大量蓝晶石和钾长石(条纹长石)等矿物,而白云母基本消失,以上现象指示蓝晶石、钾长石等矿物的形成可能与白云母脱水反应密切相关(Harley, 1989; O'Brien and Rötzler, 2003):



目前,适合长英质高压麻粒岩峰期温压估算的

温压计还相对稀缺,在此本文采用金红石 Zr 温度计估算高压麻粒岩相的变质温度。蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩中金红石的电子探针微量元素分析结果和计算温度见表 2,在表中可以看出,片麻岩中金红石 Zr 含量变化较大,一组介于 $320 \times 10^{-6} \sim 746 \times 10^{-6}$,而另一组变化于 $1202 \times 10^{-6} \sim 1667 \times 10^{-6}$ 之间。到目前为止,常用的金红石 Zr 含量温度计算公式主要有 Zack 等(2004) 和 Watson 等(2006) 和 Thomkins 等(2007) 中提出的 3 种形式。高温高压实验研究表明,金红石中的 Zr 含量受温度和压力两个变量共同制约(Degeling, 2003; Thomkins *et al.*, 2007),而 Zack 等(2004) 的金红石 Zr 含量温度计没有考虑到压力校正。Watson 等(2006) 的金红石 Zr 含量温度计是在假定压力为 1 GPa 的实验条件下获得的。但压力每升高 1 GPa 可能会使温度估算偏低 26~90℃。考虑到都兰地区高压麻粒岩的峰期压力明显高于 1 GPa。因而 Thomkins 等(2007) 的经过压力校正的金红石 Zr 含量温度计更适合本区高压麻粒岩温度的计算,而其他两个金红石 Zr 含量温度计算公式仅作参考。根据 Thomkins 等(2007) 的金红石 Zr 含量温度计算公式,取压力为 1.5 GPa,得出副片麻岩的温度结果为 680~755℃ 和 802~837℃ 两组。金红石是变质岩中常见的副矿物,可以稳定存在于从绿片岩相到榴辉岩相的不同变质阶段(Li *et al.*, 2003),也就是说对于高压麻粒岩等高级变质岩而言,金红石既可以在进变质阶段生长(Spear *et al.*, 2006),也可以形成于峰期或退变质阶段(Zack *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2007),并可能分别记录不同阶段的温度;同时金红石在形成以后还可能受后期扩散作用影响而丢失高温记录。值得注意的是,记录较高温度结果(802~837℃)的金红石主要发育在石榴石、蓝晶石、条纹长石和石英等矿物颗粒之间,指示其可能形成于峰期变质条件下,而记录较低温度结果(680~755℃)的金红石主要与黑云母等矿物相伴生,指示其可能形成于退变质阶段。根据以上分析,笔者认为都兰蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩峰期温度应为 802~837℃,而 680~755℃ 则可能代表退变质阶段的温度或金红石在形成以后受后期扩散作用影响而丢失高温记录。结合 GASP 压力计,当温度变化于 800~840℃ 之间时,其压力为 1.4~1.6 GPa。

4.3 高角闪岩相退变质阶段(M3)

初始退变质过程以石榴石、蓝晶石周围发育大

量黑云母为主要特征,其主要矿物组合为:石榴石(边部)+黑云母+长石+石英。由于岩石中未出现蓝晶石转化为矽线石现象,可以推测该阶段温压条件仍位于蓝晶石稳定域内。利用石榴子石边部与相邻的黑云母和斜长石的局部平衡组合,通过石榴子石-黑云母温度计和 GASP 压力计(Holdaway, 2000; Wu *et al.*, 2004),估算出该阶段的变质条件为 $p=0.95 \sim 1.15$ GPa 和 $t=578 \sim 677$ ℃。

4.4 晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段(M4)

岩石折返到上地壳环境在水的参与下石榴石、蓝晶石等矿物发生分解,蓝晶石边部通常被两种后成合晶替代:①Ms+Pl±Zo 和②Mrg+Qtz±Ms±Pl。蓝晶石边部的后成合晶的形成可能与以下反应相关: $Ky + Zo + H_2O \rightarrow Mrg + Qtz$ 。

在这个阶段形成的白云母几乎是纯的白云母,证明其属于低级的变质作用,但没有合适的温压计来估算其形成的温压条件。在蓝晶石和黝帘石之间的珍珠云母和石英组成的反应带所代表的变质反应为 $Ky + Zo + H_2O \rightarrow Mrg + Qtz$, Chatterjee 等(1984) 计算出这个反应位于两个不变点之间(即 425℃/1.05 GPa 和 525℃/0.73 GPa), Liou 等(1997) 推断这个反应发生的条件为 $p < 0.8$ GPa 和 $t < 550$ ℃, 因此,这个反应结构说明退变质路径已进入了绿片岩和角闪岩相的界限附近,并穿切了这个反应带,进入了绿片岩域。

5 年代学特征

片麻岩 DL12-5-4.2,采样位置为 N36°31.435', E 98°22.857', 矿物组合主要由石榴石、蓝晶石、条纹长石、黑云母和石英等组成。该样品中锆石成浑圆状,粒度不均匀。锆石 CL 图像显示大部分锆石具有明显的震荡环带,少数锆石无分带或弱分带。也见少数锆石具明显的核-边结构,弱发光的锆石边部内部结构不明显,无分带或弱分带,属变质成因锆石。拉曼光谱和 EDS 分析显示锆石边部含有石榴石、金红石和石英等矿物包裹体。对锆石核部、边部进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试,由于大部分暗边宽度小于 20 μm,因而无法进行测试,详细的测试结果见表 3。锆石核部年龄变化较大,主要分布于 618~2458 Ma 之间。其中~900 Ma 的年龄结果相对集中,考虑到锆石既有变质成因,又有岩浆成因,推测片麻岩源区在新元古代早期经历强烈的构造热事件。锆石边

表 2 都兰副片麻岩中金红石的 LA-ICP-MS 微量元素含量及温度计算结果

Table 2 Trace element compositions in rutiles by LA-ICP-MS from paragneiss in Dulan area and temperatures estimated by Zr-in-rutile geothermometers

点号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	C _{r2} O ₃	Nb ₂ O ₅	ZrO ₂	Zr/10 ⁻⁶	$t(Z)/^{\circ}\text{C}$	$t(W)/^{\circ}\text{C}$	$t(T)/^{\circ}\text{C}$
DL12-5-3-2-1	0.0021	0.0085	99.54	0.2583	0.0453	0.3835	0.0915	677	853	740	745
DL12-5-3-2-2	0.0185	0.0029	99.14	0.2785	0.0342	0.3532	0.0768	568	829	724	729
DL12-5-3-2-3	0.0227	0.0085	98.99	0.3123	0.0234	0.2965	0.0685	507	814	713	719
DL12-5-3-2-4	0.0153	0.0062	99.02	0.5144	0.0897	0.3467	0.0432	320	752	672	680
DL12-5-3-2-5	0.0154	0.0031	98.88	0.2378	0.1233	0.3578	0.1008	746	866	750	755
DL12-5-3-2-6	0.0124	0.0045	99.66	0.2778	0.0889	0.4834	0.0615	455	799	703	710
DL12-5-3-2-7	0.0223	0.0068	98.96	0.4235	0.0512	0.5253	0.0473	350	764	680	688
DL12-5-3-2-8	0.0512	0.0031	99.26	0.6424	0.0812	0.3734	0.0516	362	776	688	695
DL12-5-3-2-9	0.0145	0.0025	99.12	0.2551	0.0545	0.1954	0.1732	1281	939	806	808
DL12-5-3-2-10	0.0065	0.0052	98.93	0.2532	0.0623	0.2742	0.1625	1202	930	799	802
DL12-5-3-2-11	0.0345	0.0074	98.76	0.3168	0.0567	0.4233	0.0889	658	849	738	743
DL12-5-3-2-12	0.0095	0.0025	99.38	0.2479	0.0765	0.2732	0.0723	535	821	718	724
DL12-5-3-2-13	0.019	0.0053	99.23	0.3645	0.0897	0.2823	0.0625	462	802	705	711
DL12-5-3-2-14	0.017	0.0024	99.57	0.2309	0.0789	0.2024	0.0725	536	822	718	724
DL12-5-3-2-15	0.0028	0.0016	99.45	0.2359	0.0587	0.2234	0.1872	1385	949	815	817
DL12-5-3-2-16	0.0002	0.0042	99.54	0.2405	0.0452	0.1224	0.1965	1454	956	821	822
DL12-5-3-2-17	0.0096	0.0051	99.12	0.2309	0.0445	0.1612	0.2253	1667	974	836	837

注: $t(Z)$ 为根据 Zack 等(2004)的公式计算的温度结果; $t(W)$ 为根据 Watson 等(2006)的公式计算的温度结果; $t(T)$ 为根据 Thorlakson 等(2007)的公式以压力为 1.5 GPa 计算的温度结果; SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、FeO、Cr₂O₃、Nb₂O₅、ZrO₂ 的单位为 $w\%$ 。

表3 副片麻岩 DL12-5-4.2 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of paragneiss DL12-5-4.2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	I_{G}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	I_{G}	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	I_{G}	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	I_{G}	年龄/Ma	
	Th	U	Pb													
1	46	253	134	0.18	0.07112	0.00019	1.47276	0.0084	0.15023	0.00083	961	6	919	3	902	5
2	27	175	88	0.15	0.06961	0.00018	1.42790	0.0100	0.14877	0.00099	917	1	901	4	894	6
3	12	149	41	0.08	0.06501	0.00030	0.97664	0.0099	0.10892	0.00092	776	9	692	5	666	5
4	44	119	108	0.37	0.06978	0.00021	1.45962	0.0107	0.15167	0.00099	922	6	914	4	910	6
5	61	225	78	0.27	0.07089	0.00020	1.48455	0.0125	0.15188	0.00123	954	6	924	5	912	7
6	57	124	149	0.46	0.06953	0.00028	1.44497	0.0103	0.15072	0.00093	915	9	908	4	905	5
7	30	205	121	0.15	0.06928	0.00036	1.34009	0.0194	0.14025	0.00186	907	10	863	8	846	10
8	81	60	461	1.34	0.11300	0.00048	5.01193	0.0437	0.32173	0.00278	1850	8	1821	7	1798	14
9	54	83	241	0.65	0.08146	0.00025	2.35747	0.0174	0.20985	0.00142	1232	6	1230	5	1228	8
10	31	280	156	0.12	0.07176	0.00022	1.59402	0.0098	0.16114	0.00103	989	7	968	4	963	6
11	55	93	183	0.59	0.07039	0.00076	1.45940	0.0264	0.15030	0.00150	939	22	914	11	903	8
12	86	125	580	0.69	0.10000	0.00027	3.77976	0.0255	0.27412	0.00171	1633	4	1588	5	1562	9
13	10	115	73	0.09	0.07070	0.00022	1.46994	0.0101	0.15082	0.00101	950	6	918	4	906	6
14	97	55	689	1.76	0.10085	0.00030	3.89949	0.0279	0.28038	0.00182	1640	10	1614	6	1593	9
15	31	305	217	0.10	0.07147	0.00022	1.48997	0.0088	0.15128	0.00089	972	6	926	4	908	5
16	56	66	380	0.85	0.10338	0.00054	3.55546	0.0362	0.24952	0.00267	1687	10	1540	8	1436	14
17	35	279	181	0.13	0.07122	0.00017	1.49004	0.0090	0.15172	0.00086	965	5	926	4	911	5
18	62	666	666	0.72	0.16021	0.00058	8.58118	0.0932	0.38734	0.00316	2458	7	2295	10	2110	15
19	63	70	253	0.90	0.07081	0.00028	1.46833	0.0099	0.15042	0.00090	954	8	917	4	903	5
20	297	291	1.135	1.02	0.07092	0.00038	1.45920	0.0188	0.14928	0.00199	955	11	914	8	897	11
21	48	96	192	0.50	0.07066	0.00026	1.48014	0.0112	0.15196	0.00105	948	8	922	5	912	6
22	58	266	227	0.22	0.07017	0.00037	1.44867	0.0356	0.14969	0.00341	1000	10	909	15	899	19
23	49	84	215	0.58	0.07022	0.00058	1.47435	0.0234	0.15236	0.00244	1000	17	920	10	914	14
24	36	36	181	1.00	0.08666	0.00053	2.44316	0.0258	0.20458	0.00200	1354	11	1255	8	1200	11
25	114	99	629	1.15	0.10419	0.00024	4.13712	0.0298	0.28802	0.00202	1700	5	1662	6	1632	10
26	87	88	500	0.98	0.10572	0.00037	4.36835	0.0578	0.29967	0.00395	1728	40	1706	11	1690	20
27	91	116	269	0.79	0.07103	0.00028	1.47215	0.0107	0.15045	0.00109	967	8	919	4	903	6

续表 3

Continued Table 3

点号	$w_{\text{H}}/10^{-6}$			比值			年龄/Ma									
	Th	U	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
28	20	365	92	0.05	0.07062	0.00016	1.38754	0.0116	0.14247	0.00114	946	4	884	5	859	6
29	35	286	10	0.12	0.05580	0.00087	0.52907	0.0085	0.06876	0.00043	453	34	431	6	429	3
30	54	169	177	0.32	0.07149	0.00026	1.49907	0.0129	0.15211	0.00127	972	12	930	5	913	7
31	46	76	241	0.60	0.11176	0.00031	4.79897	0.0376	0.31153	0.00250	1.828	0	1.785	7	1.748	12
32	346	501	962	0.69	0.07212	0.00029	1.50271	0.0229	0.15111	0.00225	991	8	931	9	907	13
33	38	133	116	0.28	0.06431	0.00050	0.89191	0.0117	0.10067	0.00119	752	12	647	6	618	7
34	64	89	338	0.72	0.10586	0.00029	4.20839	0.0446	0.28822	0.00284	1.729	38	1.676	9	1.633	14
35	77	106	223	0.72	0.07132	0.00072	1.48755	0.0373	0.15134	0.00368	966	20	925	15	908	21
36	52	178	167	0.29	0.07169	0.00024	1.50775	0.0179	0.15253	0.00177	977	6	934	7	915	10
37	36	177	125	0.20	0.07091	0.00024	1.48605	0.0108	0.15209	0.00111	954	7	925	4	913	6
38	40	218	17	0.18	0.05576	0.00037	0.53041	0.0045	0.06902	0.00037	443	15	432	3	430	2
39	84	223	360	0.38	0.09314	0.00049	2.98036	0.0533	0.23193	0.00372	1.500	11	1.403	14	1.345	19
40	37	175	114	0.21	0.07094	0.00026	1.46676	0.0123	0.14995	0.00118	967	8	917	5	901	7
41	103	189	260	0.54	0.07062	0.00019	1.48795	0.0102	0.15285	0.00105	946	6	925	4	917	6
42	87	134	230	0.65	0.07145	0.00027	1.49515	0.0109	0.15187	0.00108	970	13	928	4	911	6
43	85	406	254	0.21	0.07120	0.00015	1.49359	0.0102	0.15218	0.00108	965	5	928	4	913	6
44	108	399	20	0.27	0.05667	0.00085	0.54572	0.0112	0.06968	0.00061	480	40	442	8	434	4
45	165	469	129	0.35	0.07206	0.00062	1.50286	0.0246	0.15125	0.00243	987	18	932	10	908	14
46	34	222	109	0.15	0.07045	0.00019	1.48125	0.0119	0.15253	0.00122	943	-27	923	5	915	7
47	47	567	197	0.08	0.07291	0.00022	1.53428	0.0123	0.15284	0.00136	1.013	6	944	5	917	8
48	30	179	136	0.17	0.07244	0.00045	1.57609	0.0238	0.15775	0.00213	998	12	961	9	944	12
49	32	85	135	0.37	0.07333	0.00077	1.54004	0.0542	0.15235	0.00549	1.033	17	947	22	914	31
50	22	131	115	0.17	0.09127	0.00039	2.89361	0.0417	0.22982	0.00307	1.454	8	1.380	11	1.334	16
51	116	469	209	0.25	0.07383	0.00028	1.53890	0.0262	0.15117	0.00261	1.037	7	946	10	908	15
52	49	137	179	0.35	0.07204	0.00041	1.51199	0.0128	0.15240	0.00123	987	11	935	5	914	7
53	36	90	131	0.40	0.09604	0.00047	2.49259	0.0322	0.18828	0.00240	1.550	9	1.270	9	1.112	13
54	213	198	559	1.08	0.07033	0.00020	1.45698	0.0100	0.15035	0.00106	939	6	913	4	903	6
55	45	551	212	0.08	0.07220	0.00036	1.51055	0.0196	0.15178	0.00205	991	14	935	8	911	11
56	17	97	107	0.17	0.06959	0.00027	1.43993	0.0105	0.15012	0.00105	917	7	906	4	902	6
57	43	76	180	0.57	0.07052	0.00031	1.46591	0.0148	0.15064	0.00129	943	-23	916	6	905	7
58	23	205	180	0.11	0.07719	0.00024	1.93471	0.0568	0.18162	0.00135	1.128	6	1.093	6	1.076	7

部获得了3个相对和谐年龄结果,其加权平均年龄

为 431 ± 9 Ma,应代表片麻岩峰期变质时代(图7)。

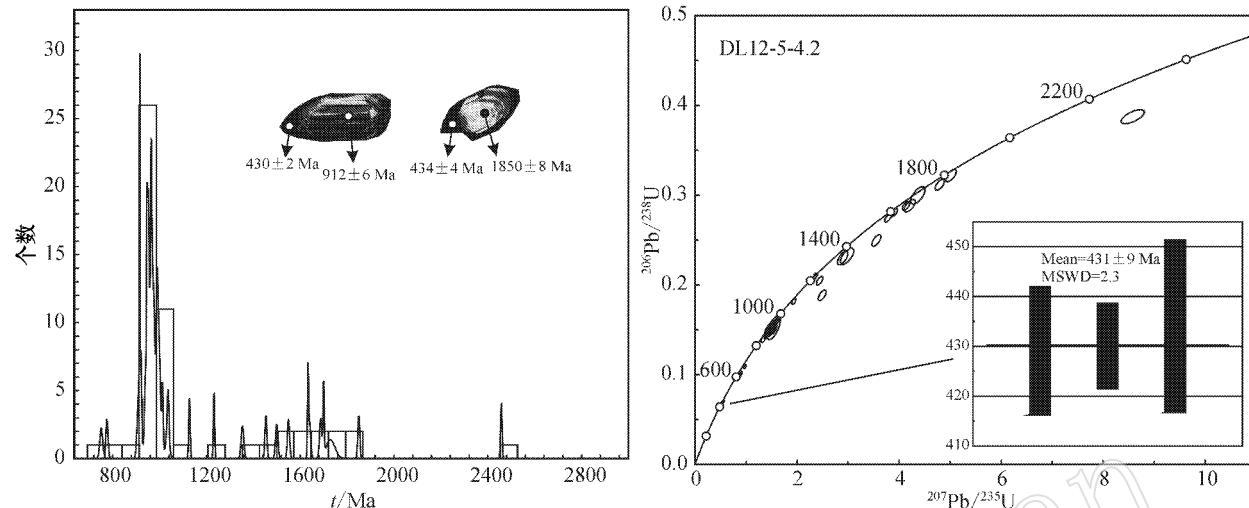


图7 副片麻岩 DL12-5-4.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄图

Fig. 7 Zircon LA-ICP-MS U-Pb diagram of paragneiss DL12-5-4.2

6 讨论

根据岩相学、矿物化学、变质反应序列和温压估算结果,确定都兰地区蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩的变质演化 $p-t$ 轨迹为顺时针型。早期进变质阶段(M1)以石榴石核部出现的Bt+Ms+Pl+Qtz包裹体为特征,而且粗粒石榴石保存了完整的进变质生长环带。副片麻岩的峰期矿物组合为石榴石+蓝晶石+条纹长石+斜长石+石英±黑云母,与典型的长英质-泥质高压麻粒岩的峰期矿物组合一致,指示该片麻岩同样经历了高压麻粒岩相变质作用,金红石 Zr 温度计和GASP压力计估算其温压条件为 $t=800\sim840^{\circ}\text{C}$ 和 $p=1.4\sim1.6\text{ GPa}$ 。通常来讲,在高温条件下(一般 $>700^{\circ}\text{C}$)晶内扩散速度的增加经常会导致石榴石等矿物早期的成分环带(Fe、Mg、Ca和Mn)被拭去或已发生了均一化。但都兰地区蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩部分粗粒石榴石还保存了完整的进变质生长环带,类似的现象在其它地区高压麻粒岩中也有报道(如波西米亚地块的Moldanubian高压麻粒岩,Cooke et al., 2000;北大别黄土岭高压麻粒岩,Chen et al., 1998, 2006;东南极高压麻粒岩,Liu et al., 2009)。最新研究表明短暂的滞留时间是高温条件下进变质生长环带和早期进变质矿物组合保存完好的重要条件,即石榴石半径越大,高温条件下滞留时间越短,石榴石生长环带保存越完

整。Medaris 等(2006)通过定量计算显示直径为800~1000 μm 的石榴石在900°C条件下滞留时间不超过10 Ma才能保存完好的生长环带。根据以上分析,推测蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩在峰期滞留时间应小于15~20 Ma。初始角闪石退变质过程以石榴石、蓝晶石周围发育大量黑云母为主要特征,估算出该阶段的变质条件为 $p=0.95\sim1.15\text{ GPa}$ 和 $t=578\sim677^{\circ}\text{C}$,暗示了略降温降压的快速折返过程。最后大量含水矿物绿帘石、白云母和钠长石的出现指示岩石已折返到~20 km的中上地壳环境,并伴随着连续的温度、压力降低。

都兰地区蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩顺时针 $p-t$ 轨迹指示其可能形成于陆-陆(弧)碰撞环境,800°C和1.5 GPa的峰期温压条件指示其可能形成于约50~60 km的地壳深度环境。已有研究表明,都兰地区该片麻岩包裹的基性高压麻粒岩同样具有典型的顺时针 $p-t$ 演化轨迹,其峰期温压条件分别为 $t=800\sim950^{\circ}\text{C}$ 和 $p=1.5\sim1.85\text{ GPa}$ (于胜尧等,2009; Yu et al., 2011)。野外关系、岩相学和年代学资料显示都兰基性高压麻粒岩属O'Brien和Rötzler(2003)所定义的高压/高温-超高温类型高压麻粒岩,并具有与相邻榴辉岩不同的变质演化历史,而不是榴辉岩在抬升过程中热松弛作用所致,基性高压麻粒岩形成在俯冲带之上的大陆地壳环境,而榴辉岩形成于相对冷的大陆俯冲板片中(于胜尧等,2009, 2010; Yu et al., 2011, 2012)。本文研究的

结果显示蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩与基性高压麻粒岩可能形成于相同的构造环境,主要证据如下:
①从野外关系来看,基性高压麻粒岩呈透镜状分布在副片麻岩中,两者应为“原地”接触关系;②锆石U-Pb年代学结果显示它们具有近乎一致的峰期变质时代425~445 Ma(于胜尧等,2011,2013);③基性高压麻粒岩和副片麻岩具有相似的顺时针 p_t 轨迹,而且一致的峰期变质条件进一步证实二者具有相同的变质演化历史。因此,本文认为都兰地区高压麻粒岩及其围岩副片麻岩同时形成于俯冲带上盘增厚的下地壳环境。

7 结论

(1)野外和岩相学观察显示柴北缘都兰地区蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩经历了高压麻粒岩相变质作用。

(2)矿物演化序列和变质反应序列结果显示都兰蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩共经历了4阶段的变质演化:I早期进变质阶段以石榴石核部发育的黑云母、白云母、斜长石和石英等矿物包裹体为特征;II峰期高压麻粒岩相阶段的矿物组合为:石榴石+蓝晶石+条纹长石+斜长石+石英±黑云母;III高角闪岩相退变质阶段的矿物组合:石榴石(边部)+黑云母+长石+石英;IV晚期低角闪岩相-绿片岩相退变质阶段以蓝晶石周围出现的Ms+Pl±Zo和Mrg+Qtz±Ms±Pl后成合晶为特征。金红石Zr温度计和GASP压力计限定其峰期温压条件为: $t=800\sim840^{\circ}\text{C}$ 和 $P=1.4\sim1.6 \text{ GPa}$ 。

(3)蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩的峰期变质时代为431 Ma。

(4)确定都兰地区蓝晶-石榴-黑云-二长片麻岩具有顺时针的 p_t 演化轨迹,与基性高压麻粒岩形成于相同的动力学过程。

References

- Carswell D A and O'Brien P J. 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif in lower Austria[J]. Journal of Petrology, 34: 427~459.
- Chatterjee N D, Johannes W and Leistner H. 1984. The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: new phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 88: 1~13.
- Chen N S, Sun M, You Z D, et al. 1998. Well-preserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, central China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 16: 213~222.
- Chen Y, Ye K, Liu J B, et al. 2006. Multistage metamorphism of the Huangtuling granulite, Northern Dabie Orogen, eastern China: implications for the tectonometamorphic evolution of subducted lower continental crust[J]. Journal of Metamorphic Geology, 24: 633~654.
- Chen Y, Ye K, Liu J B, et al. 2008. Quantitative P-T-X constraints on orthopyroxene-bearing high-pressure granulites in felsic-metapelitic rocks: evidence from the Huangtuling granulite, Dabie Orogen[J]. Journal of metamorphic Geology, 26(1): 1~15.
- Cooke R A. 2000. High-pressure/temperature metamorphism in the St. Leonhard Granulite Massif, Austria: evidence from intermediate pyroxene-bearing granulites[J]. Int. J. Earth Sci., 89: 631~651.
- Degeling H S. 2003. Zr equilibria in met amorphic rocks[D]. Canberra: Australian National University: 1~231.
- Ding Ling and Zhong Dalai. 1999. Metamorphic characteristic and geotectonic implications of the high-pressure granulite from Namjagbarwa, eastern Tibet[J]. Science in China(D), 42(5): 491~505(in Chinese).
- Droop G T R. 1987. A general equation for Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria[J]. Mineralogical Magazine, 51: 431~435.
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, et al. 1993. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulite melange belt on the south edge of the Huainan complex, North China craton: geological features, petrology and isotopic geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 9(4): 329~341(in Chinese with English abstract).
- Guo J H, O'Brien P J and Zhai M G. 2002. High-pressure granulites in the sanggan area, North China Craton: Metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance[J]. Journal of Metamorphic Geology, 20(8): 741~756.
- Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: timing of Paleoproterozoic continental collision [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 629~642.
- Guilmette C, Indares A and Hébert R. 2011. High-pressure anatetic paragneisses from the Namche Barwa, Eastern Himalayan Syntaxis: Textural evidence for partial melting, phase equilibria modeling and tectonic implications[J]. Lithos, 124: 66~81.
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective [J]. Geological Magazine, 126: 215~247.
- Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer[J]. American Mineralogist 85, 881~892.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dat-

- ing using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Indares A D. 2003. Metamorphic textures and P-T evolution of high-P granulites from the Lelukua terrane, NE Greenville Province[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 35~48.
- Janak M, O'Brien P J, Hurai V, et al. 1996. Metamorphic evolution and fluid composition of garnet-clinopyroxene amphibolites from the Tatra Mountains, Western Carpathians[J]. *Lithos*, 39: 57~79.
- Li Jianghai, Zhai Mingguo, Li Yonggang, et al. 1998. The discovery of Neoarchean high-pressure granulites in Luanping-Chengde area, Northern Hebei, and their tectono-geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34~41 (in Chinese with English abstract).
- Li Q L, Li S G, Zheng Y F, et al. 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China: A new constraint on the cooling history [J]. *Chemical Geology*, 200(3~4): 255~265.
- Liou J G, Zhang R Y and Jahn B M, et al. 1997. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, East-central China[J]. *Lithos*, 41: 59~78.
- Liu Fulai, Shen Qihan, Zhao Ziran, et al. 2002. Identification of High-pressure mineral assemblages in garnet mafic granulites, Northwestern Hebei province: Evidence from mineral inclusions in zircon[J]. *Acta Geological Sinica*, 76(2): 209~216 (in Chinese with English abstract).
- Liu X C, Hu J M, Zhao Y, et al. 2009. Late Neoproterozoic/Cambrian high-pressure mafic granulites from the Grove Mountains, East Antarctica: P-T-t path, collisional orogeny and implications for assembly of East Gondwanan[J]. *Precambrian Research*, 174: 181~199.
- Liu Liang and Zhou Dingwu. 1994. Discovery and study of high-pressure basic granulites in Songshugou area of Shannan, east Qinling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39: 1 599~1 601 (in Chinese).
- Liu Liang, Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, et al. 1995. High pressure metabasite and their retrograde metamorphic P-T-t path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, et al. 1996. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41: 1 485~1 488 (in Chinese).
- Liu Wenjun, Zhai Mingguo and Li Yonggang. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulites in Laixi, Eastern Shandong, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449~459 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 451~466.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 2010. 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*, 51: 537~571.
- Ma Jun and Wang Renmin. 1995. The discovery of Coexisting Kyanite + Perthite Assemblage in Xuanhua-Chicheng High-pressure Granulite Belt and Its Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 273~278 (in Chinese with English abstract).
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. 2006. Age and Duration of Eclogite-facies Metamorphism, North Qaidam HP/UHP Terrane, Western China[J]. *American Journal of Science*, 306: 683~711.
- Medaris E D, Ghent H F, Wang J H, et al. 2006. The Spaciec eclogite: constraints on the P-T-t history of the Gfohl granulite terrane, Moldanubian Zone, Bohemian Massif[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 86: 203~220.
- Miller C, Zanetti A, Thoni M, et al. 2007. Eclogitisation of gabbroic rocks: Redistribution of trace elements and Zr in rutile thermometry in an Eo-Alpine subduction zone Eastern Alps[J]. *Chemical Geology*, 239(1~2): 96~123.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- O'Brien P J. 1997. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides, a record of their thermal history during exhumation[J]. *Lithos*, 41: 119~133.
- O'Brien P J. 2006. Type-locality granulites: high-pressure rocks formed at eclogite-facies conditions[J]. *Mineralogy and Petrology*, 86: 161~175.
- O'Brien P J and Rötzler J. 2003. High-Pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implication for tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 3~20.
- Rötzler J and Romer R L. 2001. P-T-t Evolution of Ultrahigh-Temperature Granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany. Part I: Petrology[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 1 995~2 013.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. 2003. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China[J]. *Lithos*, 70: 195~211.
- Spear F S, Wark D A and Cheney J T. 2006. Zr-in-rutile thermometry in blueschists from Sifnos, Greece[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 375~385.
- Tam P K, Zhao G C, Zhou X W, et al. 2012. Metamorphic P-T path and implications of high-pressure peritic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 220~221: 177~191.
- Thomkins H S, Powell R and Ellis D J. 2007. The pressure dependence of the zirconium in rutile thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*,

- Geology, 25: 703~713.
- Watson E B, Wark D A and Thomas J B. 2006. Crystallization at ion thermometers for zircon and rutile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151(4): 413~433.
- Wei Chunjing, Zhang Cuiguang, Zhang Ali, et al. 2001. Metamorphic P-T conditions and geological significance of high-pressure granulite from the Jianping complex, western Liaoning province[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 269~282 (in Chinese with English abstract).
- Whitney D L. 1996. Garnets as open systems during regional metamorphism [J]. Geology, 24(2): 147~150.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J L, et al. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating of the Yematan batholith in Dulan, north Qaidam, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1736~1740 (in Chinese).
- Wu C M, Zhang J and Ren L D. 2004. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GPBQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites[J]. Journal of Petrology, 45(9): 1907~1921.
- Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, et al. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the northern Qaidam Ultrahigh-pressure metamorphic belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 28: 160~173.
- Yang Jianjun, Zhu Hong, Deng Jinfu, et al. 1994. The discovery of garnet peridotite in Northern Chaidam Mountains and its significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(2): 97~104 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic UHP metamorphic belt, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Deloule E, et al. 2007. Contribution of water in granulite to the nature and evolution of lower crust[J]. Progress in Natural Science, 17(2): 148~162 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin and Li Jinping. 2009. Metamorphism history and dynamics of high-pressure granulites in the Dulan area of the North Qaidam Mountains, northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(9): 2224~2234 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Li Jinping, et al. 2010. Zircon U-Pb geochronology of high-pressure granulite and its tectonic implications in the Dulan area, North Qaidam Mountains, western China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(2): 139~150 (in Chinese with English abstract).
- Yu S Y, Zhang J X and Pablo G D R. 2011. Petrology and P-T path of high pressure granulite from the Dulan area, North Qaidam Mountains, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 42: 641~660.
- Yu S Y, Zhang J X and Pablo G D R. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb ages of adakites from the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, north Tibet: constraints on the timing and nature of regional tectonothermal events associated with collisional orogeny [J]. Gondwana Research, 21(1): 167~179.
- Yu S Y, Zhang J X, Li H K, et al. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of eclogite and their host gneisses in the Dulan area, North Qaidam UHP terrane: New evidence for deep continental subduction[J]. Gondwana Research, 23: 901~919.
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Gong Jianghua, et al. 2013. Research on HP granulite-facies metamorphism and anatexis: a case study of Dulan area in the North Qaidam Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(6): 2061~2072 (in Chinese with English abstract).
- Zack T, Moraes R and Kronz A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148: 471~488.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, et al. 1992. Discovery and preliminary study on the Archean high pressure basic granulites from North China[J]. Science in China (B), 35(12): 1325~1330 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui and Li Yonggang. 1994. Rock units of the Archean granulite terrain in joining region of Shanxi-Hebei-Nei Mongol of North China: their properties, mutual relations and evolution[A]. Qian Xianglin and Wang Renmin. Geological Evolution of the Granulite Terrain in North Part of the North China Craton [C]. Beijing: Seismological Press, 21~31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. 2005. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: P-T history and U-Pb geochronology[J]. Journal of Metamorphic Geology, 23: 491~510.
- Zhang Jianxin and Meng Fancong. 2005. Sapphirine-bearing high pressure mafic granulite and its implications in the South Altyn Tagh[J]. Chinese Science Bulletin, 50: 265~269 (in Chinese).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, et al. 2007. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology[J]. Earth Science Frontiers, 14(1): 85~97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. 2008a. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: Evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. Geological Society of America Bulletin, 120: 732~749.
- Zhang G B, Song S G, Zhang L F, et al. 2008b. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: evidence from petrology, geochemistry and geochronology[J]. Lithos, 104: 99~118.

- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Li Jinping, et al. 2009a. Coesite in eclogite from the North Qaidam and its implication [J]. Chinese Science Bulletin, 54(6):1 105~1 110.
- Zhang G B, Zhang L F and Song S G. 2009b. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 35:310~322.
- Zhang J X, Yu S Y, Meng F C, et al. 2009. Paired high-pressure granulite and eclogite in collision orogens and their geodynamic implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(9):2 050~2 066 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, et al. 2010. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction [J]. Journal of Metamorphic Geology, 28(9):955~978.
- Zhao G C, Carwood P A, Wilde S A, et al. 2001. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications [J]. Journal of Petrology, 42(6):1 141~1 170.
- Zhou X W, Wei C J, Geng Y S, et al. 2004. Discovery and implications of the high pressure pelitic granulite from the Jiaobei massif [J]. Chinese Science Bulletin, 49(14):1 942~1 948 (in Chinese).
- Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, et al. 2008. EPMA U-Th-Pb Monazite and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei Massif of the North China crator [J]. American Journal of Sciences, 308:328~350.
- 刘良,周鼎武. 1994. 东秦岭商南高压基性麻粒岩的发现及其初步研究 [J]. 科学通报, 9(17):1 599~1 601.
- 刘良,周鼎武,董云鹏,等. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 PT 演化轨迹 [J]. 岩石学报, 11(2):127~136.
- 刘良,车自成,罗金海,等. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义 [J]. 科学通报, 41(16):1 485~1 488.
- 马军,王仁民. 1995. 宣化-赤城高压麻粒岩中蓝晶石-正条纹长石组合的发现及其地质意义 [J]. 岩石学报, 11(3):273~278.
- 曲军峰,张立飞,艾永亮,等. 2007. 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹 SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义 [J]. 中国科学 (D), 37(4):429~441.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. 岩石矿物学杂志, 28(5):495~500.
- 魏春景,张翠光,张阿利,等. 2001. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 P-T 条件及地质意义 [J]. 岩石学报, 17(2):269~282.
- 吴才来,杨经绥,Wooden J L. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年 [J]. 科学通报, 49(16):1 667~1 672.
- 杨建军,朱红,邓晋福,等. 1994. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 13(2):97~104.
- 杨经绥,宋述光,许志琴,等. 2001. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物-柯石英 [J]. 地质学报, 75(2):175~179.
- 于胜尧,张建新,李金平. 2009. 柴北缘都兰高压麻粒岩的变质演化及形成的动力学背景 [J]. 岩石学报, 25(9):2 224~2 234.
- 于胜尧,张建新,李金平. 2010. 柴北缘都兰高压麻粒岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 29(2):139~150.
- 于胜尧,张建新,宫江华,等. 2013. 高压麻粒岩相变质作用及深熔作用:以柴北缘都兰地区为例 [J]. 岩石学报, 29(6):2 061~2 072.
- 翟明国,郭敬辉,阎月华,等. 1992. 中国华北太古宙基性高压麻粒岩的发现及初步研究 [J]. 中国科学, 22(12):1 325~1 330.
- 翟明国,郭敬辉,李永刚. 1994. 晋冀蒙交界地区高压麻粒岩带及其相邻岩石组合的性质 [A]. 钱祥麟,王仁民. 华北北部麻粒岩相带地质演化 [C]. 北京:地震出版社, 121~129.
- 张建新,孟繁聪. 2005. 南阿尔金含假蓝宝石高压基性麻粒岩及其意义 [J]. 科学通报, 50(2):167~171.
- 张建新,孟繁聪,于胜尧. 2007. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史:岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据 [J]. 地学前缘, 14:85~97.
- 张建新,于胜尧,孟繁聪. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义 [J]. 岩石学报, 25(9):2 050~2 066.
- 周喜文,魏春景,耿元生,等. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 49(14):1 424~1 430.

附中文参考文献

- 丁林,钟大赉. 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义 [J]. 中国科学(D), 29(5):385~397.
- 郭敬辉,翟明国,张毅刚,等. 1993. 怀安冀青沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学 [J]. 岩石学报, 9:1~13.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术 [J]. 矿床地质, 28(4):481~492.
- 李江海,翟明国,李永刚,等. 1998. 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义 [J]. 岩石学报, 14(1):34~41.
- 刘福来,沈其韩,赵子然,等. 2002. 冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质矿物组合的确定及其形成的温压条件——来自锆石中包裹体的信息 [J]. 地质学报, 76(2):209~216.
- 刘文军,翟明国,李永刚. 1998. 胶东莱西地区基性高压麻粒岩的变质作用 [J]. 岩石学报, 14(4):449~459.