第45卷 第1期 岩 石 矿 物 学 杂 志 Vol. 45, No. 1: 1~18
2026年1月 ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA Jan., 2026

·专题研究·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2026.5041

藏东同卡微陆块泥质高压麻粒岩的变质作用及地质意义

田作林[1],张泽明[1,2],陈言飞[3],董 昕[1]
(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘 要: 同卡微陆块位于青藏高原中部的班公湖-怒江缝合带东段,其内发育的变质岩和岩浆岩记录了早侏罗世特提斯洋的构造演化历史。微陆块内泥质高压麻粒岩呈夹层状产于主体长英质片麻岩中,可见规模不等的淡色体。泥质高压麻粒岩由石榴子石、蓝晶石、黑云母、钾长石、石英和少量斜长石、白云母、夕线石和金红石组成。岩相学、矿物化学成分、年代学和相平衡模拟表明麻粒岩经历了一条顺时针型*p-T-t*演化轨迹,可划分为3个阶段:① 近等压升温进变质阶段,通过石榴子石核部成分和包裹体黑云母的成分确定进变质温压条件为0.70~0.88 GPa和655~680℃;② 峰期变质阶段,峰期矿物组合为石榴子石+蓝晶石+黑云母+钾长石+石英+金红石+熔体±斜长石,根据峰期矿物组合的稳定区域与石榴子石幔部和基质黑云母化学成分限定峰期温压条件为0.98~1.06 GPa和770~790℃,锆石记录的175 Ma的变质年龄代表了高压麻粒岩相峰期的变质时代;③ 降温降压退变质阶段,矿物组合为黑云母+斜长石+夕线石+白云母,根据其稳定区域限定温压条件为0.32~0.68 GPa和600~725℃。泥质高压麻粒岩记录的变质*p-T-t*演化轨迹记录了同卡微陆块与羌塘地块碰撞后的地壳加厚过程,其中等压升温的进变质阶段可能代表微陆块下地壳受到上涌软流圈的持续加热过程。

关键词: 高压麻粒岩; 微陆块; 同卡; 班公湖-怒江缝合带
中图分类号: P588.34+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2026)01-0001-18

Metamorphism and geological significance of pelitic high-pressure granulites in the Tongka microcontinent block, eastern Xizang

TIAN Zuo-lin[1], ZHANG Ze-ming[1,2], CHEN Yan-fei[3] and DONG Xin[1]
(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Tongka microcontinent block, situated in the eastern segment of the Bangong-Nujiang suture zone in the central Tibetan Plateau, preserves key evidence of the Early Jurassic tectonic evolution of the Tethyan Ocean through its metamorphic and magmatic records. Pelitic high-pressure granulites occur as interlayers within dominant felsic gneisses and are accompanied by leucosomes of varying scales. These granulites are primarily composed of garnet, kyanite, biotite, K-feldspar, quartz, with minor accounts of plagioclase, muscovite, sillimanite, and rutile. Integrated analyses—petrography, mineral chemistry, geochronology, and phase equilibrium modeling—reveal a clockwise metamorphic *p-T-t* path that can be divided into three distinct stages: ① Near-isobaric heating prograde metamorphic stage: this stage is characterized by prograde conditions of 0.70~0.88 GPa and 655~680℃, constrained

收稿日期: 2025-04-17; **接受日期:** 2025-10-25; **编辑:** 郝艳丽
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20240100702, DD20221630); 国家自然科学基金项目(U2244203, 41872069); 中国地质科学院基本科研业务费(JKYQN202315)
作者简介: 田作林(1986-), 男, 副研究员, 变质地质学专业, E-mail: zuolin.tian@gmail.com。

by the compositions of garnet cores and associated biotite inclusions; ② Peak metamorphic stage: the peak mineral assemblage—garnet + kyanite + biotite + K-feldspar + quartz + rutile + melt ± plagioclase—formed under conditions of 0.98 ~ 1.06 GPa and 770 ~ 790℃, as indicated by phase stability fields and the compositions of garnet mantles and matrix biotite. Zircon U-Pb dating yields a metamorphic age of 175 Ma, representing the timing of high-pressure granulite-facies metamorphism; ③ Cooling and decompression retrograde stage: The retrograde assemblage of biotite + plagioclase + sillimanite + muscovite reflects post-peak conditions of 0.32 ~ 0.68 GPa and 600 ~ 725℃. This clockwise *p-T-t* path reflects crustal thickening associated with the collision between the Tongka microcontinent block and the Qiangtang terrane. The near-isobaric heating stage likely records prolonged thermal input from upwelling asthenosphere into the thickened lower crust of the microcontinent.

Key words: high-pressure granulite; microcontinent block; Tongka; Bangong-Nujiang suture zone

Fund support: China Geological Survey Project (DD20240100702, DD20221630); National Natural Science Foundation of China (U2244203, 41872069); Basic Scientific Research Operating Fund of the Chinese Academy of Geological Sciences (JKYQN202315)

作为深部地壳物质组成和变质过程的直接记录者,麻粒岩的高温变质与深熔作用过程与时限一直是造山带形成与演化研究中的热点和前沿(Brown and Johnson, 2019; 魏春景等, 2021)。地质历史中的俯冲、碰撞造山过程具有复杂且类型多变的特点,如洋-陆型俯冲、洋-洋型俯冲、洋-洋岛型俯冲、陆-陆型碰撞和弧-陆型碰撞等(Stern, 2002; Zheng and Chen, 2016)。增生型造山作用会出现在多期俯冲、碰撞造山过程中,微陆块或残余弧的俯冲碰撞过程是增生造山作用的主要形式之一,它们可能仰冲到大陆地壳之上,也可能俯冲到大陆地壳之下,还可能同时接受洋壳的持续俯冲,因此揭示微陆块或残余弧的变质作用过程与时代是构建增生型造山作用过程的关键。

同卡微陆块是班公湖-怒江缝合带内保存的典型微陆块,它保存了早侏罗世岩浆作用和变质作用信息,记录了拉萨地体与羌塘地体之间早侏罗世发生的俯冲-碰撞过程(Zhang *et al.*, 2008; 张万平等, 2010; Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2021)。然而,有关同卡微陆块的构造演化过程与花岗质岩石形成的大地构造背景仍然存在诸多争议。有学者认为同卡微陆块与羌塘地块在中晚三叠世发生碰撞(Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018),但也有学者认为二者的碰撞发生在早侏罗世(Peng *et al.*, 2020)。Chen 等(2018)认为微陆块内出露的花岗质岩石是班公-怒江洋俯冲形成的弧岩浆岩,但 Li 等(2017)认为班公-怒江洋并未俯冲到微陆块之下,花岗质岩石形成于碰撞环境,另外还有学者虽然认为班公-怒江洋俯冲到了微陆块之下,但花岗质岩石应来源于加厚下地壳的重熔(Peng *et al.*, 2020)。为了澄清这些争议,本文对微陆块内出露的泥质高压麻粒岩开展了系统的岩石学和年代学研究,构建了变质 *p-T-t* 演化轨迹,并结合有关岩浆岩、蛇绿岩和沉积岩等最新研究成果,重建了同卡微陆块早侏罗世的构造演化过程。

1 区域地质背景

班公湖-怒江缝合带位于青藏高原中部,东西向延长约 2 000 km,南北两侧分别为拉萨地体和羌塘地体(图 1),该缝合带记录了中生代班公-怒江洋的俯冲过程与拉萨-羌塘地块的碰撞过程(Yin and Harrison, 2000; Kapp *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2016; 刘文等, 2019; 吴建亮等, 2024)。班公湖-怒江缝合带的东段存在两个大的微陆块(图 1a),分别是安多微陆块和八宿微陆块(尹峥等, 2023)。安多微陆块也被称为聂荣微陆块(解超明等, 2014),它主要由前寒武纪结晶基底、寒武纪侵入岩、古生代地层及中生代侵入岩和变质岩组成(解超明等, 2014; 尹峥等, 2023)。八宿微陆块也被称为嘉玉桥微陆块(Liu *et al.*, 2021, 2022),夹在丁青蛇绿混杂岩带与八宿蛇绿混杂岩带之间(图 1b),分别与北侧的羌塘地体与南侧的拉萨地体相隔。Li 等(2017)根据微陆块中部出露的俄学蛇绿混杂岩带,将八宿微陆块进一步划分为东北侧的同卡微陆块和西南侧的嘉玉桥残余弧(Zhang *et al.*, 2008; 尹峥等, 2023)。丁青蛇绿混杂岩带主要分布在丁青县境内,出露面积大,以不发育席状岩群和枕状熔岩、仅出露方辉橄

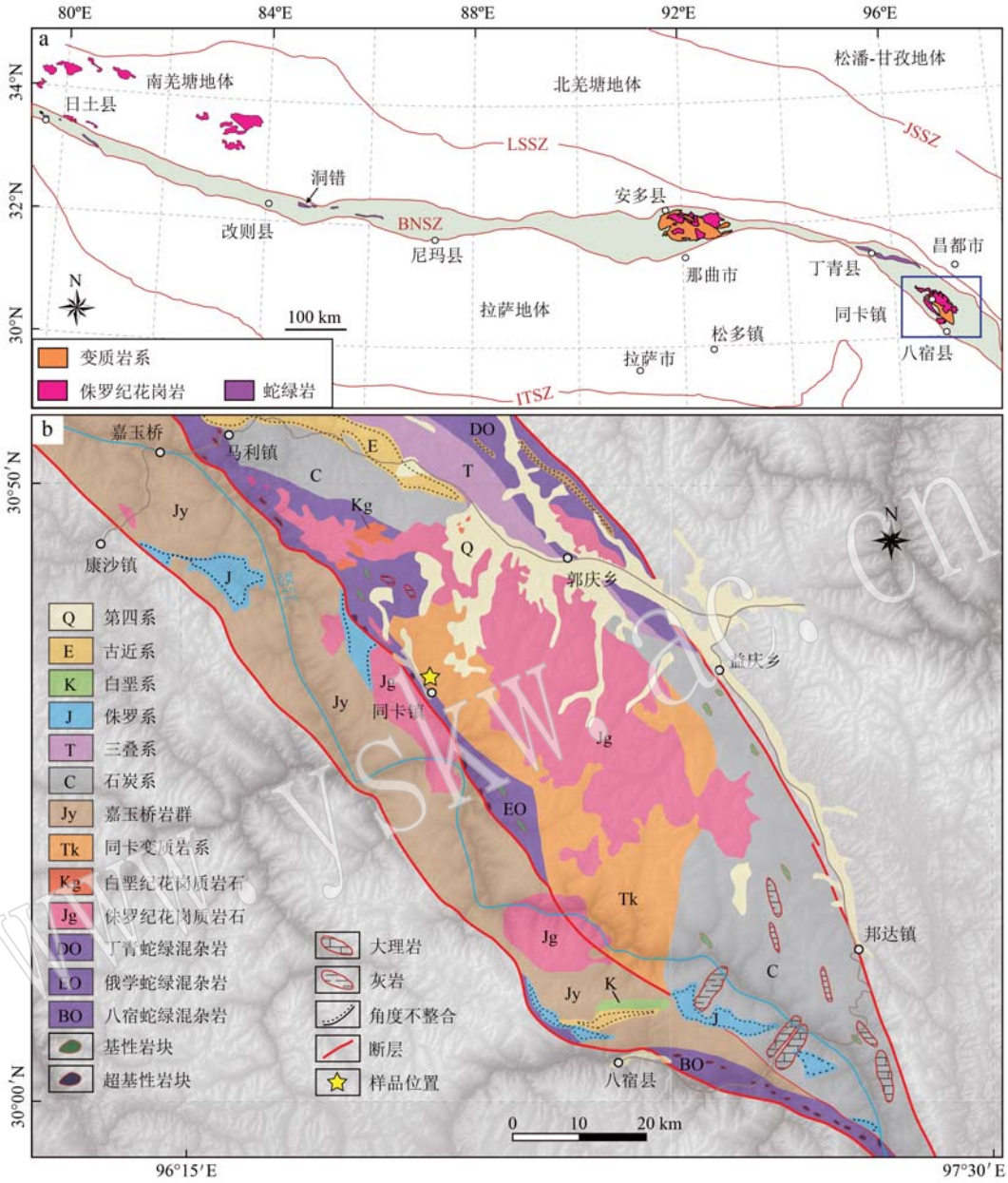

图 1　班公湖-怒江缝合带地质简图(a)和八宿微陆块地质简图(b)(修改自王冬兵等, 2021)

Fig. 1　Simplified geological map of the Bangong-Nujiang suture zone (a) and geological framework of the Basu microcontinental(b) (modified from Wang Dongbing *et al.*, 2021)

BNSZ—班公湖-怒江缝合带; JSSZ—金沙江缝合带; LSSZ—龙木措-双湖缝合带; ITSZ—印度-雅鲁藏布江缝合带

BNSZ—Bangong-Nujiang suture zone; JSSZ—Jinsha suture zone; LSSZ—Longmu Co-Shuanghu suture zone; ITSZ—Indus-Tsangpo suture zone

榄岩和厚层纯橄岩为主要特征(刘朋东等, 2024),记录了多期次的岩浆作用,最老的年龄为堆晶辉长岩的 218 Ma(强巴札西等, 2009),广泛发育的岩浆事件发生在 187~183 Ma,主要形成辉石岩、辉长岩、英云闪长岩和斜长花岗岩等(薄容众等, 2019; 刘飞等, 2021; 刘朋东等, 2024); 晚期的岩浆事件记录在辉长岩及侵入其中的淡色辉长岩脉中,年龄分别为 175 Ma 和 164 Ma(李小波, 2016; Wang *et al.*, 2016)。俄学蛇绿混杂岩带由石英片岩、二云母片岩、石榴石英片岩、大理岩、钠长绿帘阳起石片岩、黝帘阳起石片岩、千枚岩和绢云板岩、硅质板岩等组成,在堆晶辉长岩中获得锆石 U-Pb 年龄 267±8 Ma,时代归属石炭纪—二叠纪(王立全等, 2013)。李化启等(2021)报道了俄学蛇绿岩混杂岩带内变玄武岩角闪

石 Ar-Ar 坪年龄为 161 Ma,与丁青蛇绿岩带最晚期岩浆事件时代相当。八宿蛇绿混杂岩带主要由板岩、千枚岩、变砂岩、硅质岩组成,并混杂有超基性岩、大理岩、灰岩岩块(王立全等, 2013)。

同卡微陆块主要由寒武纪正片麻岩及大量侵入的侏罗纪岩浆岩组成(李才等, 2008; Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; 康朝龙等, 2019; Peng *et al.*, 2020),微陆块内还出露少量中新元古代的斜长角闪岩和正片麻岩(何世平等, 2012a; Liu *et al.*, 2021)。嘉玉桥残余弧也被称为嘉玉桥群(何世平等, 2012b),主要由变沉积岩、变火山岩和灰岩组成,前人曾报道嘉玉桥群变玄武岩锆石 U-Pb 的上交点年龄为 566 ± 27 Ma,然而嘉玉桥群内生物化石主要为石炭-二叠纪化石,因此我们更倾向于将其时代归于晚古生代。近年也有学者将位于同卡微陆块东部的石炭纪地层划归为嘉玉桥群,并认为其是怒江大桥-邦达地区嘉玉桥群的一套俯冲增生杂岩(王冬兵等, 2021)。该套石炭系的主体岩性为灰绿、灰黑色千枚岩夹灰黑色变质砂岩、灰黑色板岩、灰黑色结晶灰岩、大理岩夹玄武岩,局部可见辉绿岩块体。地层中砂岩的地层最大沉积年龄为 510 Ma(王冬兵等, 2021; 尹峥等, 2023),玄武岩块中基性锆石 U-Pb 年龄为 338 Ma(王冬兵等, 2021),辉绿岩块锆石年龄为 331 Ma(任飞等, 2022),灰岩块体中含有早石炭世腕足类、牙形石、双壳类及少许腹足类生物化石(王克勇,1998),因此该套地层的沉积时代被初步限定为寒武纪—早石炭世,并认为其并非增生楔,而是属于具有变质基底的微陆块,应归于同卡微陆块(尹峥等, 2023)。同卡微陆块周缘发育上三叠统—始新统,下白垩统沉积时代为 113 Ma,具有前陆盆地沉积特征,其碎屑物质来源主要为南羌塘地体,次要为北拉萨地体,因此判断拉萨地体与羌塘地体的碰撞发生在早白垩世晚期(Yin *et al.*, 2024)。

同卡微陆块发育大面积早侏罗世花岗质岩石,形成时代为 187~171 Ma(Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2020),花岗质岩石主要为 I 型花岗岩(Li *et al.*, 2017; Peng *et al.*, 2020),也有少量 S 型花岗岩(Chen *et al.*, 2018)。有学者认为这套花岗岩形成于同卡微陆块与羌塘地体碰撞过程中(Li *et al.*, 2017),也有学者认为其为一套岛弧岩浆岩,形成于班公-怒江洋的北向俯冲过程中(Chen *et al.*, 2018),但另外一些学者认为这套花岗岩形成于碰撞后同卡微陆块加厚下地壳重熔(Peng *et al.*, 2020)。有学者在同卡微陆块内识别出两期早侏罗世基性岩浆活动,早期辉长岩(197~191 Ma)以透镜体形式产于片麻岩中,后期角闪辉长岩(177~175 Ma)呈岩墙侵入到片麻岩中,认为这两期岩浆事件代表了羌塘地块在早侏罗世经历了长期持续的岩石圈伸展与减薄,可能与北向俯冲的班公-怒江洋洋壳的板片回卷有关(Xu *et al.*, 2021)。

同卡微陆块内的变质岩主要由长英质片麻岩组成,岩石类型包括黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩、片麻状黑云碱长花岗岩、片理化二长花岗岩和变质花岗闪长岩等(李才等, 2008; Li *et al.*, 2017; 康朝龙等, 2019),片麻岩原岩的结晶年龄为 507~492 Ma(李才等, 2008; Li *et al.*, 2017; 康朝龙等, 2019),Li 等(2017)报道花岗片麻岩发生了早侏罗世变质作用(173 Ma)。泥质片岩呈夹层状产于片麻岩中,与片麻岩呈断层接触,陈言飞(2019) 报道泥质片岩也发生了早侏罗世变质作用(178~176 Ma),峰期温压条件为 1.0~1.2 GPa 和 770~810℃。高压麻粒岩和超高压榴辉岩分别以透镜体形式产于泥质片岩和片麻岩中(Zhang *et al.*, 2008; 张万平等, 2010),Xu 等(2021)限定了变辉长岩经历了 180 Ma 的角闪岩相/麻粒岩相变质作用。泥质高压麻粒岩也呈夹层状产于片麻岩中,局部可见高压麻粒岩和退变榴辉岩的透镜体。

2 分析方法

矿物化学成分电子探针分析在中国地质科学院地质研究所测试完成,采用日本电子 JEOL 公司生产的 JXA-8100 型电子探针进行测试,运行条件为 15 kV 加速电压,5 nA 射速电流,峰值和背景的计数时间均为 10 s,束斑设定为 5 μm。采用天然和合成标准样品进行测试,采用 ZAF 进行校正。

全岩主量元素化学成分的测试工作在国家地质实验测试中心测试完成。为了获得典型的全岩地球化学成分,将大约 500 g 岩石样品碎成粉末进行测试。全岩主量元素氧化物含量采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)(PW4400)测试,测试方法依据 GB/T 14506.28-2010 标准执行,分析精度优于 5%。全岩中化合水量(H_2O^+)测试方法依据 GB/T 14506.2-2010 标准执行,分析精度优于 5%。

锆石制靶和阴极发光成像在北京中兴美科科技有限公司完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年

与微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程和矿产资源国家重点实验室完成。本次测试采用 Elan6100DRC 型 ICP-MS 仪器与 Geolas200M 深紫外 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统完成,激光束斑直径 24 μm,采用 He 作为剥蚀物质的载气,标准锆石 91500 作为外标, ^{29}Si 作为内标。采用 ICPMSDataCal(V10.8) 软件对同位素比值和微量元素数据进行处理,详细的仪器运行条件和数据处理方法见 Hu 等(2011)和 Liu 等(2010)。谐和图的绘制与加权平均年龄的计算采用 IsoplotR 程序完成(Vermeesch, 2018)。

3　岩石学特征

泥质高压麻粒岩呈夹层状产于花岗质片麻岩中,少数新鲜样品露头可见细粒石榴子石变斑晶和“补丁状”长英质淡色体(图 2a),保存了高压麻粒岩的矿物组合,多数样品遭受后期改造,退变为石榴黑云母片岩或石榴二云母片岩。本次研究从 7 块较新鲜的泥质高压麻粒岩样品中选择了 MP-1 和 MP-3 样品开展详细的岩石学和年代学研究。

3.1　岩相学特征

泥质高压麻粒岩主要由石榴子石、蓝晶石、黑云母、钾长石、石英和少量斜长石、白云母、夕线石和金红石组成(图 2)。石榴子石变斑晶多为半自形,含有金红石、石英、黑云母和斜长石等包体,边部被细粒黑云母和斜长石取代(图 2b、2c)。中粒蓝晶石、黑云母以及钾长石和石英条带构成主期片理(图 2d、2e),代表了峰期矿物组合;细粒白云母产于黑云母颗粒间隙(图 2d、2f)或蓝晶石边缘(图 2e、2g、2h),推测其为退变质矿物;斜长石以细粒为主,产出在钾长石和石英等矿物的间隙(图 2d、2f),判断其应为退变质矿物,但样品 MP-3 中的个别斜长石为中粒,构成主期片理,推测其可能为峰期矿物;细粒夕线石呈针状,主要分布在蓝晶石边部(图 2g),应为退变质矿物。

3.2　矿物化学成分

样品的矿物电子探针成分见表 1。泥质高压麻粒岩中石榴子石是富镁的铁铝榴石,其成分变化区间为 $X_{Fe}=0.64\sim0.73$, $X_{Mg}=0.16\sim0.25$, $X_{Ca}=0.04\sim0.11$, $X_{Mn}=0.01\sim0.03$。样品 MP-1 中石榴子石变斑晶的化学成分剖面呈现了比较显著的环带特征(图 3a)。从核部到边部,X_{Mn}、X_{Fe} 和 X_{Ca} 均呈现先降低后升高的趋势,而 X_{Mg} 则表现为先升高后降低的特征,这表明石榴子石核部-幔部具有典型的进变质环带特征,而幔部-边部则表现为受到扩散影响的退变质环带特征,这可能与岩石退变过程中石榴子石边部和黑云母间的 Fe-Mg 交换有关(Florence and Spear, 1991; Spear, 1991; Kohn and Spear, 2000; Caddick *et al.*, 2010),也可能与退变石榴子石的分解有关(Escuder Viruete *et al.*, 2000; Kohn and Spear, 2000)。相比而言,样品 MP-3 中石榴子石变斑晶未记录显著的成分环带(图 3b),从核部到边部,X_{Mn} 和 X_{Fe} 均呈现略微升高的趋势,而 X_{Mg} 则表现为略微降低的趋势,与样品 MP-1 中石榴子石幔部到边部记录的成分环带特征相同,因此可以认为样品 MP-1 中石榴子石幔部和样品 MP-3 中石榴子石核部分别记录了它们的峰期变质阶段。

泥质高压麻粒岩中的黑云母具有相似的化学成分(图 4a),但样品 MP-1 中石榴子石核部包裹的黑云母具有较低的 Ti 含量(0.06~0.12 a.p.f.u.),推测其为进变质矿物,这与石榴子石核部保存进变质成分环带一致;相比而言,样品 MP-1 中基质黑云母与样品 MP-3 中的包体和基质黑云母均含有较高的 Ti 含量(0.14~0.20 a.p.f.u.),可能代表峰期阶段黑云母的成分。两个样品中的钾长石具有相似的化学成分,Ab 值为 4~15(图 4b)。MP-1 中斜长石比 MP-3 含有较高的 An 值(MP-1:33~35; MP-3:18~20)。

因此,根据岩相学特征和矿物化学成分,我们认为泥质高压麻粒岩记录了 3 期矿物组合,进变质矿物组合为样品 MP-1 石榴子石核部及其包体:石榴子石+黑云母+斜长石+金红石+石英;峰期矿物组合为 MP-1 石榴子石幔部或 MP-3 石榴子石核部及基质矿物:石榴子石+蓝晶石+黑云母+钾长石+石英+金红石+熔体±斜长石;退变质矿物组合为石榴子石、蓝晶石与黑云母边部的反应边矿物:黑云母+斜长石+夕线石+白云母。

4　锆石 U-Pb 年代学

锆石 U-Pb 定年结果见表 2。泥质高压麻粒岩中的锆石呈半自形-自形短柱状,无色,颗粒长径约为 70~150 μm。阴极发光图像显示,多数锆石具有不规则状的较明亮的继承核,较暗的边部一般比较窄,

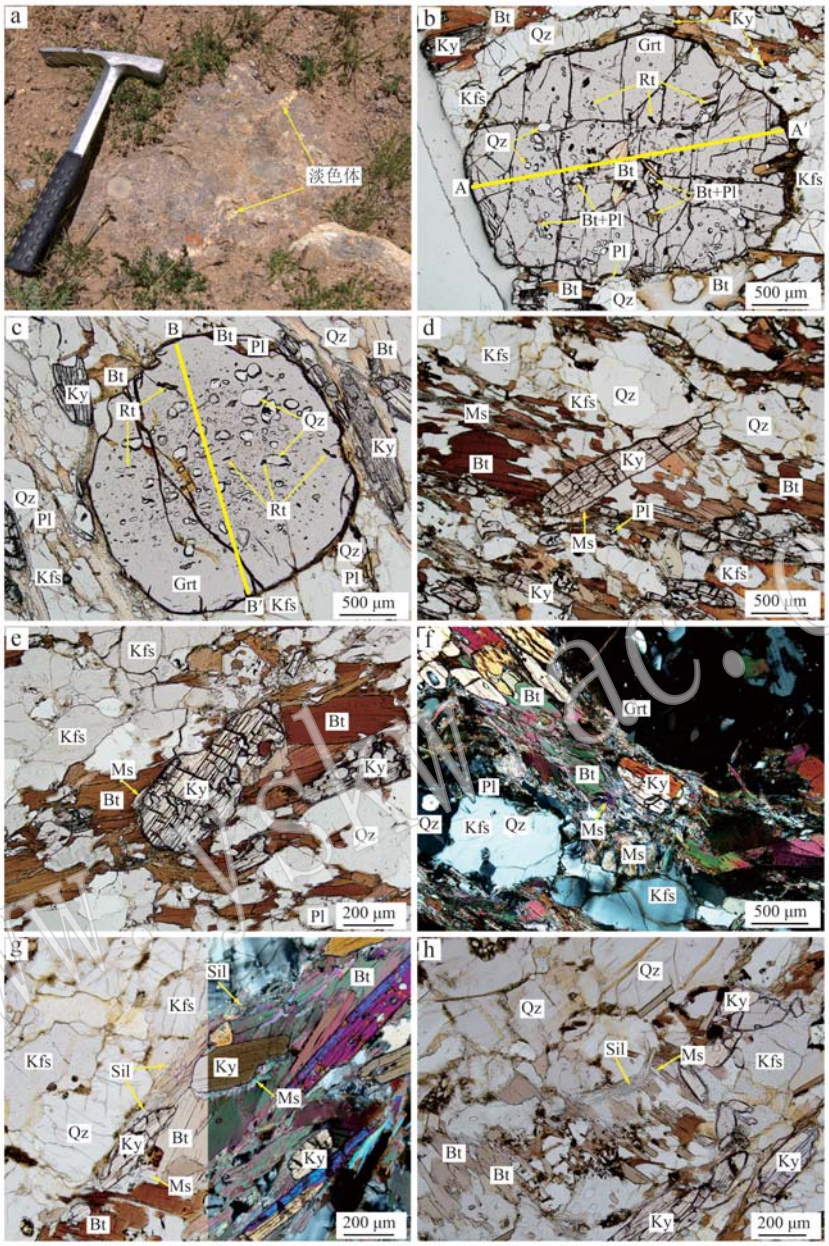

图 2 泥质高压麻粒岩野外露头照片和显微照片

Fig. 2 Field outcrop and photomicrographs of pelitic high-pressure granulite

a—泥质高压麻粒岩及其中“补丁状”长英质淡色体；b—石榴子石变斑晶包裹黑云母、斜长石、石英和金红石，基质为黑云母、钾长石、石英、蓝晶石(样品 MP-1，单偏光)；c—石榴子石变斑晶包裹石英和金红石，基质为黑云母、钾长石、斜长石、石英、蓝晶石(样品 MP-3，单偏光)；d、e—中粒蓝晶石变斑晶，边部见白云母(样品 MP-1/MP-3，单偏光)；f—黑云母、钾长石、蓝晶石和石英基质矿物边部和间隙发育细粒白云母和斜长石反应边(样品 MP-1，正交偏光)；g—蓝晶石边部发育夕线石、白云母反应边(样品 MP-1，左图为单偏光，右图为正交偏光)；h—针状夕线石和白云母共生(样品 MP-1，单偏光)；b 和 c 中标注 A—A’ 和 B—B’ 实线对应图 3 中石榴子石成分环带的分析测试位置；矿物代号引自 Whitney 和 Evans(2010)

a—pelitic high-pressure granulite and the “patchy” felsic leucosomes within it; b—garnet porphyroblast includes biotite, plagioclase, quartz and rutile, with a matrix composed of biotite, K-feldspar, quartz and kyanite (Sample MP-1, plane-polarized light); c—garnet porphyroblast includes quartz and rutile, with a matrix of biotite, K-feldspar, plagioclase, quartz and kyanite (Sample MP-3, plane-polarized light); d, e—medium-grained kyanite porphyroblast shows muscovite along their margins (Samples MP-1/MP-3, plane-polarized light); f—fine-grained muscovite and plagioclase reaction rims developed at the edges and interstices of matrix minerals such as biotite, K-feldspar, kyanite and quartz (Sample MP-1, cross-polarized light); g—sillimanite and muscovite reaction rims formed at the margins of kyanite (Sample MP-1; left: plane-polarized light, right: cross-polarized light); h—intergrowth of acicular sillimanite and muscovite (Sample MP-1, plane-polarized light); the lines labelled A—A’ and B—B’ in b and c refer to the locations of the zoning profiles across garnet in Fig. 3; mineral abbreviations are cited from Whitney and Evans(2010)

表 1　泥质高压麻粒岩代表性矿物电子探针分析　　w_B/%

Table 1　EPMA analysis of representative minerals in pelitic high-pressure granulite

样品	MP-1	MP-1	MP-1	MP-3	MP-3	MP-1	MP-1	MP-3	MP-3	MP-1	MP-1	MP-1	MP-3	MP-3
矿物	Grt-C	Grt-M	Grt-R	Grt-C	Grt-R	Bt-I	Bt	Bt-I	Bt	Ms	Pl	Kfs	Pl	Kfs
SiO_2	37.32	38.10	37.22	38.29	37.34	38.19	37.94	38.38	38.03	47.55	59.67	65.00	65.09	64.84
TiO_2	0.00	0.01	0.04	0.03	0.02	1.14	2.76	2.57	3.48	0.87	0.00	0.03	0.00	0.02
Al_2O_3	20.69	20.85	21.07	20.36	20.32	19.25	19.45	19.05	18.09	34.05	25.69	18.49	21.77	18.12
Cr_2O_3	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.07	0.07	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	32.94	31.55	32.80	31.96	33.27	15.88	16.25	16.33	16.79	1.26	0.12	0.04	0.07	0.05
MnO	1.10	0.41	0.73	0.65	1.23	0.00	0.02	0.04	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
MgO	3.96	6.04	5.04	6.30	5.46	11.29	9.09	9.92	9.14	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	2.99	2.45	2.29	1.86	1.85	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	7.02	0.08	3.83	0.04
Na_2O	0.00	0.04	0.01	0.00	0.02	0.22	0.13	0.13	0.22	0.42	7.22	1.23	8.85	1.39
K_2O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	9.21	9.71	9.62	9.59	10.09	0.22	14.85	0.25	15.05
Total	99.01	99.45	99.20	99.46	99.52	95.24	95.40	96.11	95.39	95.08	99.96	99.71	99.88	99.52
O	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	8	8	8	8
Si	3.01	3.01	2.97	3.03	2.98	2.83	2.82	2.83	2.84	3.16	2.66	3.00	2.87	3.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.16	0.14	0.20	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.97	1.95	1.99	1.90	1.91	1.68	1.71	1.66	1.59	2.66	1.35	1.01	1.13	0.99
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe^{3+}	0.02	0.03	0.06	0.03	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe^{2+}	2.20	2.06	2.13	2.09	2.08	0.99	1.01	1.01	1.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.08	0.03	0.05	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.48	0.71	0.60	0.74	0.65	1.25	1.01	1.09	1.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.26	0.21	0.20	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.18	0.00
Na	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.62	0.11	0.76	0.13
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.92	0.91	0.91	0.85	0.01	0.87	0.01	0.89
X(phase)	0.16	0.24	0.20	0.25	0.22	0.56	0.50	0.52	0.49		0.35	0.11	0.19	0.12

C—核部；M—幔部；R—边部；I—包体；$X(Grt)=Mg/(Mg+Fe^{2+}+Mn+Ca)$；$X(Bt)=Mg/(Mg+Fe^{2+})$；$X(Pl)=Ca/(Ca+Na+K)$；$X(Kfs)=Na/(Ca+Na+K)$。

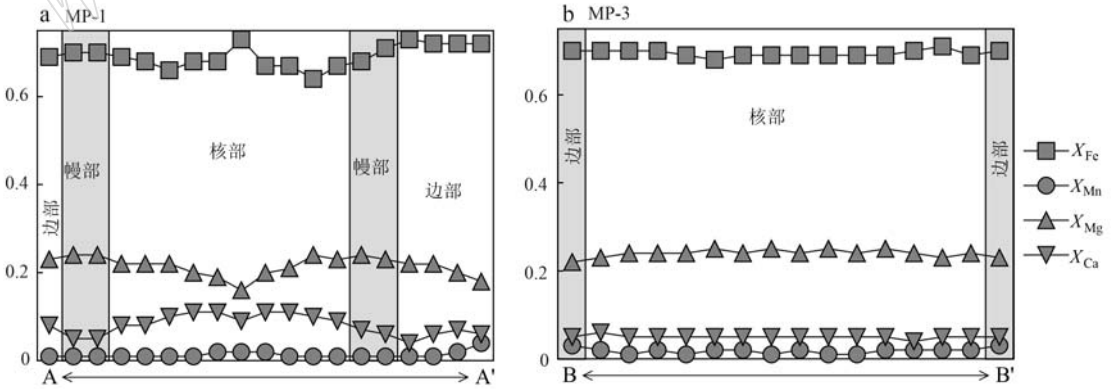

图 3　泥质高压麻粒岩中石榴子石的成分环带特征

Fig. 3　Compositional zoning profiles of garnet in pelitic high-pressure granulite

$X_{Fe}=Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$，$X_{Mg}=Mg/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$，$X_{Mn}=Mn/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$，$X_{Ca}=Ca/(Fe^{2+}+Mg+Mn+Ca)$

而少数无继承核的颗粒也表现为不具有环带、暗色的发光特征，推测为变质锆石(图 5)。分析结果表明，两个样品 MP-1 和 MP-3 中的变质锆石均得到了谐和年龄(图 6a、6b)，它们的$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄分别为 174.8±1.7 Ma 和 175.5±1.9 Ma(图 6c、6d)，Th/U 值范围为 0.01~0.03(表 2)，表明该年龄代表了岩石的变质年龄。

锆石的稀土元素成分见表 3。由表 3 可见，变质锆石的稀土元素总量为 41×10^{-6}~137×10^{-6}(表 3)，并具有重稀土元素(HREE)配分曲线平坦、Eu轻微

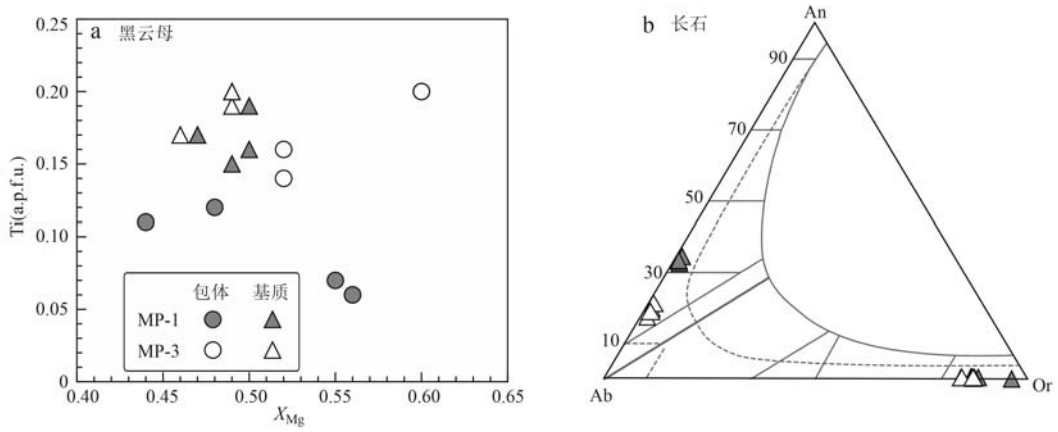

图 4 泥质高压麻粒岩中黑云母和长石成分图

Fig. 4 The compositions of biotite and feldspar from pelitic high-pressure granulite

表 2 泥质高压麻粒岩中锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon U-Pb geochronological result for pelitic high-pressure granulite

样品点位	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				rho	年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	$\pm1\sigma$		$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
MP-1@01	45.2	1 426	0.03	0.180 2	0.006 0	0.027 5	0.000 4	0.405 8	168.3	5.2	174.8	2.3
MP-1@02	18.8	2 134	0.01	0.180 2	0.005 8	0.027 4	0.000 4	0.410 4	168.2	5.0	174.4	2.3
MP-1@03	28.0	1 142	0.02	0.189 0	0.006 8	0.027 4	0.000 4	0.408 7	175.8	5.8	174.5	2.5
MP-1@04	14.9	1 481	0.01	0.180 3	0.005 9	0.027 4	0.000 4	0.440 2	168.3	5.0	174.3	2.5
MP-1@05	50.6	1 237	0.04	0.187 0	0.007 0	0.027 8	0.000 4	0.404 2	174.1	6.0	176.8	2.7
MP-1@06	29.4	1 165	0.03	0.189 0	0.007 2	0.027 4	0.000 4	0.357 4	175.8	6.1	174.3	2.3
MP-1@07	40.8	1 357	0.03	0.196 3	0.007 3	0.027 5	0.000 4	0.432 7	182.0	6.2	174.7	2.8
MP-1@08	8.6	1 308	0.01	0.189 2	0.006 8	0.027 5	0.000 4	0.441 6	175.9	5.8	175.0	2.7
MP-1@09	35.3	1 199	0.03	0.186 6	0.006 4	0.027 5	0.000 4	0.447 9	173.7	5.4	174.9	2.6
MP-3@01	36.2	1 337	0.03	0.199 8	0.006 5	0.027 6	0.000 4	0.412 3	185.0	5.5	175.7	2.3
MP-3@02	24.8	980	0.03	0.200 1	0.009 1	0.027 5	0.000 4	0.346 0	185.2	7.7	174.7	2.7
MP-3@03	30.3	1 206	0.03	0.201 4	0.008 8	0.027 6	0.000 5	0.396 0	186.3	7.4	175.5	3.0
MP-3@04	38.9	1 483	0.03	0.192 0	0.007 5	0.027 6	0.000 5	0.448 8	178.4	6.4	175.6	3.1
MP-3@05	39.6	1 400	0.03	0.196 9	0.007 0	0.027 6	0.000 4	0.454 0	182.5	6.0	175.7	2.8
MP-3@06	32.1	1 245	0.03	0.194 2	0.006 5	0.027 7	0.000 4	0.466 5	180.2	5.6	175.9	2.7
MP-3@07	33.1	1 345	0.02	0.198 8	0.007 1	0.027 6	0.000 4	0.452 8	184.1	6.0	175.2	2.8
MP-3@08	49.4	1 826	0.03	0.200 6	0.006 9	0.027 6	0.000 4	0.443 4	185.6	5.8	175.3	2.6

负异常的配分特征(图 6e、6f)。

5 相平衡模拟

我们选择在 MnNCKFMASHTO[MnO-Na_2O-CaO-FeO_{total}-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-O(Fe_2O_3)]体系下进行相平衡模拟计算,这是因为该体系最接近真实的泥质岩体系(White *et al.*, 2014b),并且能够很好地模拟泥质高压麻粒岩的矿物组合和矿物化学成分。流体组分设为纯 H_2O。视剖面图采用 2020 年 12 月更新的 THERMOCALC 软件 3.50 版本(Powell *et al.*, 1998)计算,内部一致性热力学数据库采用 Holland 和 Powell (2011)发表的最新版 ds62.txt,固溶体模型采用适用于泥质岩体系的模型(White *et al.*, 2014a),其中斜长石和钾长石采用最新的长石模型(Holland *et al.*, 2022)。

实测全岩成分标准化到 MnNCKFMASHTO 体系,其中 O 代表体系的氧化还原状态(表 4)。考虑到岩石体系中 Fe^{3+} 含量对 *p-T* 视剖面图的相关系经常具有非常重要的影响(Rebay *et al.*, 2010; White *et al.*, 2014a; Green *et al.*, 2016),并且不同阶段的变质作用可能具有不同的氧化还原条件(Groppo and

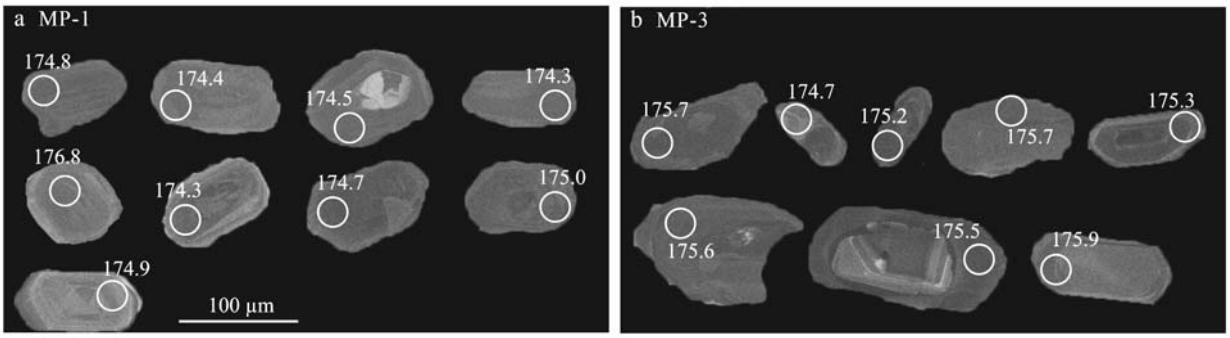

图 5　泥质高压麻粒岩中锆石阴极发光图像以及测试点位和对应的年龄

Fig. 5　Cathodoluminescence images of zircon from pelitic high-pressure granulite, showing locations of the analyzed spots and relevant ages

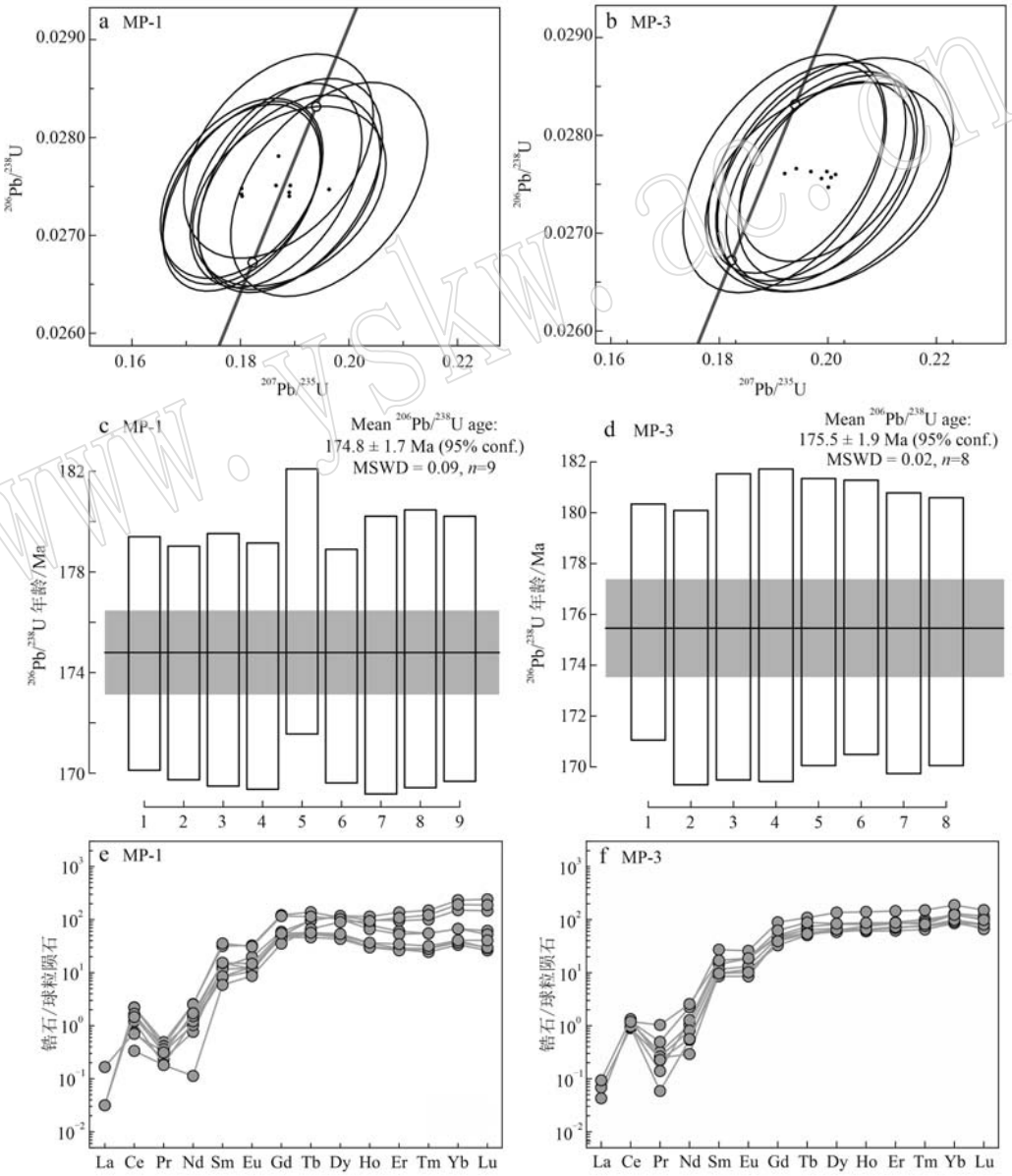

图 6　泥质高压麻粒岩中锆石 U-Pb 谐和图(a、b)、加权平均年龄图(c、d)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(e、f)

Fig. 6　Zircon U-Pb concordia diagrams(a, b), weighted mean age diagrams(c, d) and chondrite-normalized REE patterns(e, f) of pelitic high-pressure granulite

表 3 泥质高压麻粒岩中锆石稀土元素 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Zircon REE concentrations in pelitic high-pressure granulite

样品点位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MP-1@01	0.007	1.805	0.047	1.197	4.861	1.895	25.1	5.189	27.96	4.453	10.02	1.399	11.43	1.570
MP-1@02	0.039	0.607	0.022	0.358	1.965	1.146	12.16	3.587	29.49	5.577	15.87	2.562	25.62	3.743
MP-1@03	0.000	1.215	0.039	0.616	1.795	0.703	9.429	1.992	11.85	1.766	4.541	0.626	5.684	0.668
MP-1@04	0.000	0.571	0.030	0.481	1.245	0.622	10.26	3.611	30.02	6.484	22.78	3.812	39.65	6.150
MP-1@05	0.000	1.786	0.039	1.179	5.437	1.796	24.01	4.276	26.18	3.742	8.803	1.408	11.42	1.341
MP-1@06	0.000	0.991	0.018	0.567	1.302	0.738	10.29	2.033	12.70	2.021	4.748	0.725	6.808	0.739
MP-1@07	0.007	1.363	0.034	0.707	2.327	0.686	9.513	1.728	10.97	1.692	4.361	0.720	6.296	0.756
MP-1@08	0.000	0.272	0.017	0.053	0.901	0.502	7.242	2.500	22.93	5.349	17.89	3.124	32.72	4.807
MP-1@09	0.000	1.188	0.030	0.805	2.357	0.857	11.34	2.123	13.61	2.076	5.713	0.810	6.935	1.033
MP-3@01	0.010	0.936	0.030	0.486	2.206	1.078	10.37	2.770	20.74	4.632	14.72	2.577	20.78	2.632
MP-3@02	0.016	0.728	0.023	0.136	1.494	0.672	6.736	1.899	15.95	4.283	13.88	2.294	22.21	2.975
MP-3@03	0.000	0.765	0.006	0.252	1.309	0.493	8.328	2.061	14.80	3.611	12.05	1.876	15.27	2.043
MP-3@04	0.000	0.788	0.013	0.595	2.595	1.070	9.710	2.409	17.31	3.404	10.25	1.661	14.59	1.784
MP-3@05	0.000	0.976	0.047	1.045	4.160	1.502	18.38	4.085	34.62	7.951	24.11	3.855	32.07	3.858
MP-3@06	0.000	0.971	0.025	0.378	1.764	0.767	9.311	2.096	16.46	3.639	11.50	1.998	15.68	1.679
MP-3@07	0.022	1.081	0.022	0.262	1.482	0.591	8.046	2.029	16.63	3.724	12.00	1.928	16.90	2.056
MP-3@08	0.000	0.968	0.098	1.196	2.607	1.085	12.89	3.307	21.38	4.922	14.49	2.102	21.05	2.516

表 4 泥质高压麻粒岩全岩成分

Table 4 Bulk-rock composition of pelitic high-pressure granulite

实测全岩成分(w_B/%)											
样品	LOI	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	H_2O^+
MP-1	1.07	54.60	23.03	0.48	3.31	9.85	5.61	0.44	1.06	0.09	0.09	1.76
MP-3	0.97	61.37	18.57	0.60	2.82	8.48	4.70	1.21	0.93	0.12	0.04	1.48
相平衡模拟使用的全岩成分(x_B/%)											
对应图件	H_2O	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	O	Total
图 7a	6.407	59.549	14.800	0.422	5.380	8.083	3.902	0.465	0.869	0.083	0.040	100.000
图 7a	6.333	58.858	14.629	0.417	5.318	7.989	3.857	0.460	0.859	0.082	1.198	100.000
图 7b	5.288	65.688	11.712	0.628	4.499	6.829	3.209	1.255	0.749	0.109	0.034	100.000
图 7b	5.236	65.045	11.598	0.621	4.455	6.762	3.177	1.243	0.741	0.108	1.014	100.000
图 8a、8b	6.399	59.476	14.782	0.422	5.374	8.073	3.897	0.465	0.868	0.083	0.161	100.000
图 8c、8d	5.280	65.598	11.696	0.627	4.493	6.820	3.204	1.254	0.748	0.109	0.171	100.000
图 8e、8f	9.280	59.281	13.768	0.436	4.652	7.004	3.765	0.854	0.749	0.072	0.139	100.000

Castelli, 2010; Evans, 2012),因此,本文绘制了 p-Fe^{3+}/Fe_{tot} 视剖面图(图 7)来确定岩石在峰期演化阶段的 Fe^{3+} 含量。图 7 显示了矿物组合与压力和全岩 Fe^{3+} 含量的关系,含有熔体的峰期矿物组合石榴子石+蓝晶石+黑云母+钾长石+石英+金红石±斜长石在 Fe^{3+} 含量较低的区域稳定($Fe^{3+}/Fe_{tot}<0.06$)。为了确保峰期矿物组合能够在 p-T 视剖面图中稳定存在,我们确定样品 MP-1 和 MP-3 的 Fe^{3+}/Fe_{tot} 值分别为 0.04 和 0.05(图 7)。岩石体系中的 H_2O 含量采用实测的全岩 H_2O^+ 含量,代表矿物中的化合水含量总和。图 7a 和 7b 对应的两组全岩成分分别代表 MP-1 和 MP-3 样品 Fe^{3+}/Fe_{tot} 值等于 0.01 和 0.30 的有效全岩成分;图 8a、8b 和图 8c、8d 对应全岩成分分别代表样品 MP-1 和 MP-3 标准化后的实测全岩成分;图 8e、8f 对应全岩成分样品 MP-1 加回丢失熔体后的有效全岩成分。

由于泥质高压麻粒岩发生了部分熔融,产生的熔体很可能已经迁移到岩石体系之外,所以根据实测全岩成分计算的视剖面图理论上只能模拟近峰期阶段和退变质到固相线阶段的变质演化过程(Indares *et al.*, 2008; Groppo and Castelli, 2010)。因此,本文将约 13%的熔体加入到样品 MP-1 的实测全岩成分中,生成的有效全岩成分可以更好地限定泥质高压麻粒岩的进变质演化过程,详细的计算依

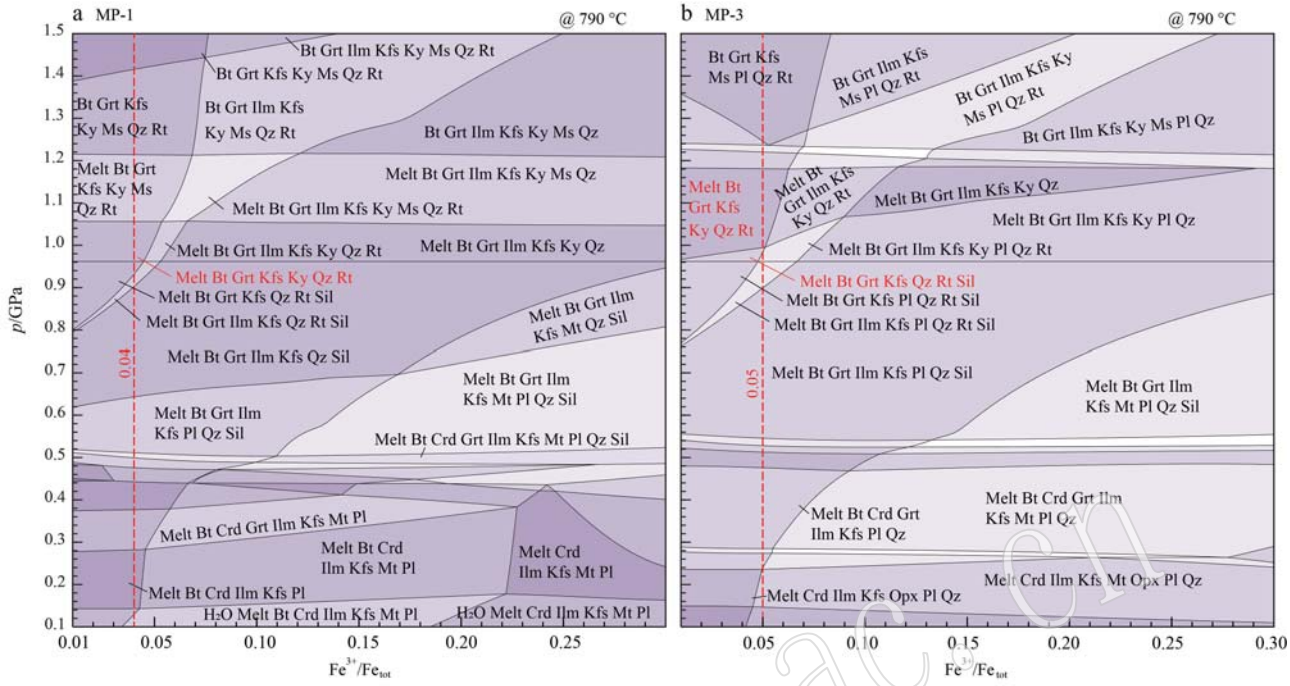

图 7　MnNCKFMASHTO 体系下泥质高压麻粒岩 p-Fe^{3+}/Fe_{tot} 视剖面图

Fig. 7　p-Fe^{3+}/Fe_{tot} pseudosections of pelitic high-pressure granulite in the system MnNCKFMASHTO

据和方法见 Indares 等(2008)。

图 8a~8d 为根据样品实测全岩成分计算的 p-T 视剖面图,在所计算的 0.1~1.5 GPa 和 600~900℃的 p-T 空间中,石英和钾长石几乎一直稳定存在,钾长石仅在高温低压区域消失(p<0.3 GPa 和 t=850℃);石榴子石在低压区域消失(p=0.3~0.6 GPa),而金红石只在较高压力区域稳定(p=0.8~0.9 GPa),并在较低压力区域转变为钛铁矿;白云母消失的界线在视剖面图中呈正斜率,随着压力的升高,其可以稳定到更高的温度,而黑云母一般在温度 800~ 850℃条件下消失;斜长石的稳定区域也主要与温度相关,它一般在温度低于 800℃条件下稳定。熔体在温度高于 670℃条件下出现,在压力小于 0.4 GPa 条件下为饱和水固相线,在压力大于 0.4 GPa 条件下为干固相线。

视剖面图模拟的泥质高压麻粒岩样品 MP-1 和 MP-3 的峰期矿物组合石榴子石+蓝晶石+黑云母+钾长石+石英+金红石+熔体±斜长石均稳定在 0.9~1.4 GPa 和 750~840℃的 p-T 空间(图 8a、8c)。样品 MP-1 和 MP-3 中实测的石榴石幔部/核部的 X_{Mg} 值(MP-1:0.22~0.24; MP-3:0.24~0.25)和基质中黑云母 Ti 含量(MP-1:0.15~0.19 a.p.f.u; MP-3:0.17~0.20 a.p.f.u)在峰期矿物区域内可限定其经历的峰期温压条件分别为 0.92~1.06 GPa、770~790℃和 0.99~1.27 GPa、770~805℃(图 8b、8d)。考虑到石榴子石边部成分和基质黑云母成分可能受到了后期退变质作用的影响,峰期石榴子石的 X_{Mg} 值和峰期黑云母的 Ti 含量可能已经被改造,因此上述限定的峰期温压条件可能仅代表泥质高压麻粒岩峰期的下限。退变质矿物组合黑云母+斜长石+夕线石+白云母在视剖面图中稳定的温压区间为 0.32~0.68 GPa 和 600~725℃。

图 8e、8f 为根据样品 MP-1 加回丢失熔体后的有效全岩成分计算的 p-T 视剖面图,在所计算的 0.1~1.5 GPa 和 600~900℃的 p-T 空间中,钾长石不仅在高温低压区域消失(p<0.3 GPa 和 t> 850℃),而且在低温高压区域消失(p>0.2 GPa 和 t<800℃);石榴子石只在较高压力区域稳定(p=0.3~0.6 GPa),金红石也只在高压区域稳定(p=0.8~0.9 GPa),在低压区域转变为钛铁矿;白云母消失的界线在视剖面图中呈正斜率,随着压力的升高,其可以稳定到更高的温度,而黑云母一般在温度高于 800~880℃条件下消失;斜长石的稳定区域也主要与温度相关,它一般在温度低于 800℃条件下稳定;十字石出现在低温区域(p=0.45~1.0 GPa 和 t< 680℃。熔体在温度大于650℃条件下出现,在所计算的p-T空间内

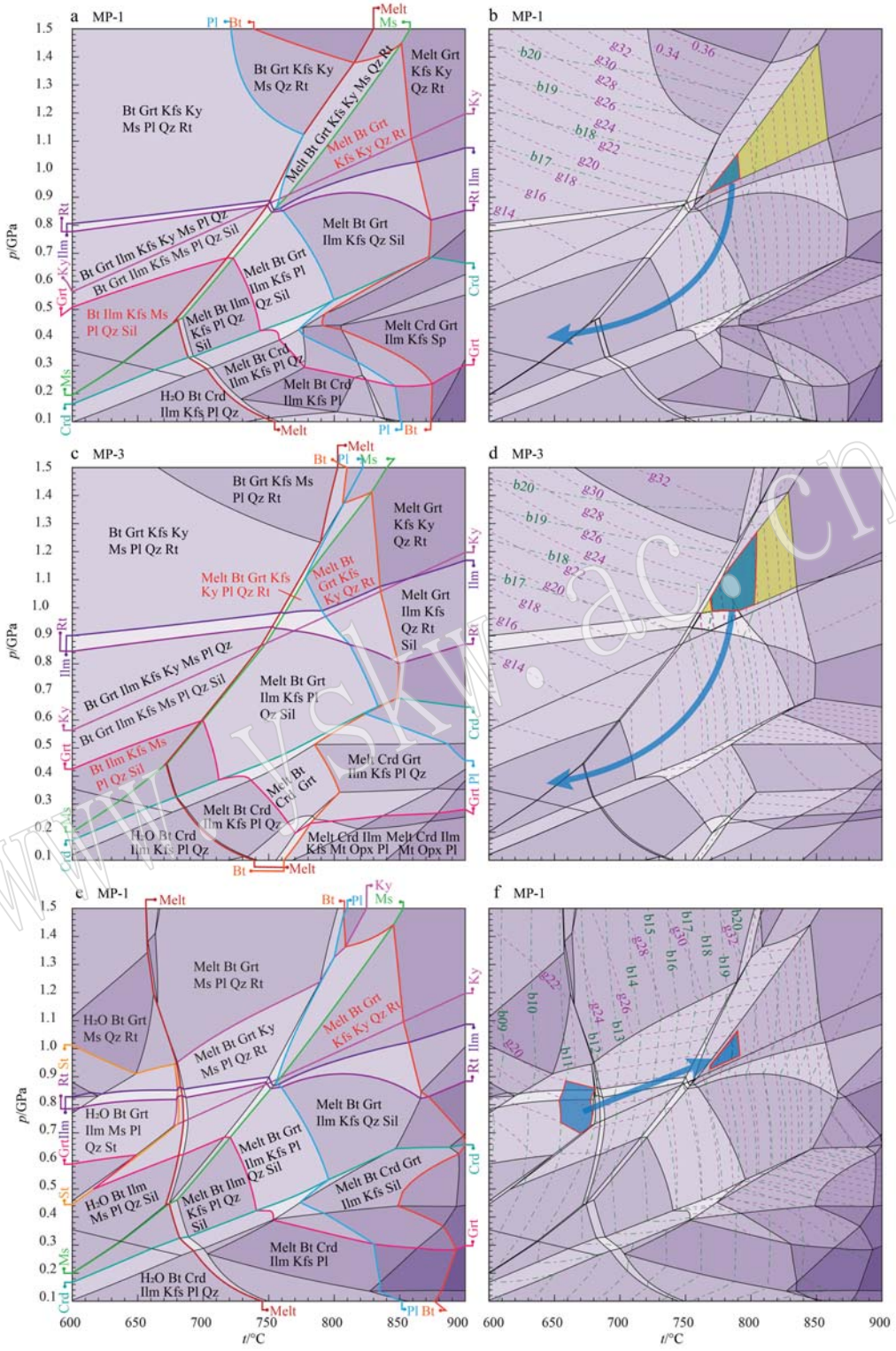

图 8 MnNCKFMASHTO 体系下泥质高压麻粒岩 *p-T* 视剖面图

Fig. 8 The *p-T* pseudosections of pelitic high-pressure granulite in the system MnNCKFMASHTO

a、b—样品 MP-1 实测全岩成分计算的视剖面图；c、d—样品 MP-3 实测全岩成分计算的视剖面图；e、f—样品 MP-1 加回丢失熔体后的有效全岩成分计算的视剖面图；全岩成分见表 4；b、d 和 f 中标记 g18 和 b18 等的虚线分别代表石榴子石 X_{Mg} 值和黑云母 Ti 含量(a. p. f. u.)等值线；带箭头的实线代表 *p-T* 轨迹

a, b—pseudosections calculated from the analyzed bulk-rock compositions of sample MP-1; c, d—pseudosections calculated from the analyzed bulk-rock compositions of sample MP-3; e, f—pseudosections calculated from the effective bulk-rock composition of sample MP-1 after reintegration of the lost melt; the bulk-rock compositions are provided in Table 4; the dashed curves labeled g18 and b18 in b, d, and f correspond to the isopleths of garnet X_{Mg} value and biotite Ti content (a. p. f. u.), respectively; the solid lines with arrows indicate the inferred *p-T* paths

为饱和水固相线。样品 MP-1 中实测的石榴子石核部 X_{Mg} 值(0.16~0.20)和黑云母包体 Ti 含量(0.11~0.12 a.p.f.u.)在视剖面图中可限定进变质温压条件为 0.70~0.88 GPa 和 655~680℃(图 8f)，该温压条件下的矿物组合为石榴子石+黑云母+白云母+斜长石+石英+十字石±金红石±钛铁矿，其中十字石、白云母和钛铁矿可能在进变质过程中被完全消耗，无法保存在石榴子石的包体中。

6　讨论

6.1　同卡泥质高压麻粒岩变质 *p-T-t* 轨迹

岩相学、矿物化学成分特征和相平衡模拟结果显示，同卡泥质高压麻粒岩经历了 3 个阶段的变质演化过程：近等压升温进变质阶段、峰期变质阶段和降温降压退变质阶段。

近等压升温进变质阶段主要通过石榴子石中矿物包裹体及其化学成分特征限定。根据石榴子石核部 X_{Mg} 值及其包体黑云母 Ti 含量，我们将石榴子石核部生长的温压条件限定为 0.70~0.88 GPa 和 655~680℃。峰期变质阶段的温压条件通过峰期矿物组合的稳定区域与石榴子石幔部/核部化学成分限定，结果为 0.98~1.06 GPa 和 770~790℃(图 9)，达到了高压麻粒岩相变质条件。岩石在进变质阶段经历了深熔作用，相平衡模拟发生的转熔反应为：白云母+黑云母+斜长石+石英→石榴子石+钾长石+蓝晶石+熔体，熔体发生迁移后可以形成补丁状长英质淡色体(图 2a)。降温降压退变质阶段通过退变矿物组合限定，确定的温压条件为 0.32~0.68 GPa 和 600~725℃，岩石在退变质阶段发生了转熔反应的逆反应：石榴子石+钾长石+蓝晶石+熔体→白云母+夕线石+斜长石+石英。

如图 6e 和 6f 所示，样品 MP-1 和 MP-3 中变质锆石的球粒陨石标准化稀土元素配分模式均具有重稀土元素平坦、Eu 轻微负异常的特征，泥质高压麻粒岩样品中石榴子石和长石分别是重稀土元素和 Eu 元素的主要赋存矿物(Rubatto *et al.*, 2013)，这表明变质锆石的形成可能存在两种可能：一种是与石榴子石生长和长石分解同期发生，另一种则稍晚于这两个矿物的生长与分解。根据变质演化过程中发生的转熔反应与转熔逆反应，斜长石在进变质阶段分解，而钾长石在进变质阶段生长；相反，钾长石在退变质阶段分解，而斜长石在退变质阶段生长，

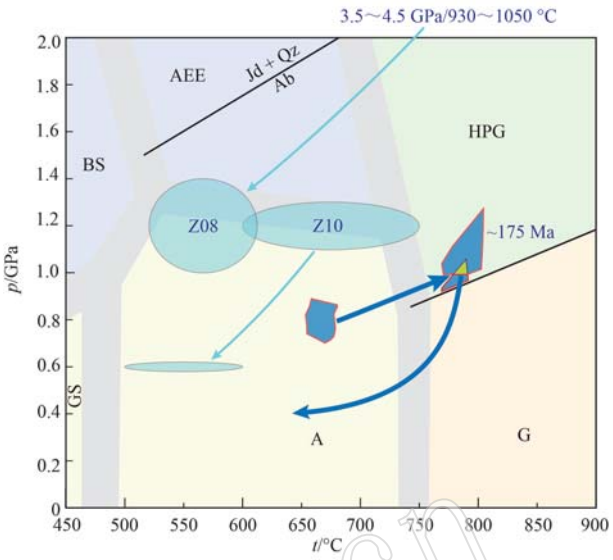

图 9　同卡微陆块泥质高压麻粒岩 *p-T-t* 轨迹及其与前人报道研究区内高级变质岩 *p-T* 轨迹的对比图(变质相边界引自 Brown, 2009)

Fig. 9　Summary of the inferred *p-T-t* path for the pelitic high-pressure granulite in the Tongka microcontinental block and comparison with those reconstructed for the high-grade metamorphic rocks from the studied area (metamorphic facies boundaries are after Brown, 2009)

Z08—榴辉岩的 *p-T* 轨迹(Zhang *et al.*, 2008)；Z10—基性高压麻粒岩的 *p-T* 轨迹(张万平等, 2010)；GS—绿片岩相；BS—蓝片岩相；A—角闪岩相；G—麻粒岩相；HPG—高压麻粒岩相；AEE—角闪绿帘榴辉岩相

Z08—*p-T* paths of eclogite (Zhang *et al.*, 2008); Z10—*p-T* paths of high-pressure granulite (Zhang Wanping *et al.*, 2010); GS—greenschist facies; BS—blueschist facies; A—amphibolite facies; G—granulite facies; HPG—high-pressure granulite facies; AEE—amphibole-epidote eclogite facies

两种长石都是 Eu 元素的主要赋存矿物，因此难以通过长石的生长与分解判断变质锆石的生长阶段。相比而言，石榴子石在进变质阶段生长，而在退变质阶段分解，据此可以判断变质锆石可能在进变质阶段至峰期阶段形成。然而，前人通过含 Zr 体系的相平衡模拟结果表明，锆石只能在熔体结晶时生长(Kelsey and Powell, 2011; Yakymchuk and Brown, 2014)，因此我们认为变质锆石记录的年龄 175 Ma 更可能代表了泥质高压麻粒岩峰期阶段的时代。Li 等(2017)报道了石榴夕线二云母片岩(ZD4-5-2)中黑云母 Ar-Ar 坪年龄为 165 ± 2 Ma，鉴于黑云母 Ar-Ar 体系的封闭温度为 350±30℃ (Stübner *et al.*, 2017)，因此我们认为 165 Ma 代表了片岩退变质到

绿片岩相的年龄。

6.2 同卡微陆块的构造演化

同卡微陆块主要由寒武纪正片麻岩和侏罗纪侵入岩构成(李才等, 2008; Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; 康朝龙等, 2019; Peng *et al.*, 2020),并保存了少量的中新元古代的岩浆活动记录(何世平等, 2012a; Liu *et al.*, 2021)。尹峥等(2023)对同卡微陆块东侧的石炭纪地层开展了碎屑锆石研究,认为这套地层的沉积时代应为寒武纪—早石炭世,是同卡微陆块的组成部分。嘉玉桥残余弧主要出露变沉积岩、变火山岩和灰岩,根据变玄武岩的结晶年龄和生物化石种类(王立全等, 2013),我们将其时代置于晚古生代。位于同卡微陆块和嘉玉桥群之间的俄学蛇绿混杂岩带中的变玄武岩地球化学特征显示其具有正常洋中脊玄武岩(N-MORB)和岛弧的双重特征,李化启等(2021)认为其形成于不成熟的弧后盆地扩张中心。前人曾在堆晶辉长岩中获得锆石 U-Pb 年龄为 267±8 Ma,并结合地层内的生物化石种类,将俄学蛇绿混杂岩的时代归于石炭纪—二叠纪(王立全等, 2013)。因此,我们认为最迟至晚三叠世,同卡微陆块和嘉玉桥残余弧之间的弧后小洋盆已经闭合(图 10a)。此外,同卡微陆块内保存了早侏罗世早期形成的辉长岩(197~191 Ma),其地球化学特征显示其形成背景与俯冲作用相关

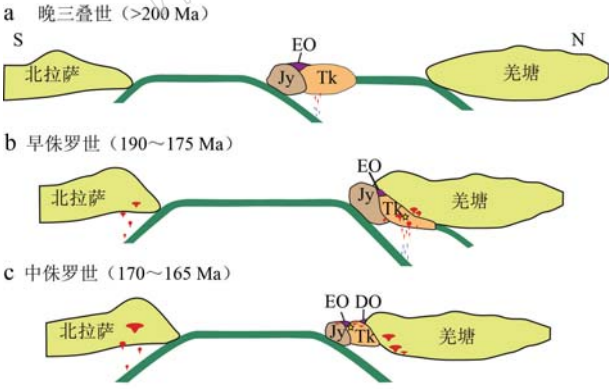

图 10 同卡微陆块晚三叠世—中侏罗世构造演化示意图

Fig. 10 Schematic diagram illustrating the tectonic evolution of the Tongka microcontinent block during the Late Triassic-Middle Jurassic period

EO—俄学蛇绿混杂岩; DO—丁青蛇绿混杂岩; Jy—嘉玉桥群; Tk—同卡微陆块; 黄色五角星—泥质高压麻粒岩

EO—Exue ophiolite; DO—Dingqing ophiolite; Jy—Jiayuqiao group; Tk—Tongka microcontinental block; yellow star—pelitic high-pressure granulite

(Xu *et al.*, 2021),可据此推测班公-怒江洋在晚三叠世已经向北俯冲到同卡微陆块之下(图 10a)。丁青蛇绿岩最老的年龄为堆晶辉长岩记录的 218 Ma(强巴札西等, 2009),表明位于同卡微陆块和羌塘地块之间的小洋盆已经打开并可能发生了北向的俯冲(图 10a)。同卡微陆块广泛记录了早侏罗世热事件(190~175 Ma),长英质片麻岩、泥质片岩和变辉长岩都经历了早侏罗世变质作用(Li *et al.*, 2017; 陈言飞, 2019; Xu *et al.*, 2021)。Zhang 等(2008)认为超高压榴辉岩变质(3.5~4.5 GPa、930~1 050℃)也发生在早侏罗世(195~169 Ma),本文获得的泥质高压麻粒岩的峰期变质时代也在侏罗纪早期。此外,本文报道的泥质高压麻粒岩和张万平等(2010)报道的基性高压麻粒岩都经历了顺时针的 *p-T-t* 演化轨迹(图 9),表明同卡微陆块在与羌塘地体碰撞后发生持续挤压导致地壳加厚(图 10b)。丁青蛇绿岩位于同卡微陆块与羌塘地块之间,主要发育 187~183 Ma 的岩浆岩(薄容众等, 2019; 刘飞等, 2021; 刘朋东等, 2024),最年轻的辉长岩结晶时代为 175 Ma(Wang *et al.*, 2016),支持两个陆块在早侏罗世碰撞的观点。微陆块内角闪辉长岩(177~175 Ma)的地球化学特征显示其岩浆起源于受到俯冲流体改造的软流圈部分熔融(Xu *et al.*, 2021),考虑到其结晶年龄与本文泥质高压麻粒岩的峰期变质时代一致,我们认为泥质高压麻粒岩在加厚下地壳深度受到了上涌软流圈的加热,从而记录了近等压升温的进变质 *p-T* 演化轨迹(图 9)。前人报道的超高压榴辉岩缺少可靠的地球化学证据(Zhang *et al.*, 2008),我们难以判断其原岩属性,因此尚无法确定其构造演化过程。同卡微陆块还发育大面积早侏罗世 I 型和 S 型花岗质岩石,这些花岗质岩石具有高钾钙碱性的岛弧岩浆岩地球化学特征,但其锆石的 $\varepsilon Hf(t)$ 值(-18.9~-5.7)与拉萨地体和羌塘地体的岛弧岩浆岩 $\varepsilon Hf(t)$ 值(Li *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2020)具有较大差异,据此我们认为这些花岗质岩石更可能与碰撞后同卡微陆块加厚下地壳重熔有关,上涌的软流圈可能为重熔提供了额外的热源和部分物质来源(图 10b)。

前人报道云母片岩中黑云母 Ar-Ar 年龄 165 Ma 代表了片岩退变质到绿片岩相的时代(Li *et al.*, 2017),据此我们认为同卡微陆块在中侏罗世(170~165 Ma)已经剥露至近地表(图 10c)。此外,俄学蛇绿混杂岩中变玄武岩经历了强烈变质变形,具有绿

帘角闪岩相矿物组合，其中角闪石 Ar-Ar 坪年龄为 161±2 Ma，但是由于角闪石矿物含钾量较低，可能造成年龄数据系统性的分散和偏低，测试结果不如云母等钾含量高的矿物理想，因此我们认为俄学蛇绿混杂岩可能在中侏罗世也剥露至近地表位置（图 10c）。

7　结论

（1）同卡微陆块内泥质高压麻粒岩经历了顺时针的 *p-T-t* 演化轨迹，记录了早侏罗世 175 Ma 峰期高压麻粒岩相变质作用，代表了同卡微陆块与羌塘地块碰撞后的地壳加厚过程。

（2）泥质高压麻粒岩近等压升温的进变质过程记录了同卡微陆块碰撞加厚下地壳受到上涌软流圈的持续加热过程。

致谢　感谢两位匿名审稿人提出的宝贵修改意见！

References

Bo Rongzhong, Yang Jingsui, Li Guanlong, *et al*. 2019. Geochronology and tectonic setting of mafic rocks in the Dingqing ophiolite in the eastern segment of the Bangongco-Nujiang suture zone[J]. Acta Geologica Sinica, 93(10): 2 617~2 638(in Chinese with English abstract).

Brown M. 2009. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record[C]//Cawood P A and Kroner A. Earth Accretionary Systems in Space and Time, 318: 37~74.

Brown M and Johnson T. 2019. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics[J]. Mineralogical Magazine, 83(3): 323~338.

Caddick M J, Konopásek J and Thompson A B. 2010. Preservation of garnet growth zoning and the duration of prograde metamorphism[J]. Journal of Petrology, 51(11): 2 327~2 347.

Chen Yanfei. 2019. The Early Mesozoic Magmatism, Metamorphism and Tectonic Implication in Southeast Tibet(Changdu-Chayu Area)[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

Chen Y F, Zhang Z M, Tian Z L, *et al*. 2018. Early Mesozoic magmatism and tectonic evolution of east-central Tibet[J]. International Journal of Earth Sciences, 107(8): 2 767~2 784.

Escuder Viruete J, Indares A and Arenas R. 2000. *p-T* Paths derived from garnet growth zoning in an extensional setting: An example from the Tormes gneiss dome (Iberian Massif, Spain)[J]. Journal of Petrology, 41(10): 1 489~1 515.

Evans K A. 2012. The redox budget of subduction zones[J]. Earth-Science Reviews, 113(1~2): 11~32.

Florence F P and Spear F S. 1991. Effects of diffusional modification of garnet growth zoning on *p-T* path calculations[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 107(4): 487~500.

Green E C R, White R W, Diener J F A, *et al*. 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks[J]. Journal of Metamorphic Geology, 34(9): 845~869.

Groppo C and Castelli D. 2010. Prograde *p-T* Evolution of a Lawsonite Eclogite from the Monviso Meta-ophiolite (Western Alps): Dehydration and Redox Reactions during Subduction of Oceanic FeTi-oxide Gabbro[J]. Journal of Petrology, 51(12): 2 489~2 514.

He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao, *et al*. 2012a. The formation age of Kaqiong Rock Group in the northern margin of Gangdese, the Qinghai-Tibet plateau[J]. Geochimica, 41(3): 216~226(in Chinese with English abstract).

He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao, *et al*. 2012b. The determination of the age of Jiayuqiao Group in northern gangdise of Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 39(1): 21~28.

Holland T J B, Green E C R and Powell R. 2022. A thermodynamic model for feldspars in $KAlSi_3O_8$-$NaAlSi_3O_8$-$CaAl_2Si_2O_8$ for mineral equilibrium calculations[J]. Journal of Metamorphic Geology, 40(4): 587~600.

Holland T J B and Powell R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids[J]. Journal of Metamorphic Geology, 29(3): 333~383.

Hu Z C, Liu Y S, Chen L, *et al*. 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(2): 425~430.

Indares A, White R W and Powell R. 2008. Phase equilibria modelling of kyanite-bearing anatectic paragneisses from the central Grenville Province[J]. Journal of Metamorphic Geology, 26(8): 815~836.

Kang Chaolong, Dai Kegang, Li Haibo, *et al*. 2019. The Cambrian metamorphic granites in the Jili area, Baxoi, Xizang: U-Pb dating, geochemical signatures and geological significance[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39(2): 1~13(in Chinese with English

abstract).

Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, *et al*. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 119(7~8): 917~933.

Kelsey D E and Powell R. 2011. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-ZrO_2 system[J]. Journal of Metamorphic Geology, 29(1): 151~166.

Kohn M J and Spear F. 2000. Retrograde net transfer reaction insurance for pressure-temperature estimates[J]. Geology, 28(12): 1 127.

Li Cai, Xie Yaowu, Sha Shaoli, *et al*. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pan-African granite in Baxoi County, eastern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 27(1): 64~68(in Chinese with English abstract).

Li Huaqi, Li Tianfu and Ji Fengbao. 2021. Geochemical analysis and amphibole ^{40}Ar-^{39}Ar dating for meta-basalts from Tongka ophiolitic melange, eastern Nujiang belt[J]. Geological Bulletin of China, 40(8): 1 279~1 290(in Chinese with English abstract).

Li H Q, Xu Z Q, Webb A A G, *et al*. 2017. Early Jurassic tectonism occurred within the Basu metamorphic complex, eastern central Tibet: Implications for an archipelago-accretion orogenic model[J]. Tectonophysics, 702: 29~41.

Li Xiaobo. 2016. Geochemical Characteristics and Tectonic Evolution of Anduo-Dingqing Ophiolite in Bangong Lake-Nujiang Junction Zone[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

Liu Fei, Li Guanlong, Bo Rongzhong, *et al*. 2021. Spreading ridge subduction of Bangong-Nujiang ocean: Evidence from geochemistry and Sr-Nd isotope of Middle Jurassic gabbro dikes in the Zongbai accretionary complex[J]. Geological Bulletin of China, 40(8): 1 247~1 264(in Chinese with English abstract).

Liu Pengdong, Liu Fei, Li Guanlong, *et al*. 2024. Forearc characteristics and geological significance of the Early Jurassic cumulate orthopyroxenite in the Dingqing ophiolite, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(12): 3 781~3 800(in Chinese with English abstract).

Liu Wen, Wu Jianliang, Yin Xianke, *et al*. 2019. Geochemical characteristics and geological significance of Shamuluo Formation argillaceous rocks in the western part of the Bangong Co-Nujiang suture zone[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 38(1): 47~62(in Chinese with English abstract).

Liu Y, Gao S, Hu Z, *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(1~2): 537~571.

Liu Y M, Li S, Zhai Q, *et al*. 2022. Jurassic tectonic evolution of Tibetan Plateau: A review of Bangong-Nujiang Meso-Tethys Ocean[J]. Earth-Science Reviews, 227: 103973.

Liu Y, Wang Y, Li S, *et al*. 2021. Neoproterozoic Amdo and Jiayuqiao microblocks in the Tibetan Plateau: Implications for Rodinia reconstruction[J]. GSA Bulletin, 133(3~4): 663~678.

Peng Y, Yu S, Li S, *et al*. 2020. Early Jurassic and Late Cretaceous granites in the Tongka micro-block, Central Tibet: Implications for the evolution of the Bangong-Nujiang ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 194: 104030.

Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. Journal of Metamorphic Geology, 16(4): 577~588.

Qiang Bazhaxi, Xie Yaowu, Wu Yanwang, *et al*. 2009. Zircon SIMS U-Pb dating and its significance of cumulate gabbro from Dengqen ophiolite, eastern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 28(9): 1 253~1 258(in Chinese with English abstract).

Rebay G, Powell R and Diener J F A. 2010. Calculated phase equilibria for a MORB composition in a *p-T* range, 450~650℃ and 18~28 kbar: The stability of eclogite[J]. Journal of Metamorphic Geology, 28(6): 635~645.

Ren Fei, Yin Fuguang, Peng Zhimin, *et al*. 2022. Late-Paleoanthics diabase from the eastern part of the Bangong Lake-Nujiang subduction belt: U-Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological characteristics[J]. Earth Science Frontiers, 29(2): 164~179(in Chinese with English abstract).

Rubatto D, Chakraborty S and Dasgupta S. 2013. Timescales of crustal melting in the Higher Himalayan Crystallines (Sikkim, Eastern Himalaya) inferred from trace element-constrained monazite and zircon chronology[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 165(2): 349~372.

Spear F S. 1991. On the interpretation of peak metamorphic temperatures in light of garnet diffusion during cooling[J]. Journal of Metamorphic Geology, 9(4): 379~388.

Stern R J. 2002. Subduction zones[J]. Reviews of Geophysics, 40(4): 1 012.

Stübner K, Warren C, Ratschbacher L, *et al*. 2017. Anomalously old biotite $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages in the NW Himalaya[J]. Lithosphere, 9(3): 366~383.

Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology [J]. Geoscience Frontiers, 9(5): 1 479~1 493.

Wang B D, Wang L Q, Chung S L, *et al*. 2016. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan ocean: Insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites[J]. Lithos, 245: 18~33.

Wang Dongbing, Wang Baodi, Pan Guitang, *et al*. 2021. Remnants of Early Carboniferous oceanic crust in the eastern segment of Bangong-hu-Nujiang suture belt and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(10): 3 048~3 066(in Chinese with English abstract).

Wang Keyong. 1998. New progress in the study of Jiayu Bridge Group in the Nujiang Bridge-Bangda area in Basu, eastern Tibet[J]. Regional Geology of China, 17(1): 105~111(in Chinese).

Wang Liquan, Pan Guitang, Ding Jun, *et al*. 2013. Geological Map and Explanatory Notes of the Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Wei Chunjing, Zhang Yuanyuan and Dong Jie. 2021. Some advances and research approaches on granulite[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(1): 52~64(in Chinese with English abstract).

White R W, Powell R, Holland T J B, *et al*. 2014a. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems[J]. Journal of Metamorphic Geology, 32(3): 261~286.

White R W, Powell R and Johnson T E. 2014b. The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New a-x relations for manganese-bearing minerals[J]. Journal of Metamorphic Geology, 32(8): 809~828.

Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. American Mineralogist, 95(1): 185~187.

Wu Jianliang, Liao Zhihua, Bai Yun, *et al*. 2024. Miocene magmatism in Anglonggangri area, western Bangong-Nujiang suture zone[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 43(5): 1 251~1 267(in Chinese with English abstract).

Xie Chaoming, Li Cai, Wang Ming, *et al*. 2014. Tectonic affinity of the nyainrong microcontinent: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotopes compositions[J]. Geological Bulletin of China, 33(11): 1 778~1 792(in Chinese with English abstract).

Xu W C, Zhang H F, Chen L R, *et al*. 2021. Transition from the lithospheric to asthenospheric mantle-derived magmatism in the Early Jurassic along eastern Bangong-Nujiang Suture, Tibet: Evidence for continental arc extension induced by slab rollback[J]. GSA Bulletin, 133(1~2): 134~148.

Yakymchuk C and Brown M. 2014. Behaviour of zircon and monazite during crustal melting[J]. Journal of the Geological Society, 171(4): 465~479.

Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211~280.

Yin Zheng, Ding Lin, Li Jinxiang, *et al*. 2023. Detrital zircon U-Pb ages from Paleozoic strata in the eastern Bangong Lake-Nujiang suture zone, Basu area: Provenance analysis and tectonic affinity[J]. Chinese Journal of Geology, 58(3): 945~964(in Chinese with English abstract).

Yin Z, Ding L, Li J, *et al*. 2024. The Cretaceous suturing process of the eastern Bangong-Nujiang Ocean, Basu area[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 642: 112154.

Zhang K, Zhang Y, Tang X, *et al*. 2008. First report of eclogites from central Tibet, China: Evidence for ultradeep continental subduction prior to the Cenozoic India-Asian collision[J]. Terra Nova, 20(4): 302~308.

Zhang Wanping, Wang Liquan, Qiang Bazhaxi, *et al*. 2010. Discovery and *p-T* path of high-pressure granulite in Tongka area of Tibet and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1 915~1 924(in Chinese with English abstract).

Zheng Y F and Chen Y X. 2016. Continental versus oceanic subduction zones[J]. National Science Review, 3(4): 495~519.

Zhu D C, Li S M, Cawood P A, *et al*. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction [J]. Lithos, 245: 7~17.

附中文参考文献

薄容众, 杨经绥, 李观龙, 等. 2019. 班-怒带东段丁青蛇绿岩中镁铁质岩石年代学及构造背景[J]. 地质学报, 93(10): 2 617~2 638.

陈言飞. 2019. 青藏高原东南部(昌都-察隅)早中生代岩浆-变质作用及构造意义[D]. 武汉: 中国地质大学.

何世平, 李荣社, 王　超, 等. 2012a. 青藏高原冈底斯北缘卡穷岩群形成时代的确定[J]. 地球化学, 41(3): 216~226.

何世平, 李荣社, 王　超, 等. 2012b. 青藏高原冈底斯北缘嘉玉桥群形成时代的确定[J]. 中国地质, 39(1): 21~28.

康朝龙, 代克刚, 李海波, 等. 2019. 西藏八宿吉利地区新发现寒武纪变质花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 39(2): 1~13.

李　才, 谢尧武, 沙绍礼, 等. 2008. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆

石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 27(1): 64~68.

李化启, 李天福, 吉风宝. 2021. 怒江构造带东段同卡蛇绿混杂岩中变玄武岩地球化学特征和角闪石^{40}Ar-^{39}Ar 年龄[J]. 地质通报, 40(8): 1 279~1 290.

李小波. 2016. 班公湖-怒江结合带安多-丁青蛇绿岩地球化学特征及构造演化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

刘 飞, 李观龙, 薄容众, 等. 2021. 班公湖-怒江洋的扩张脊俯冲: 宗白增生杂岩中侏罗世辉长岩脉地球化学和 Sr-Nd 同位素特征[J]. 地质通报, 40(8): 1 247~1 264.

刘朋东, 刘 飞, 李观龙, 等. 2024. 西藏丁青蛇绿岩早侏罗世堆晶斜方辉石岩的弧前特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 40(12): 3 781~3 800.

刘 文, 吴建亮, 尹显科, 等. 2019. 班公湖-怒江缝合带西段沙木罗组泥质岩地球化学特征及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 38(1): 47~62.

强巴札西, 谢尧武, 吴彦旺, 等. 2009. 藏东丁青蛇绿岩中堆晶辉长岩锆石 SIMS U-Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 28(9): 1 253~1 258.

任 飞, 尹福光, 彭智敏, 等. 2022. 班公湖-怒江俯冲增生杂岩带东段晚古生代辉绿岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 29(2): 164~179.

王冬兵, 王保弟, 潘桂棠, 等. 2021. 班公湖-怒江结合带东段早石炭世洋壳残片及其古特提斯意义[J]. 岩石学报, 37(10): 3 048~3 066.

王克勇. 1998. 藏东八宿怒江桥—邦达一带嘉玉桥群研究的新进展[J]. 中国区域地质, 17(1): 105~111.

王立全, 潘桂棠, 丁 俊, 等. 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书[M]. 北京: 地质出版社.

魏春景, 张媛媛, 董 杰. 2021. 麻粒岩的研究进展与方法[J]. 岩石学报, 37(1): 52~64.

吴建亮, 廖芝华, 白 云, 等. 2024. 班公湖-怒江缝合带西段昂龙岗日地区中新世岩浆作用[J]. 岩石矿物学杂志, 43(5): 1 251~1 267.

解超明, 李 才, 王 明, 等. 2014. 藏北聂荣微陆块的构造亲缘性——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的制约[J]. 地质通报, 33(11): 1 778~1 792.

尹 峥, 丁 林, 李金祥, 等. 2023. 班公湖-怒江缝合带东段八宿地区古生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄:物源分析及构造意义[J]. 地质科学, 58(3): 945~964.

张万平, 王立全, 强巴扎西, 等. 2010. 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, 26(6): 1 915~1 924.