

臧春娟, 王明梁, 刘永刚等. 2014. 新疆东准噶尔花岗岩类岩石高温高压弹性波速度及其对地壳结构的约束. 地球物理学报, 57(7):2099-2112, doi:10.6038/cjg20140707.

Zang C J, Wang M L, Liu Y G, et al. 2014. The elastic wave velocities of the granitoids from Eastern Junggar of Xinjiang at high temperature and high pressure and their geological constraints on the crustal structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7):2099-2112, doi:10.6038/cjg20140707.

新疆东准噶尔花岗岩类岩石高温高压弹性波速度及其对地壳结构的约束

臧春娟^{1,2}, 王明梁^{1,2,3}, 刘永刚¹, 唐红峰^{1*}

1 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压实验室, 贵阳 550002

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 宿州学院 地球科学与工程学院, 安徽宿州 234000

摘要 应用超声反射-透射法,在最高压力为 1.0 GPa(室温),最高温度为 700 °C(1.0 GPa)的条件下对新疆东准噶尔地区的卡拉麦里花岗岩带和野马泉岩体的典型花岗岩类岩石(碱长花岗岩、碱性花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和石英闪长岩)的纵波速度(V_P)和横波速度(V_S)进行了测量.结果显示,在常温、压力 0.4~1.0 GPa 条件下,东准噶尔地区花岗岩类岩石的 V_P 和 V_S 均随压力呈线性增加,说明在这个压力段岩石中的微裂隙已基本闭合.室温、1.0 GPa 时花岗岩类岩石的 V_P 是 5.79~6.84 km·s⁻¹, V_S 是 3.26~3.85 km·s⁻¹. 依据压力与 V_P 及压力与 V_S 的线性关系,拟合得到常温常压下花岗岩类岩石的纵波和横波压力系数分别是 0.1568~0.4078 km/(s·GPa) 和 0.0722~0.3271 km/(s·GPa), V_{P0} 和 V_{S0} 分别是 5.62~6.47 km·s⁻¹ 和 3.15~3.75 km·s⁻¹. 恒压 1.0 GPa、室温到 700 °C 条件下,花岗岩类岩石的 V_P 和 V_S 均随温度的升高呈线性降低,温度系数分别为 $(-3.41~-4.96) \times 10^{-4}$ km/(s·°C) 和 $(-0.88~-3.22) \times 10^{-4}$ km/(s·°C). 利用实验获得的花岗岩类岩石的 V_{P0} 、 V_{S0} 及温度系数和压力系数,结合东准噶尔地区的地热资料,建立了 V_P 和 V_S 随深度变化的剖面. 将获得的 V_P 和 V_S -深度剖面与该区地球物理探测结果对比,发现东准噶尔地区的碱长花岗岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和部分花岗闪长岩的 V_P 和 V_S 与该区上地壳速度吻合很好,同时这几种岩石的平均泊松比也与上地壳泊松比一致,因此我们认为这几种类型的岩石是该区上地壳的重要组成部分. 另外,石英闪长岩的 V_P 和 V_S 均符合中地壳的速度,可能为中地壳中的一种岩石.

关键词 弹性波速度; 高温高压实验; 花岗岩类; 地壳结构; 新疆东准噶尔

doi:10.6038/cjg20140707

中图分类号 P315

收稿日期 2013-09-22, 2014-06-02 收修定稿

The elastic wave velocities of the granitoids from Eastern Junggar of Xinjiang at high temperature and high pressure and their geological constraints on the crustal structure

ZANG Chun-Juan^{1,2}, WANG Ming-Liang^{1,2,3}, LIU Yong-Gang¹, TANG Hong-Feng^{1*}

1 Laboratory for High Temperature & High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Earth Science and Engineering, Suzhou University, Anhui Suzhou 234000, China

Abstract The compressional (V_P) and shear wave velocities (V_S) of typical granitoids (alkali-feldspar granite, alkaline granite, granodiorite, monzogranite and quartz diorite) from Kalamaili

基金项目 国家自然科学基金项目(41172071)和 2012 西部之光一般项目资助.

作者简介 臧春娟,女,博士生,矿物学岩石学矿床学专业. E-mail: zangchunjuan_929@163.com

* **通讯作者** 唐红峰,男,研究员,主要从事实验岩石学和岩石地球化学研究. E-mail: tanghongfeng@vip.gyig.ac.cn

granite belt and Yemaquan body in Eastern Junggar, Xinjiang were experimentally measured at pressures up to 1.0 GPa (room temperature) and temperatures up to 700 °C (1.0 GPa) by ultrasonic reflection-transmission method. The results show that both V_P and V_S of the granitoids present a linear velocity increase with the pressure at room temperature from 0.4~1.0 GPa, which is interpreted in terms of closure of the microcracks in rocks under this pressure range. The V_P and V_S of the granitoids are 5.79~6.84 km·s⁻¹ and 3.26~3.85 km·s⁻¹ respectively at room temperature and 1.0 GPa. On the basis of the linear relationship between pressure with V_P and V_S , we derived the pressure derivatives of V_P and V_S as 0.1568~0.4078 km/(s·GPa) and 0.0722~0.3271 km/(s·GPa) respectively, and the reference velocities V_{P0} and V_{S0} are 5.62~6.47 km·s⁻¹ and 3.15~3.75 km·s⁻¹ respectively. At 1.0 GPa, V_P and V_S of the granitoids show a linear decrease with temperature from room temperature to 700 °C, and temperature derivatives of velocities are $(-3.41 \sim -4.96) \times 10^{-4}$ km/(s·°C) and $(-0.88 \sim -3.22) \times 10^{-4}$ km/(s·°C), respectively. Taking advantage of derivatives of velocities and reference velocities of the granitoids obtained from our experiments, and combining regional geothermal resources of East Junggar area, V_P and V_S -depth profiles were calculated. From the comparison of velocity-depth profiles with geophysical exploring results, we infer that the V_P and V_S of the alkali-feldspar granite, alkaline granite, monzogranite and part of granodiorite in Eastern Junggar of Xinjiang are coherent well with the velocity of the upper crust, and the average Poisson's ratio of several rocks are also consistent with the Poisson's ratio of the upper crust. Therefore, we suggest that these kinds of rocks are important parts of the upper crust in this region. In addition, the V_P and V_S of the quartz diorite are both in accord with the middle crust, suggesting that it may be one kind of rocks in the middle crust of this region.

Keywords Elastic wave velocity; High temperature and high pressure experiment; Granitoids; Crustal structure; Eastern Junggar of Xinjiang

1 引言

花岗岩类是大陆地壳的重要组成部分,大陆地壳的演化必然伴随着相应的花岗质岩浆作用(Bonin et al., 1998). 中亚造山带因其独特的构造演化、岩浆活动和成矿作用成为国际地球科学研究的热点. 研究发现,中亚造山带在显生宙期间发生过显著的地壳增生,区内发育大量与显生宙地壳增生有关的花岗岩类,因此,对这些花岗岩类的研究很可能是认识整个中亚造山带显生宙期间陆壳生长模式和机制的关键(Han et al., 1997; 韩宝福等, 2006; 毛启贵等, 2008).

新疆北部的东准噶尔地区是中亚造山带的重要组成部分,是研究后碰撞岩浆活动的理想区域之一,地质学家们已在该区开展了广泛而深入的地质研究,包括构造、岩石和地球化学等方面的研究(李锦轶, 1995; 韩宝福等, 1999; Chen and Jahn, 2004; Xiao et al., 2004; 韩宝福等, 2006; 林锦富等,

2007; Su et al., 2007; 李锦轶等, 2009; Yang et al., 2011). 但是对于该地区地壳结构的研究相对较少,仅徐新忠等(1992)和王有学等(Wang et al., 2003; 王有学等, 2004)利用地球物理方法研究了新疆北部的地壳结构,由于缺乏高温高压下岩石弹性波速度的实验数据,难以更进一步地反演该地区的地壳结构与组成,制约了对该地区地壳结构的深入研究. 地震测深与高温高压岩石弹性波速实验测量的相互印证是进行区域地壳结构和组成研究最常用的方法(Christensen and Mooney, 1995; 高山等, 1995; 周文戈等, 1998). 因此,本文在常压至 1.0 GPa,室温至 700 °C 的条件下测量了东准噶尔地区主要花岗岩类岩石的弹性波速,结合地震剖面的地震波资料,探讨花岗岩类在研究区地壳中的垂向分布特征,为研究该区地壳结构和物质组成提供实验证据.

2 区域地质背景

新疆北部地区是中亚造山带的重要组成部分,

包括天山—准噶尔—阿尔泰山。准噶尔地区位于天山和阿尔泰山之间。东准噶尔地区位于准噶尔盆地东北缘,区内发育晚古生代泥盆纪和早石炭纪火山—沉积地层,零星分布二叠系火山岩和志留纪地层(韩宝福等, 2006),包括大量晚古生代花岗岩。本区目前尚未发现前震旦纪地质体。

早泥盆纪以来,该区经历了有限洋盆形成,洋壳双侧俯冲和洋盆闭合的构造发展历史(李锦轶, 1995; 韩宝福等, 2006)。在泥盆纪初东准噶尔地区形成有限洋盆,形成于 373 Ma 的卡拉麦里蛇绿岩带被认为是该古洋盆的洋壳残片(李锦轶等, 1990; 李锦轶, 1995; 舒树良和王玉静, 2003; 唐红峰等, 2007)。整个泥盆纪,洋壳不断向两侧的陆壳俯冲,至早石炭世晚期洋盆关闭,晚石炭世到二叠系,东准噶尔进入后碰撞岩浆活动阶段,发育大量晚古生代后碰撞花岗岩(李锦轶, 1995; 苏玉平等, 2006; Su et al., 2007; 甘林等, 2010; 郭芳放等, 2010)。

花岗质岩浆活动是该区最强烈的岩浆作用,侵入岩占地表出露岩石面积的 30%,而花岗岩类的出露面积约占侵入岩总面积的 80%,是该区最重要的岩石类型(喻亨祥等, 1998)。其中,卡拉麦里富碱花岗岩类的出露面积达 1100 km²。它们一般沿大断裂和次级断裂分布,多为岩枝状产出(少数呈岩基状),构成不同大小、不同岩性的岩体(图 1),代表性的有库布苏南的花岗闪长岩体和二长花岗岩体、巴勒巴尕依岩体、黄羊山岩体、苏吉泉岩体等,此外在邻近卡拉麦里花岗岩带还出露有同时代的野马泉岩体。上述岩体的主要岩石类型为花岗闪长岩、二长花岗岩、碱长花岗岩(黑云母花岗岩、角闪石花岗岩)和碱性花岗岩(毛启贵等, 2008)。这些花岗岩体形成于晚古生代,其同位素年龄分布于 285~315 Ma(苏玉平等, 2006; 林锦富等, 2007; 毛启贵等, 2008; 甘林等, 2010; 郭芳放等, 2010; Yang et al., 2011)。上述岩石类型基本代表了新疆东准噶尔地区花岗岩类的总体面貌。

前人通过地学断面的地球物理探测,对新疆北部地区地壳深部物质组成和状态进行了初步研究,对该地区地壳结构的认识存在明显分歧。徐新忠等(1992)利用地震测深的纵波速度结果建立了该区地壳的速度—深度结构模型,他们认为该区地壳由花岗质上地壳和玄武质下地壳组成,缺失安山质中地壳。花岗质岩层厚度很大,约 30 km,占地壳总厚度的二分之一以上,花岗质岩层纵波速度为 5.91~6.06 km·s⁻¹,玄武质岩层纵波速度为 6.75 km·s⁻¹(详见徐新忠

等, 1992, 图 3)。王有学等(Wang et al., 2003; 王有学等, 2004)在前期工作的基础上,结合横波速度数据,并利用泊松比对比地壳内部的物质组成进行了推断,他们认为研究区地壳具有明显的上、中、下地壳的三分结构,上、中、下地壳的纵波速度分别为 6.1 km·s⁻¹, 6.6 km·s⁻¹, 7.0 km·s⁻¹,横波速度分别为 3.6 km·s⁻¹, 3.8 km·s⁻¹, 4.0 km·s⁻¹,泊松比分别为 0.25、0.26 和 0.28(详见 Wang et al., 2003, 图 10),他们推断下地壳的高泊松比可能代表洋壳或幔源物质的特征。

3 实验方法

3.1 实验样品

实验初始物为采自新疆东准噶尔地区卡拉麦里花岗岩带(5 个岩体,具体见表 1)和野马泉岩体的花岗岩类岩石,这些岩体为东准噶尔最主要的岩体,不仅出露面积大,而且岩石类型多样,主要为二长花岗岩、花岗闪长岩、碱长花岗岩、碱性花岗岩和石英闪长岩,涵盖了该区主要的花岗质岩石类型。具体采样地点如图 1 所示。实验样品岩相学特征见表 1,化学组成见表 2。采用新鲜、没有裂隙、无明显后期蚀变、不含岩脉和没有明显矿物定向排列的样品作为实验初始物。将选好的样品磨成直径 9.0 mm,高 6.0 mm,两端平行的圆柱体,用水和酒精清洗后,将样品放入 105 °C 干燥箱中持续加热至少 10 h。

3.2 实验装置及方法

实验在中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压实验室 YJ-3000 压机上进行。实验系统的详细介绍参见谢鸿森等(1993)的报道。采用 Liu 等(2000)提出的反射—透射法测量东准噶尔地区花岗岩类岩石的 V_p 和 V_s 。样品的组装与万方等(2008)的组装方法基本相同,传压介质为经 800 °C 焙烧的叶蜡石立方块,加热器采用不锈钢片,将直径为 9.0 mm,高 6.0 mm 的圆柱体样品装入厚约 1.0 mm,高 6.0 mm 的氧化铝套管中,上下各放一个厚约 0.1 mm 的钼片,将热电偶放在样品的顶部,这样可以使样品在实验过程中获得更好的压力环境和更加稳定的温度场,实验中使用 NiCr-NiSi 型热电偶测量温度,最后上下两端用直径约 12 mm 的叶蜡石柱封堵,作为缓冲棒,具体组装见图 2。样品组装好后,放入炉中 200 °C 干燥 24 小时以上,以便完全去除吸附水。实验过程中压力测量误差 $\leq \pm 0.015$ GPa(Xu et al., 1994),温度测量误差 $\leq \pm 5$ °C,样品室温度

表 1 研究样品的编号、采样位置及岩相学特征

Table 1 Sample number, location, and petrographic characteristic for the studied samples

岩体	岩性及编号	手标本特征	主要矿物组成(vol. %)	粒度(平均粒度)
库布苏南(MG) ^{a)}	二长花岗岩(HY23)	灰白色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(35%±)+正长石(30%±)+石英(18%±)+角闪石、黑云母(15%±)	0.5~1.5 mm (0.7 mm)
巴勒巴尕依	角闪石花岗岩(HY25)	肉红色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(18%±)+碱性长石(45%±)+石英(30%±)+黑云母(3%±)	0.5~1.5 mm (0.7 mm)
黄羊山	碱性花岗岩(HY32)	浅灰白色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(15%±)+碱性长石(45%±)+石英(30%±)+角闪石、辉石(8%±)	0.5~2.0 mm (0.8 mm)
库布苏南(GD) ^{a)}	花岗闪长岩(HY55)	灰白色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(50%±)+正长石(5%±)+石英(18%±)+角闪石(15%±)+黑云母(10%±)	0.5~1.5 mm (0.7 mm)
苏吉泉	黑云母花岗岩(SJ15)	肉红色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(15%±)+碱性长石(40%±)+石英(30%±)+黑云母(8%±)	0.5~2.0 mm (0.8 mm)
野马泉岩体	碱长花岗岩(XH08-01)	浅肉红色, 块状, 细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(15%±)+碱性长石(45%±)+石英(30%±)+黑云母、角闪石(3%±)	0.5~1.0 mm (0.6 mm)
	二长花岗岩(XH08-03)	灰白色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(35%±)+正长石(30%±)+石英(20%±)+角闪石、黑云母(15%±)	0.5~2.0 mm (0.8 mm)
	花岗闪长岩(XH08-07)	灰色, 块状, 似斑状结构, 矿物无定向	斜长石(55%±)+碱性长石(5%±)+石英(10%±)+角闪石及黑云母(25%±)	0.5~2.0 mm (0.8 mm)
	石英闪长岩(XH08-10)	灰黑色, 块状, 中-细粒花岗岩结构, 矿物无定向	斜长石(55%±)+石英(10%±)+角闪石(28%±)、黑云母(5%±)	0.5~1.5 mm (0.7 mm)

注: a) 库布苏南(MG)和库布苏南(GD)分别表示出露于库布苏南边的二长花岗岩体和花岗闪长岩体。

表 2 研究样品的主量元素组成(wt. %)^{a)}Table 2 Major element compositions of the studied samples (wt. %)^{a)}

岩性样品号	二长花岗岩 HY23	角闪石花岗岩 HY25	碱性花岗岩 HY32	花岗闪长岩 HY55	黑云母花岗岩 SJ15	碱长花岗岩 XH08-01	二长花岗岩 XH08-03	花岗闪长岩 XH08-07	石英闪长岩 XH08-10
SiO ₂	69.62	78.32	79.83	64.89	79.33	75.59	74.10	57.46	52.14
TiO ₂	0.54	0.50	0.43	0.52	0.47	0.17	0.17	1.02	0.50
Al ₂ O ₃	14.15	8.76	7.68	15.12	8.21	12.72	13.17	17.71	17.21
Fe ₂ O ₃ ^{b)}	3.74	2.42	1.98	4.54	2.28	1.77	1.57	6.40	5.99
MnO	0.16	0.15	0.13	0.07	0.15	0.03	0.03	0.12	0.11
MgO	1.00	0.11	0.11	1.64	0.11	0.13	0.22	2.82	7.49
CaO	3.19	0.45	0.47	3.41	0.69	0.62	0.95	6.25	10.18
Na ₂ O	3.17	3.81	3.48	3.86	3.43	4.63	4.78	4.60	2.67
K ₂ O	3.45	4.22	3.55	3.08	3.92	4.58	3.77	1.67	0.89
P ₂ O ₅	0.34	0.31	0.25	0.14	0.20	0.05	0.06	0.24	0.06
LOI	0.58	0.43	2.01	1.24	0.70	0.33	0.63	0.89	1.93
Total	99.94	99.48	99.92	98.51	99.49	100.62	99.45	99.18	99.17

注: a) 数据引自 Su et al., 2007; 苏玉平等, 2006; 苏玉平, 2007; 甘林等, 2010; b) 以 Fe₂O₃ 表示的全铁。

差 $\leq\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (周文戈等, 2005), 实验过程中未对氧逸度进行控制, 估计样品室的氧逸度在 QMF 至 QMF-2 之间(Patiño Douce and Beard, 1995), 重复样岩石(HY25, 角闪石花岗岩)纵波速度测量的相对误差小于 1.5%(图 3)。

实验室测量岩石纵波速度和横波速度的装置和方法相同。实验时, 先在室温下缓慢升压, 在压力 $<0.5\text{ GPa}$ 时, 每隔 0.05 GPa 进行一次测量; 在压力 $>0.5\text{ GPa}$ 时, 每隔 0.1 GPa 进行一次测量。测量

时, 先将压力升至目标压力, 恒压 10 min 后进行波速测定。当压力达到 1.0 GPa 时, 保持恒压, 加热开始, 每隔 50 $^{\circ}\text{C}$ 测定一次, 每次当温度升至目标温度后, 先恒温 20 min 再进行波速测定, 当温度到达 700 $^{\circ}\text{C}$ 后, 以与升温过程同样的温度间隔和恒温时间进行降温过程的波速测量, 直至降至室温, 然后再次测量升温过程的弹性波速度。完成实验后断电淬火, 样品温度在 1 min 以内降至室温, 然后小心取出样品, 测量长度后制成薄片供后期在光学显微镜和

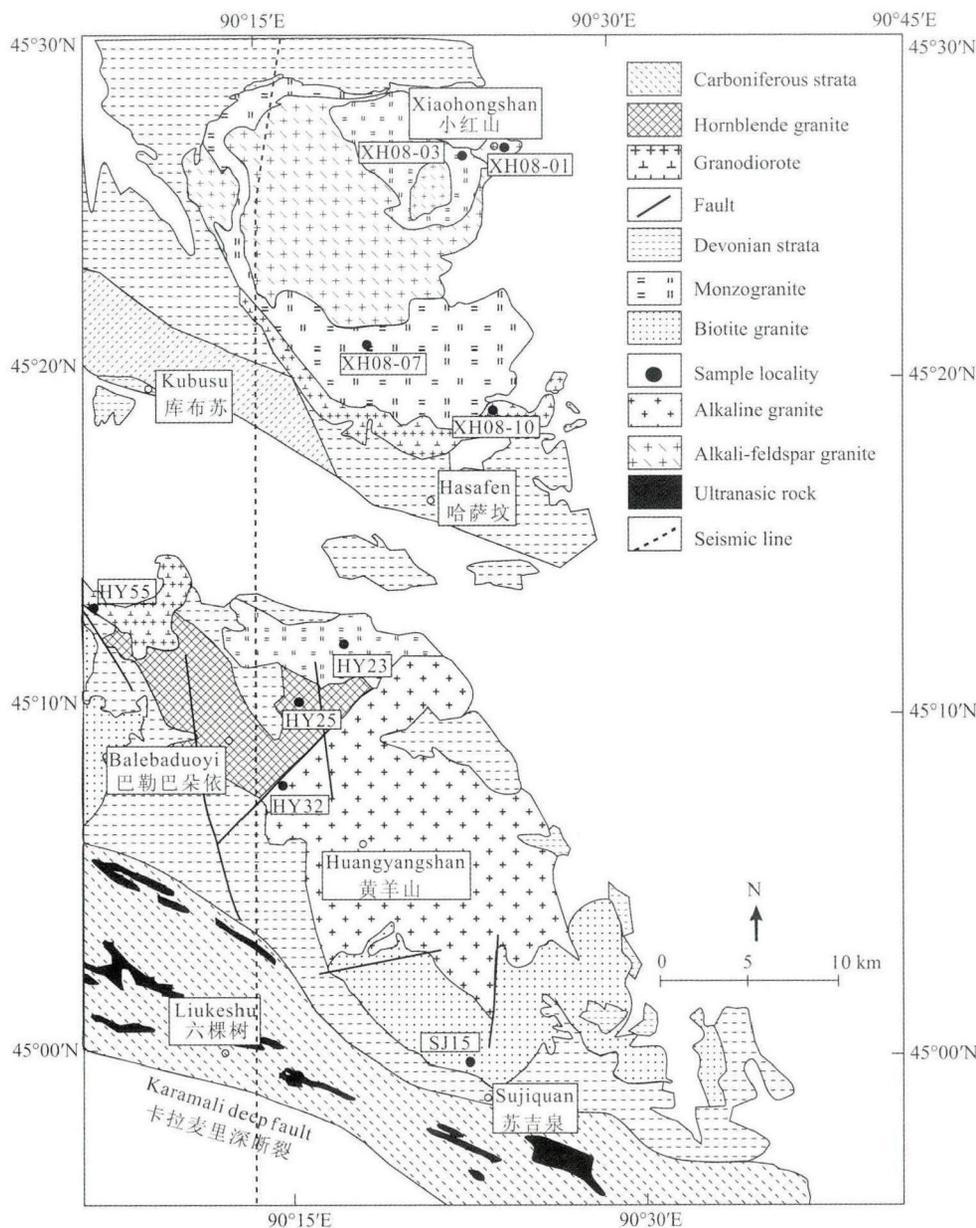


图1 新疆东准噶尔地区地质简图(据1:20万地质图简化,地震测线据 Wang et al., 2003)

Fig. 1 Geological sketch map of East Junggar, Xinjiang (simplified from 1:200000 Geological Map, seismic line from Wang et al., 2003)

扫描电镜下观察。

3.3 数据处理

室温高压下样品长度按以下公式进行校正:
 $L/L_0 = 1 - [P/(3K_0)]$ (Cook, 1957), 其中, L 、 L_0 分别为高压和常压下实验后的样品长度; P 为压力; K_0 为常温常压下岩石的体积模量, 用校正后的长度除以样品中的走时, 得到室温不同压力下的岩石纵波波速(V_p)和横波波速(V_s), 如图4, 并对线性部分进行了拟合。

如果以室温高压下的样品长度来计算岩石的弹性波速度, 那么在 1.0 GPa 压力下, 岩石在升温 and

降温过程中波速却存在明显差异。以碱性花岗岩 (HY32) 的纵波波速为例, 如图5所示, 第一次升温与降温 and 第二次升温获得的纵波速度存在差别, 最大相差 6.6%, 超出了 1.5% 的误差限。在第一次升温过程中, 当温度小于 300 °C, 纵波速度变化很小, 当温度大于 300 °C, 岩石纵波速度略有上升, 在降温 and 第二次升温过程中, 岩石波速随温度升高, 线性降低, 且降温 and 第二次升温过程的波速吻合很好(图5)。

样品在加温过程中可能发生以下几个情况:(1) 样品受热膨胀;(2) 温度的升高减少了差异应力, 使得静水压环境更好;(3) 温度的升高使岩石强度变

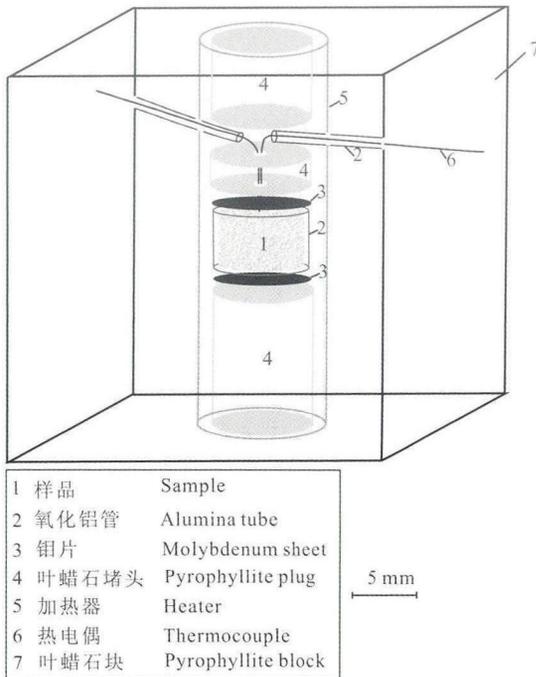


图2 实验样品组装示意图

Fig. 2 Schematic illustration of sample assembly

小,颗粒与颗粒间结合得更加紧密,样品有可能被进一步压缩;(4)样品产生热应力;(5)岩石中的矿物在加热过程中发生了相变.综合这几种情况对弹性波

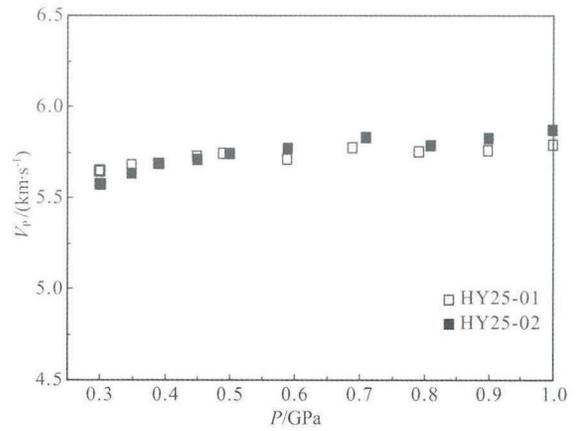


图3 0.3~1.0 GPa 压力下样品 HY25 纵波波速两次测定结果

Fig. 3 Twice measured V_p for sample HY25 at pressure from 0.3 to 1.0 GPa

速度的影响,其主要体现在两个方面,一方面是岩石中矿物相的变化对弹性波速度的影响,另一方面是样品长度的变化对弹性波速度的影响.

详细观察初始物和反应产物的岩石薄片,见图6,结果表明,样品在实验的温度压力范围内没有发生明显的变化,据此认为加温过程中岩石中的矿物没有发生相变.因此,我们认为第一次升温过程的波

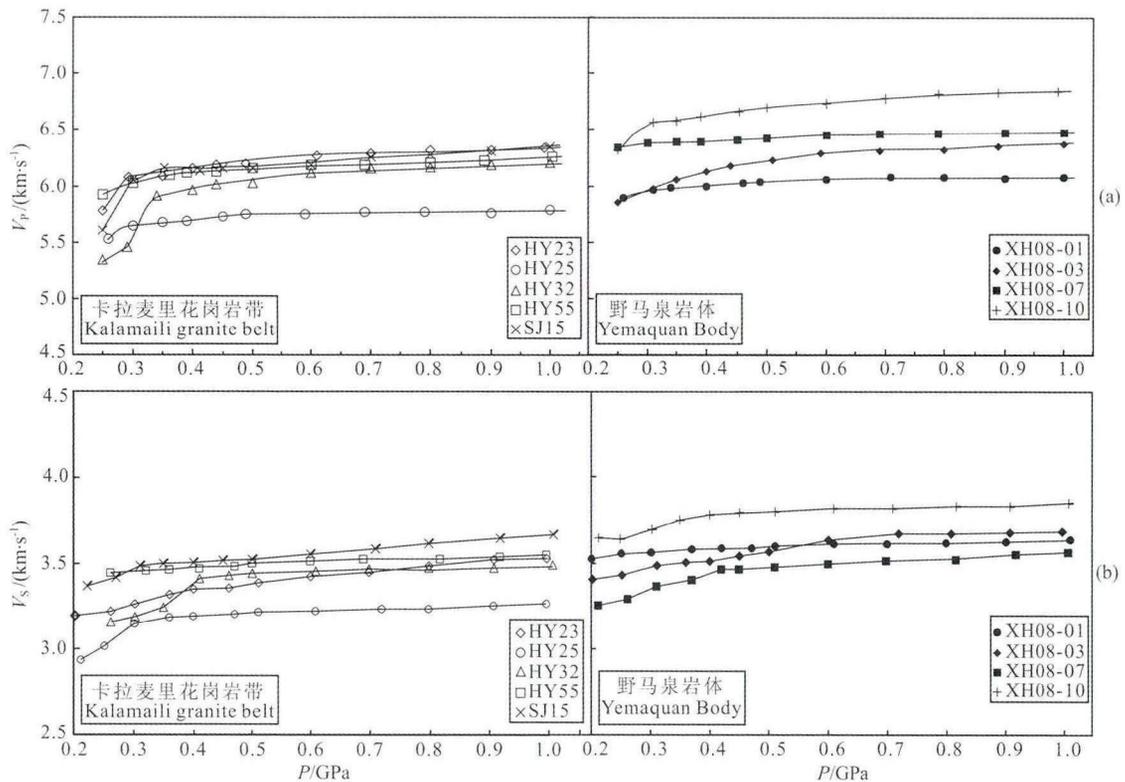


图4 新疆东准噶尔地区主要花岗岩类纵波(a)和横波(b)速度与压力的变化关系
Fig. 4 Compressional (a) and shear wave (b) velocities versus pressure for the main granitoids from East Junggar, Xinjiang

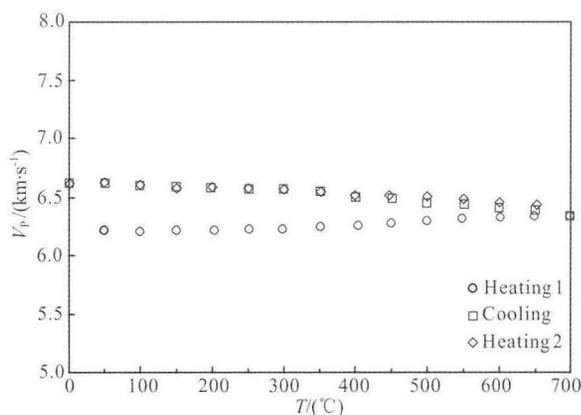


图5 1.0 GPa下碱性花岗岩 HY32的 V_p 随温度的变化关系

Fig. 5 Plot of V_p for alkaline granite sample HY32 versus temperature at 1.0 GPa

速数据与降温过程的波速数据的不吻合不是因为岩石中的矿物发生了相变,而是因为加温过程中样品长度发生了变化. 经历了一次升温过程,有可能消除了各种因素的影响,使得样品长度的变化趋于稳定. 于是,我们假设 1.0 GPa 降温至常温时的弹性波速度等于常温加压至 1.0 GPa 时的弹性波速度,对经历过一次加热过程的样品长度(H)进行校正: $H = V_1 \times t_1$,其中, V_1 为常温加压至 1.0 GPa 时的弹性波速度; t_1 为 1.0 GPa 降温至室温时所对应的样品走时,用校正后的样品长度除以样品的走时,得到 1.0 GPa、室温~700 °C 所有花岗岩类岩石的 V_p 和 V_s ,如图 7,并对线性部分进行了拟合.

4 实验结果

如图 4 所示,室温条件下,所有花岗质岩石的纵波速度(V_p)均随压力的升高而增大. 当压力小于 0.4 GPa,卡拉麦里花岗岩带和野马泉岩体的花岗质岩石的 V_p 随压力增大很快,其中,碱性花岗岩(HY32)增加最快,由 0.2 GPa 的 $5.34 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 0.4 GPa 的 $5.96 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 11.6%,花岗闪长岩(XH08-07)增加最慢,由 0.25 GPa 的 $6.35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 0.4 GPa 的 $6.39 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 0.6%. 当压力大于 0.4 GPa, V_p 随压力升高而缓慢地呈线性增大,其中,样品 HY32 增加最快,由 0.45 GPa 的 $6.01 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 1.0 GPa 的 $6.21 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 3.3%,样品 XH08-07 增加最慢,由 0.45 GPa 的 $6.40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 1.0 GPa 的 $6.44 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 0.6%.

室温条件下,所有花岗质岩石的横波速度(V_s)

随压力变化的趋势与纵波变化趋势相同,均随压力的升高而增大(图 4). 同样,在压力小于 0.4 GPa,花岗质岩石的 V_s 随压力呈非线性地增大,其中,角闪花岗岩(HY25)增加最快,由 0.2 GPa 的 $2.94 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 0.4 GPa 的 $3.19 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 8.5%,碱长花岗岩(XH08-01)增加最慢,由 0.2 GPa 的 $3.51 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 0.4 GPa 的 $3.58 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 2.0%. 当压力大于 0.4 GPa, V_s 随压力升高而缓慢地呈线性增大,其中,二长花岗岩(HY23)增加最快,由 0.45 GPa 的 $3.35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 1.0 GPa 的 $3.53 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 5.4%,石英闪长岩(XH08-10)增加最慢,由 0.45 GPa 的 $3.80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 1.0 GPa 的 $3.85 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,增加了 1.3%.

室温、1.0 GPa 条件下,碱长花岗岩和碱性花岗岩的 V_p 和 V_s 最低、花岗闪长岩和二长花岗岩居中,石英闪长岩最大. 碱性花岗岩、碱长花岗岩、花岗闪长岩和二长花岗岩的平均 V_p 和 V_s 均相差不大,分别为 $6.15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.49 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $6.07 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.52 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $6.36 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 $6.36 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.61 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),仅仅相差 4.6% (2.6%),石英闪长岩的 V_p 和 V_s 分别为 $6.84 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.85 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,明显高于上述几种岩石. 不同岩体的同类岩石的 V_p 和 V_s 相差不一,如卡拉麦里花岗岩带和野马泉岩体的花岗闪长岩和二长花岗岩的 V_p 和 V_s 均相差不大, V_p 最大相差 2.7%, V_s 最大相差 4.5%,而两个岩体的碱长花岗岩的 V_p 和 V_s 分别相差很大, V_p 最大相差 9.7%, V_s 最大相差 12.9%. 通过室温升压过程中线性部分的拟合,我们得到花岗质岩石的 V_0 和压力系数(表 3),其中,花岗质岩石的 V_{p0} 是 $5.62 \sim 6.47 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,纵波压力系数是 $0.1439 \sim 0.4078 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$; V_{s0} 是 $3.15 \sim 3.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,横波压力系数是 $0.0722 \sim 0.3271 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$.

恒压加热过程中,花岗质岩石在 1.0 GPa,室温~700 °C 的 V_p 和 V_s 随温度的变化关系如图 7 所示. 随温度的升高,花岗质岩石的 V_p 逐渐降低,其中,碱长花岗岩(XH08-01)降低最快,由室温的 $6.07 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 700 °C 的 $5.71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,降低了 5.9%,石英闪长岩(XH08-10)降低最慢,由室温的 $6.84 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 700 °C 的 $6.59 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,降低了 3.7%,线性拟合得到纵波温度系数是 $(-3.41 \sim -4.96) \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{°C})$. 花岗质岩石的 V_s 同样随温度的升高逐渐降低,其中,花岗闪长岩(XH08-07)降低最快,由室温的 $3.56 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 700 °C

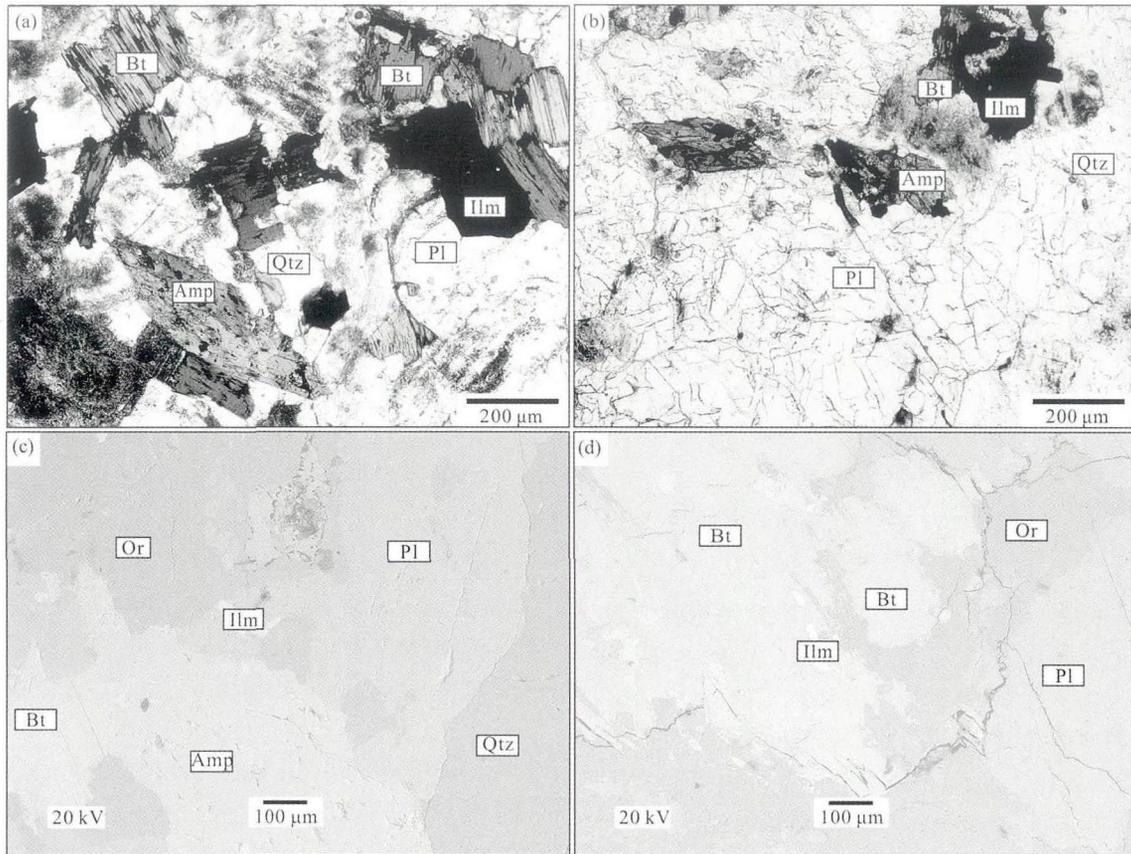


图6 花岗闪长岩 HY55 实验前(a)与实验后(b)的单偏光显微照片和实验前(c)与实验后(d)的背散射电子图像
矿物缩写: Amp—角闪石, Bt—黑云母, Ilm—钛铁矿, Or—正长石, Pl—斜长石, Qtz—石英。

Fig. 6 Plane-polarized photomicrographs before (a) and after (b) experiments; and BSE images before (c) and after (d) experiments for granodiorite sample HY55

Mineral shorthand: Amp—amphibole, Bt—biotite, Ilm—ilmenite, Or—orthoclase, Pl—plagioclase, Qtz—quartz.

的 $3.34 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 降低了 6.2%, 黑云母花岗岩 (SJ15) 降低最慢, 由室温的 $3.68 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $3.61 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 降低了 1.9%, 线性拟合得到横波温度系数是 $(-0.88 \sim -3.22) \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 见表 3。

5 讨论

5.1 与前人实验结果的对比

压力在 $0.4 \sim 1.0 \text{ GPa}$, 花岗质岩石的纵波波速和横波波速均随压力升高呈线性增大, 说明岩石中的微裂隙基本闭合, 此时的线性变化反映了岩石本征的性质 (Kern et al., 1999)。

本次研究得到的室温、 1.0 GPa 花岗质岩石纵波波速为 $5.79 \sim 6.84 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $6.30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 介于 Christensen 和 Mooney (1995) 研究的室温、 1.0 GPa 花岗质类纵波速度值 $6.38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 Kern 等 (1999) 在室温、 600 MPa 得出的花岗质纵波

速度值 $6.16 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, V_{P0} 为 $5.62 \sim 6.47 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $6.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 Ji 等 (2003) 研究的 $6.10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 更为接近, 稍大于 Kern 等 (1999) 得出的 $5.86 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。花岗质岩石纵波压力系数为 $0.1439 \sim 0.4078 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 平均值为 $0.2645 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 接近于 Ji 等 (2003) 研究的 $0.2873 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 小于 Kern 等 (1999) 得出的 $0.3785 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 除我们的实验压力大于前人外, 最可能的原因是由于实验岩石实际矿物组成略有不同 (Ji et al., 2002; Wang et al., 2005)。在压力为 1.0 GPa 时, 岩石的纵波速度均随温度的升高而降低, 纵波波速与温度的线性拟合结果见表 3, 花岗质类的纵波温度系数为 $(-3.41 \sim -4.96) \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 平均值为 $-3.94 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 小于 Kern 等 (1999) 研究的 $-2.9 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 和 Wang 等 (2005) 总结的 $-3.0 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 与 Christensen 和 Mooney (1995) 得出的 $-3.9 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 比较接近。

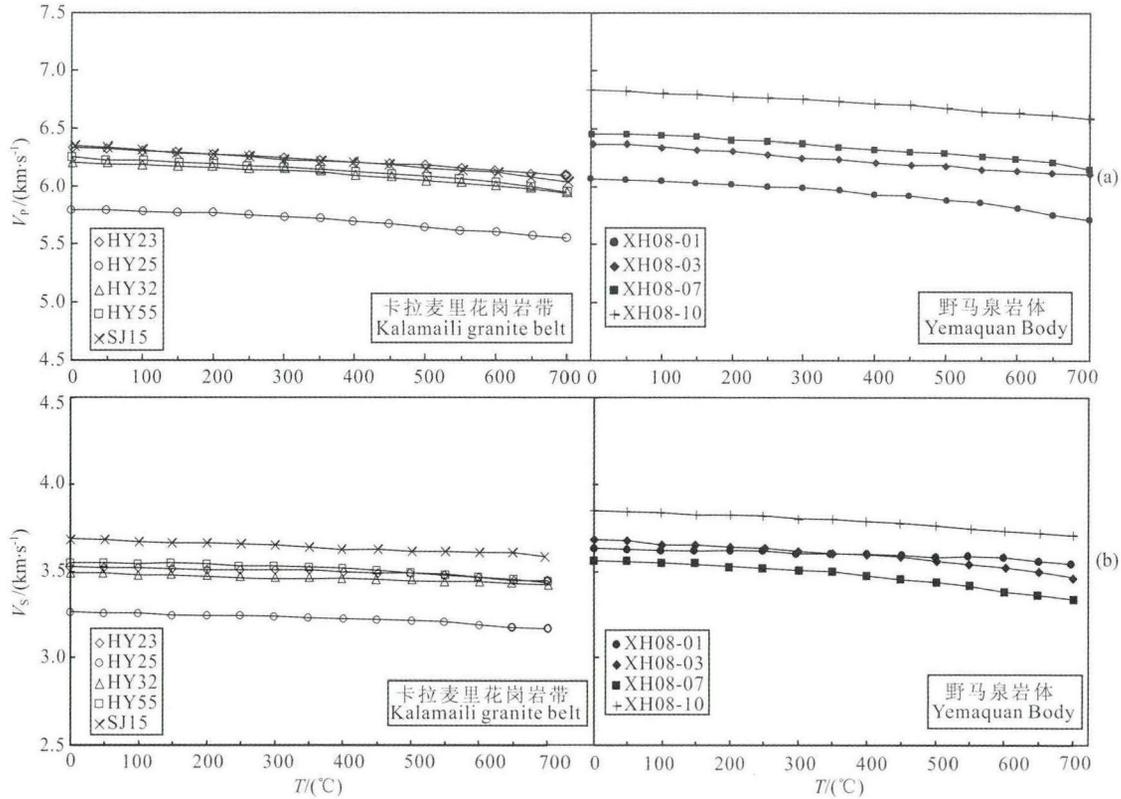


图 7 新疆东准噶尔主要花岗岩类 1.0 GPa 纵波(a)和横波(b)速度与温度的变化关系
 Fig. 7 Compressional (a) and shear wave (b) velocities versus temperature at 1.0 GPa for the main granitoids from East Junggar, Xinjiang

表 3 实验岩石 V_0 、压力系数及温度系数
 Table 3 Reference velocities and pressure and temperature derivatives for the studied rocks

岩性和编号	压力范围 (GPa)	V_0 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	压力系数 ($\text{km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$)	R^2	温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	温度系数 ($\times 10^{-4} \text{km}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$)	R^2	
卡拉麦里花岗岩带	二长花岗岩 (HY23) V_P	0.4~1.0	6.06	0.3020	0.91	0~700	3.41	0.99
	(HY23) V_S	0.4~1.0	3.22	0.3271	0.98	0~700	1.10	0.92
	角闪石花岗岩 (HY25) V_P	0.4~1.0	5.62	0.1568	0.98	0~700	3.60	0.96
	(HY25) V_S	0.4~1.0	3.15	0.1082	0.98	0~700	1.20	0.94
	碱性花岗岩 (HY32) V_P	0.4~1.0	6.00	0.2140	0.97	0~700	3.73	0.95
	(HY32) V_S	0.4~1.0	3.36	0.1466	0.93	0~700	0.88	0.97
	花岗闪长岩 (HY55) V_P	0.4~1.0	6.02	0.2483	0.91	0~700	3.92	0.97
	(HY55) V_S	0.4~1.0	3.42	0.1232	0.93	0~700	1.52	0.91
野马泉	黑云母花岗岩 (SJ15) V_P	0.4~1.0	5.98	0.3784	0.98	0~700	4.25	0.99
	(SJ15) V_S	0.4~1.0	3.38	0.2956	0.99	0~700	1.22	0.98
	碱长花岗岩 (XH08-01) V_P	0.4~1.0	5.91	0.2176	0.93	0~700	4.96	0.94
	(XH08-01) V_S	0.4~1.0	3.55	0.0722	0.93	0~700	0.95	0.92
	二长花岗岩 (XH08-03) V_P	0.4~1.0	6.07	0.3114	0.91	0~700	4.03	0.99
	(XH08-03) V_S	0.4~1.0	3.41	0.3110	0.92	0~700	2.94	0.96
	花岗闪长岩 (XH08-07) V_P	0.4~1.0	6.34	0.1439	0.92	0~700	4.11	0.97
	(XH08-07) V_S	0.4~1.0	3.39	0.1716	0.98	0~700	3.22	0.96
石英闪长岩 (XH08-10) V_P	0.4~1.0	6.47	0.4078	0.93	0~700	3.49	0.99	
(XH08-10) V_S	0.4~1.0	3.75	0.0988	0.93	0~700	2.03	0.97	

高温高压下花岗岩横波波速的研究相对较少. 本次实验在室温、1.0 GPa下得到的花岗质岩石的横波波速为 $3.26 \sim 3.85 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $3.58 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{S0} 为 $3.15 \sim 3.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $3.40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 小于 Kern 等(1999)得出的花岗岩的 V_{S0} 为 $3.51 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 岩石横波压力系数为 $0.0722 \sim 0.3271 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 平均值为 $0.1838 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$, 大于 Kern 等的 $0.1080 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{GPa})$. 温度系数为 $(-0.88 \sim -3.22) \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 平均值为 $-1.67 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 小于 Kern 等的 $-0.86 \times 10^{-4} \text{ km}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$. 本次实验得到的横波的相关数值与前人研究的结果存在一定差异, 一方面是因为本次实验的压力大于前人的实验压力, 另一方面是因为 Kern 等仅选用一个花岗岩样品, 矿物组成可能与本文所用样品不同, 这可能是导致 V_s 差异的主要原因.

5.2 与地震测深剖面的对比

如前所述, 前人对该地区地壳结构的认识存在明显分歧, 徐新忠等(1992)认为地壳由花岗质上地壳和玄武质下地壳组成, 缺失安山质中地壳. 花岗质岩层纵波速度为 $5.91 \sim 6.06 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 玄武质岩层纵波速度为 $6.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 王有学等认为地壳具有明显的三分结构, 纵波速度至上而下为 $6.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $6.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 横波速度分别为 $3.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 泊松比分别为 0.25 、 0.26 和 0.28 (Wang et al., 2003; 王有学等, 2004). 后者不仅利用了地震测深工作中所采集到的纵波数据, 并结合横波资料和地壳内部不同物质的实验室测定结果, 对测区的纵、横波速度结构特征进行了系统的分析研究, 结果可能更为合理, 因此, 本文采用上、中、下地壳的模式进行对比讨论.

利用表 3 中的参数, 结合该区地热特征(饶松等, 2013), 具体参数见表 4, 我们对新疆东准噶尔地区的主要花岗类岩石的 V_P 和 V_S 随深度 z 的变化进行了模拟. 采用 Kern 等(1999)的公式:

$$V_{(z)} = V_{(0)} + (dV/dP)P + (dV/dT)T_{(z)}, \quad (1)$$

其中,

$$P = \rho g z, \quad (2)$$

$$T_{(z)} = T_0 + z/\kappa \times (q_0 - A \times z/2) \quad (\text{李朋等, 2010}). \quad (3)$$

P 为压力 (GPa); $T_{(z)}$ 为深度为 z 时的地壳温度 (K); g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); z 为深度 (m); ρ 为岩石密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); T_0 为地表温度 (K) (计算时将地表温度设为 288 K); κ 为岩石热导率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

表 4 新疆准噶尔地区地壳温度计算参数(饶松等, 2013)

Table 4 Parameters used in temperature calculation of the crust in Junggar, Xinjiang (Rao et al., 2013)

圈层	岩石热导率 $\kappa (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	岩石生热率 $A (\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	地表热流 $q_0 (\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$
上地壳	2.2	1.000	35.4
中地壳	2.1	0.160	25.4
下地壳	1.9	0.075	24.3

A 为岩石生热率 ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); q_0 为地表热流 ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$), 建立了岩石弹性波速度与深度和温度的剖面(图 8).

从实验样品的拟合结果与地震剖面的对比情况来看, 花岗质岩石的纵波波速大部分都在上地壳范围内, 岩石类型主要为碱长花岗岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩, 二长花岗岩(HY23、XH08-03)、花岗闪长岩(XH08-07)和石英闪长岩(XH08-10)纵波波速还落入中地壳波速范围, 这可能说明此类岩石在中地壳中有分布, 同时石英闪长岩(XH08-10)纵波波速还落入了下地壳的范围内, 这说明石英闪长岩可能存在于该区下地壳中, 最可能的位置是下地壳上部与中地壳的过渡区.

花岗质岩石的横波波速拟合结果大部分与研究区上地壳波速一致, 岩石类型主要为碱长花岗岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩. 野马泉岩体的石英闪长岩(XH08-10)的横波波速与中地壳波速吻合, 这说明石英闪长岩可能存在于该区中地壳中.

综合以上花岗质岩石纵波波速和横波波速的拟合结果和对比情况, 我们认为研究区的主要花岗岩类岩石, 包括碱长花岗岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和部分花岗闪长岩的纵波波速和横波波速都很好地与上地壳波速吻合, 这几种岩石为该区上地壳的主要岩石类型, 石英闪长岩的纵波和横波波速均与中地壳一致, 其可能存在于中地壳中.

5.3 花岗质岩石的泊松比

岩石的泊松比是由岩石的 V_P 和 V_S 决定的, 反映岩石弹性特征的一个重要参数, 可以区分不同的岩石类型, 同时比单独的 V_P 和 V_S 更能反映地壳的组成(Zandt and Ammon, 1995). 根据本次实验得到的花岗岩类的 V_P 和 V_S , 我们按如下公式得到岩石的泊松比:

$$\sigma = [1 - (V_P^2/V_S^2 - 1)^{-1}]/2. \quad (4)$$

如图 9 所示, $0.4 \sim 1.0 \text{ GPa}$ 所有花岗岩类的泊松比变化平稳, 分布于 $0.22 \sim 0.28$ 之间, 平均值为 0.25 , 基本与前人研究的花岗质岩石的泊松比相当 (0.24) (Christensen, 1996), 其中花岗闪长岩

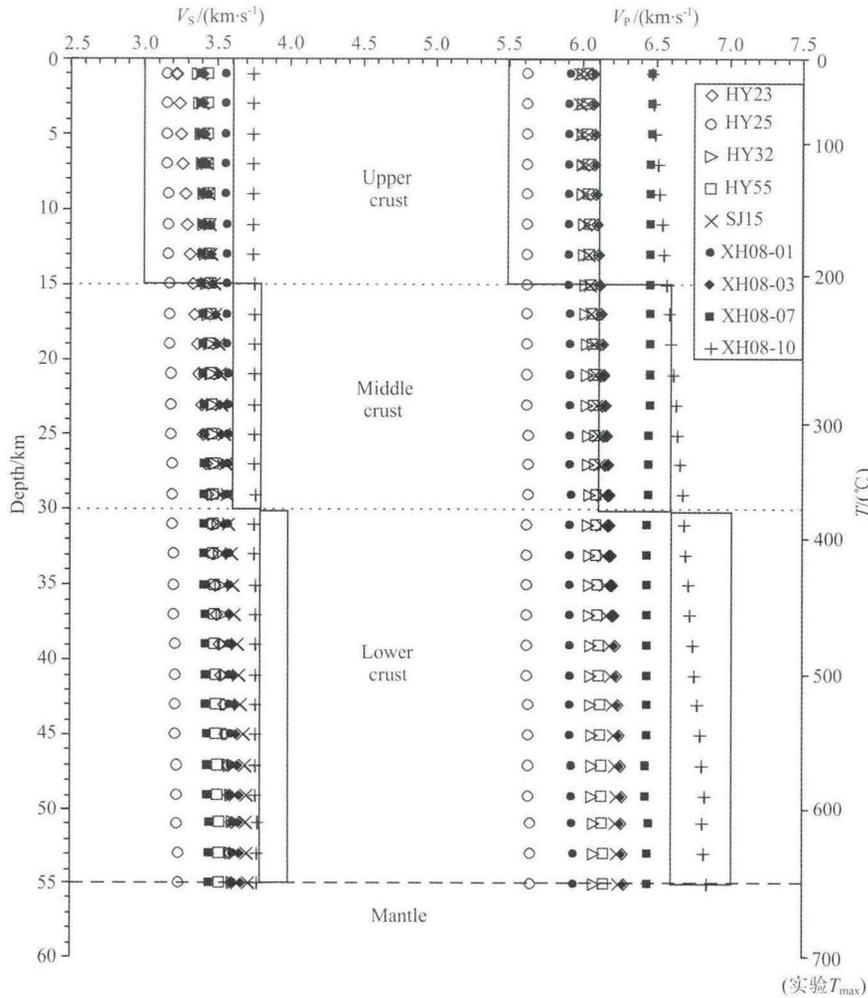


图 8 东准噶尔主要花岗岩类弹性波速度-地壳深度和温度剖面与东准噶尔地区地壳结构的对比(地层波速数据参见 Wang et al., 2003, 地壳温度数据依据公式(3)的计算结果, 本次研究的最高温度为 700 °C)

Fig. 8 Comparison of calculated velocity-crustal depth and temperature profiles for major granitoids from East Junggar with crustal structure of this area (the velocity data for the strata from Wang et al., 2003, temperature data of the crust from the results of the formula (3), the highest experimental temperature of this study is 700 °C)

(XH08-07)和二长花岗岩(HY23)的泊松比相对较高,为 0.28,这可能是由于岩石组成中高泊松比的矿物斜长石含量较高的缘故,石英含量相对较高的碱长花岗岩(XH08-01)则泊松比相对较低,为 0.22 (Christensen, 1996). 另外,前人研究表明, SiO₂ 在 55~75 wt. % 的岩石的泊松比随 SiO₂ 的增大而减小(Christensen, 1996),本次研究的花岗岩类也基本满足这样的趋势(图 10),其中 SiO₂ 在 55~75 wt. % 的花岗闪长岩和二长花岗岩分布于趋势线附近,卡拉麦里花岗岩带的碱长花岗岩和碱性花岗岩及野马泉岩体的石英闪长岩离趋势线相对较远,其 SiO₂ 分别大于 75 wt. % 和小于 55 wt. %. 实验得到的花岗岩类平均泊松比 0.25 与实测地震剖面的上地壳泊松比(0.25)一致,这就很好地说明研究区上地壳由花岗岩类组成,其演化程度相对较高,其

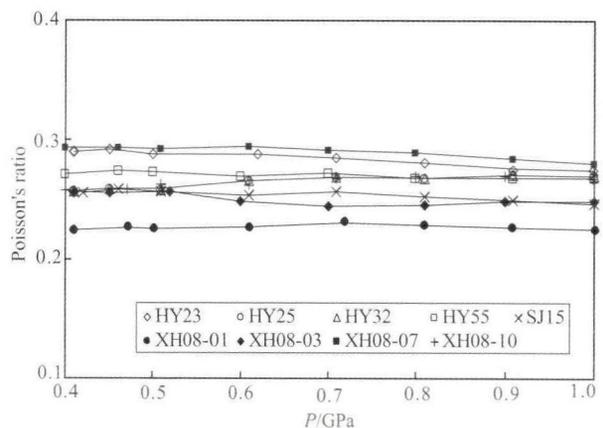


图 9 新疆东准噶尔地区主要花岗岩类泊松比与压力的变化关系

Fig. 9 Poisson's ratio versus pressure for the main granitoids from East Junggar, Xinjiang

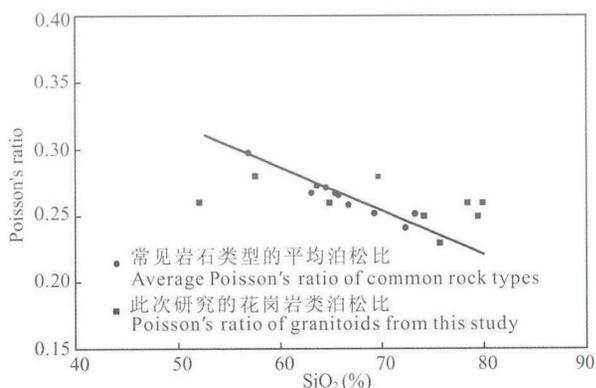


图 10 岩石泊松比与 SiO₂ 的关系

(常见岩石类型的相关数据参见 Christensen, 1996)

Fig. 10 Poisson's ratio of rocks versus contents of SiO₂ (the data of common rock types from Christensen, 1996)

中,高泊松比的岩石,如野马泉的花岗闪长岩(XH08-07)可能不是上地壳的主要岩石类型,仅零星分布,而泊松比相对低的花岗闪长岩、二长花岗岩、碱性花岗岩和碱长花岗岩为上地壳的主要岩石类型。

5.4 与其他地区上地壳纵波速度的对比

将本次研究得到的研究区上地壳主要花岗岩类岩石平均纵波波速值与 Gao 等(1998)和 Kern 等(1999)总结的中国华北、华东及世界平均上地壳纵波速度值(600 MPa, 室温)对比(图 11),本实验所得东准噶尔地区上地壳平均波速值为 5.97 km · s⁻¹。总体上,东准噶尔地区上地壳纵波波速值与中国华北和中国东部地区的上地壳波速值相当,略小于秦岭一大别地区的上地壳平均波速值,大于苏鲁地区的上地壳波速值。与世界平均上地壳波速相比,中国大部分地区的上地壳波速值均小于世界平均上地壳

波速,东准噶尔地区上地壳波速值比世界平均值 6.19 km · s⁻¹小 0.22 km · s⁻¹,这表明东准噶尔地区上地壳组成有相对较高的演化程度,这可能与显生宙以来研究区活跃的岩浆活动有关。

6 结论

(1)通过高温高压下岩石弹性波速的测量,我们得到了新疆东准噶尔地区卡拉麦里花岗岩带和野马泉岩体主要花岗岩类岩石在 1.0 GPa、室温条件下的 V_P 为 5.79~6.84 km · s⁻¹, V_S 为 3.26~3.85 km · s⁻¹, 线性拟合得到 V_{P0} 为 5.62~6.47 km · s⁻¹, V_{S0} 为 3.15~3.75 km · s⁻¹, 纵波压力系数为 0.1568~0.4078 km/(s · GPa), 横波压力系数为 0.0722~0.3271 km/(s · GPa), 纵波和横波温度系数分别为 (-3.41~-4.96) × 10⁻⁴ km/(s · °C) 和 (-0.88~-3.22) × 10⁻⁴ km/(s · °C)。

(2)根据区域地热资料,建立了岩石纵波和横波波速与深度及地壳温度的剖面,结合该区地震波速的实地测量结果,认为东准噶尔地区花岗质岩石的纵波和横波波速与研究区上、中地壳岩石波速吻合,其中碱长花岗岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和部分花岗闪长岩为上地壳的主要岩石类型,石英闪长岩可能在中地壳存在。花岗质岩石的泊松比为 0.22~0.28, 平均值为 0.25, 与研究区上地壳泊松比一致。

(3)东准噶尔地区平均上地壳纵波波速与中国华北和中国东部地区的上地壳波速相当,小于世界平均上地壳波速,暗示东准噶尔地区上地壳有相对较高的演化程度。

致谢 感谢周文戈研究员在样品组装和稿件写作过

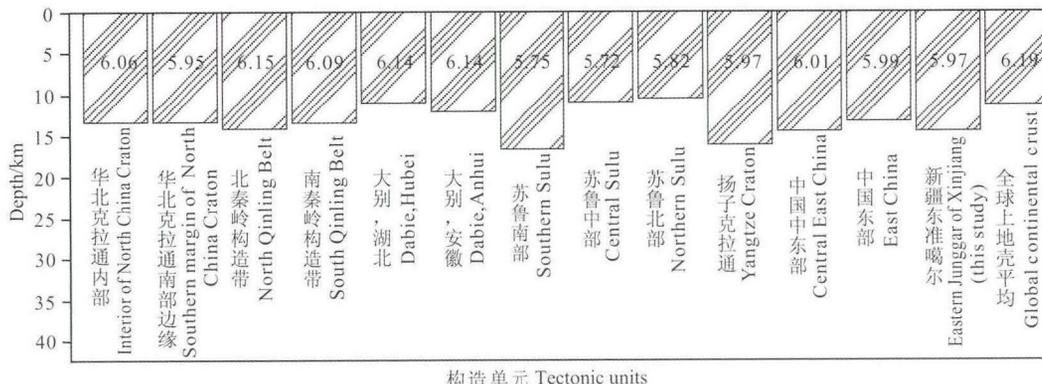


图 11 中国大部分地区及世界平均上地壳纵波速度对比

(新疆东准噶尔数据来自本次研究,其他数据来自 Kern et al., 1999 和 Gao et al., 1998)

Fig. 11 Comparison of average compressional wave velocities in the upper crust of China and the global continental crust (data for East Junggar of Xinjiang from this study, others from Kern et al., 1999 and Gao et al., 1998)

程中给予的悉心指导和热情帮助,感谢两位匿名审稿专家对初稿提出的宝贵修改意见。

References

- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F, et al. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1-4): 45-70.
- Chen B, Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691-703.
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7): 9761-9788.
- Christensen N I. 1996. Pisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2): 3139-3156.
- Cook R K. 1957. Variation of elastic constants and static strains with hydrostatic pressure: a method for calculation from ultrasonic measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(4): 445-449.
- Gan L, Tang H F, Han Y J. 2010. Geochronology and geochemical characteristics of the Yemaquan granitic pluton in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 26(8): 2374-2388.
- Gao S, Zhao Z D, Luo T C, et al. 1995. Petrological model, chemical composition and possible genesis of the crust along Yichuan-Yichang global geoscience transect (GGT) in East Qinling. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 11(2): 213-226.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975.
- Guo F F, Jiang C Y, Lu R H, et al. 2010. Petrogenesis of the Huangyangshan alkali granites in Kalamaili area, northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 26(8): 2357-2373.
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3): 135-159.
- Han B F, He G Q, Wang S G. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 42(2): 113-119.
- Han B F, Ji J Q, Song B, et al. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 22(5): 1077-1086.
- Ji S C, Wang Q, Xia B. 2002. Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores. Montreal: Polytechnic International Press, 630.
- Ji S C, Wang Q, Xia B. 2003. P-wave velocities of polymineralic rocks: comparison of theory and experiment and test of elastic mixture rules. *Tectonophysics*, 366(3-4): 165-185.
- Kern H, Gao S, Jin Z M, et al. 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, Central China: implications for the composition and delamination of the lower crust. *Tectonophysics*, 301(3-4): 191-215.
- Li J Y, Xiao X C, Tang Y Q, et al. 1990. Main characteristics of late Paleozoic plate tectonics in the southern part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review* (in Chinese), 36(4): 305-316.
- Li J Y. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 11(Suppl.): 73-84.
- Li J Y, Yang T N, Li Y P, et al. 2009. Geological features of the Karamaili faulting belt, eastern Junggar region, Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean-continent framework of the Central Asian region. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 28(12): 1817-1826.
- Li P, Zhou W G, Gong C Y, et al. 2010. Electrical conductivity of two-pyroxene granulite under high pressure in northern margin of North China craton. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(10): 2386-2395.
- Lin J F, Yu H X, Yu X Q, et al. 2007. Ziron SHRIMP U-Pb dating and geological implication of the Sabei alkali-rich granite from Eastern Junggar of Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 23(8): 1876-1884.
- Liu Y G, Xie H S, Guo J, et al. 2000. A new method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high-pressure. *Chin. Phys. Lett.*, 17(12): 924-926.
- Mao Q G, Xiao W J, Han C M, et al. 2008. Late Paleozoic southward accretionary polarity of the eastern Junggar orogenic belt: insight from the Dajiashan and other A-type granites. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24(4): 733-742.
- Patiño Douce A E, Beard J S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36(3): 707-738.
- Rao S, Hu S B, Zhu C Q, et al. 2013. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(8): 2762-2770.
- Shu S L, Wang Y J. 2003. Late Devonian-Early Carboniferous radiolarian fossils from siliceous rocks of the Kelameili ophiolite, Xinjiang. *Geological Review* (in Chinese), 49(4): 408-412.
- Su Y P. 2007. Geochronological and geochemical study on the A-type granites from Junggar, Xinjiang [Ph. D. thesis] (in Chinese). Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences.
- Su Y P, Tang H F, Liu C Q, et al. 2006. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica* (in Chinese), 25(3): 175-184.
- Su Y P, Tang H F, Sylvester P J, et al. 2007. Petrogenesis of Karamaili alkaline A-type granites from East Junggar, Xinjiang (NW China) and their relationship with tin mineralization. *Geochemical Journal*, 41(5): 341-357.

- Tang H F, Su Y P, Liu C Q, et al. 2007. Zircon U-Pb age of the plagiogranite in Kalamaili belt, northern Xinjiang and its tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 31(1): 110-117.
- Wan F, Zhou W G, Liu Y G, et al. 2008. The elastic and electrical properties for amphibolite at high temperature and high pressure and their geological implication. *Geological Science and Technology Information* (in Chinese), 27(6): 47-52.
- Wang Q, Ji S C, Salisbury M H, et al. 2005. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 398(1-2): 67-99.
- Wang Y X, Mooney W D, Yuan X C, et al. 2003. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault, northwest China. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth* (1978-2012), 108(B6), doi: 10.1029/2001JB000552.
- Wang Y X, Han G H, Jiang M, et al. 2004. Crustal structure along the geosciences transect from Altay to Altun Tagh. *Chinese Journal of Geophys.* (in Chinese), 47(2): 240-249.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342.
- Xie H S, Zhang Y M, Xu H G, et al. 1993. A new method of measurement for elastic-wave velocities in minerals and rocks at high-temperature and high-pressure and its significance. *Science in China (Series B)*, 36(10): 1276-1280.
- Xu J, Zhang Y M, Hou W, et al. 1994. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, pyrophyllite, and kimberlite up to 1400 °C and 5.5 GPa. *High Temperatures-High Pressures*, 26(4): 375-384.
- Xu X Z, Wang Y X, Jiang Y M, et al. 1992. Crustal velocity structure and geotectonic unit division in Xinjiang-Gansu section based on deep seismic sounding. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 10(2): 147-154.
- Yang G X, Li Y J, Wu H E, et al. 2011. Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3): 722-736.
- Yu H X, Wu G Q, Liu J Y. 1998. The two ore-forming metals series closely related to the two granitoid series in eastern Junggar, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 22(2): 119-127.
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal poisson's ratio. *Nature*, 374(6518): 152-154.
- Zhou W G, Xie H S, Zhao Z D, et al. 1998. Compressional wave velocity in the metamorphic rock of Yuanjiang-Mojiang profile across Ailaoshan metamorphic belt and geology implication. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 41(Suppl.): 48-54.
- Zhou W G, Xie H S, Liu Y G, et al. 2005. Dehydration melting of solid amphibolite at 2.0 GPa: Effects of time and temperature. *Science in China (Series D)*, 48(8): 1120-1133.

附中文参考文献

- 甘林,唐红峰,韩宇捷. 2010. 新疆东准噶尔野马泉花岗岩体的年龄和地球化学特征. *岩石学报*, 26(8): 2374-2388.
- 高山,赵志丹,罗庭川等. 1995. 东秦岭河南伊川—湖北宜昌地学断面地壳岩石组成、化学成分及形成机制. *岩石学报*, 11(2): 213-226.
- 郭芳放,姜常义,卢荣辉等. 2010. 新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因. *岩石学报*, 26(8): 2357-2373.
- 韩宝福,何国琦,王式沈. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16-21.
- 韩宝福,季建清,宋彪等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077-1086.
- 李锦铁,肖序常,汤耀庆等. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. *地质评论*, 36(4): 305-316.
- 李锦铁. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史. *岩石学报*, 11(增刊): 73-84.
- 李锦铁,杨天南,李亚萍等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束. *地质通报*, 28(12): 1817-1826.
- 李朋,周文戈,龚超颖等. 2010. 高压下华北北缘二辉麻粒岩电导率的研究. *地球物理学报*, 53(10): 2386-2395.
- 林锦富,喻亨享,余心起等. 2007. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. *岩石学报*, 23(8): 1876-1884.
- 毛启贵,肖文交,韩春明等. 2008. 东准噶尔地区晚古生代向南增生: 来自 A 型花岗岩的启示. *岩石学报*, 24(4): 733-742.
- 饶松,胡圣标,朱传庆等. 2013. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构. *地球物理学报*, 56(8): 2762-2770.
- 舒树良,王玉净. 2003. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石. *地质论评*, 49(4): 408-412.
- 苏玉平,唐红峰,刘丛强等. 2006. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究. *岩石矿物学杂志*, 25(3): 175-184.
- 苏玉平. 2007. 新疆准噶尔 A 型花岗岩的年代学和地球化学研究[博士论文]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所.
- 唐红峰,苏玉平,刘丛强等. 2007. 新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *大地构造与成矿学*, 31(1): 110-117.
- 万方,周文戈,刘永刚等. 2008. 高温高压下斜长角闪岩弹性、电学性质及其地质意义. *地质科技情报*, 27(6): 47-52.
- 王有学,韩果花,姜枚等. 2004. 阿尔泰—阿尔金地学断面地壳结构. *地球物理学报*, 47(2): 240-249.
- 谢鸿森,张月明,徐惠刚等. 1993. 高温高压下测量岩石矿物波速的新方法及其意义. *中国科学(B辑)*, 23(8): 861-864.
- 徐新忠,王有学,蒋亚明等. 1992. 新一甘地震测深剖面的地壳速度结构及大地构造单元划分. *新疆地质*, 10(2): 147-154.
- 喻亨享,吴郭泉,刘家远. 1998. 新疆东准噶尔地区两类花岗岩与两个成矿系列. *大地构造与成矿学*, 22(2): 119-127.
- 周文戈,谢鸿森,赵志丹等. 1998. 哀牢山变质带元江—墨江剖面岩石的纵波波速特征及其地质意义. *地球物理学报*, 41(增刊): 48-54.
- 周文戈,谢鸿森,刘永刚等. 2005. 2.0 GPa 块状斜长角闪岩部分熔融—时间和温度的影响. *中国科学(D辑)*, 35(4): 320-332.

(本文编辑 何燕)