

托云深源岩石包体计算波速与地震波速 共同约束西南天山壳—幔过渡带

焦淑娟¹, 郑建平^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 对我国西部新疆托云地区中新世火山岩中的深源岩石包体进行了波速计算, 并与地球物理深部探测技术相结合, 共同限定了西南天山深部壳—幔过渡带的组成和性质。托云地区麻粒岩、橄辉岩的计算波速分别是 6.98~7.36 km/s、7.96~8.47 km/s。这些结果与地震反射探测地震波速的对比, 说明在西南天山岩石圈剖面中的 40~48 km 处存在较明显的壳—幔过渡带。过渡带自上而下主要由石英麻粒岩、辉石麻粒岩和橄辉石/石榴石麻粒岩组成, 然后进入尖晶石相二辉橄辉岩组成的上地幔。这样的岩石圈壳—幔结构可以用岩浆底侵—变质作用来解释。

关键词: 西南天山; 包体; 波速; 壳—幔过渡带; 底侵作用。

中图分类号: P583

文章编号: 1000-2383(2008)03-0313-07

收稿日期: 2008-01-16

Crust-Mantle Transitional Zone beneath SW Tianshan Area Constrained by the Seismic and Calculated Velocities of the Deep-Seated Xenoliths in Tuoyun Basaltic Rocks

JIAO Shu-juan¹, ZHENG Jian-ping^{1,2}

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The velocities of a series of deep-seated xenoliths in Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks from Tuoyun basin, western Xinjiang (NW China), are calculated. These data, combined with the published seismic velocities for the area, are used to define the composition and structure of the crust-mantle transitional zone beneath southwestern Tianshan. The calculated velocities of peridotite and granulite xenoliths are 6.98–7.36 km/s and 7.96–8.47 km/s, respectively. The comparison of these data with the seismic velocities shows the presence of the crust-mantle transitional zone in 40–48 km beneath southwestern Tianshan. The zone consists of quartz granulite, pyroxene granulite and olivine/garnet granulite from top to bottom, and then transfers into the upper mantle mainly composed of spinel-facies lherzolite with or without volatile component minerals (phlogopite or amphibole). Such crust-mantle structure of lithosphere can be well explained by magma underplating and metamorphism.

Key words: southwestern Tianshan; xenolith; velocity; crust-mantle transitional zone; magma underplating.

除了直接利用地球物理深部探测技术来研究深部岩石圈的结构和性质外, 由岩浆快速带到地表的深源岩石包体成为人们认识和研究深部岩石圈的组成、结构以及壳—幔相互作用的重要方法和手段。与东部岩石圈研究所取得的丰硕成果(周新民等, 1992; 刘勇胜等, 2001; 翟明国和樊祺诚, 2002; 高山

基金项目: 国家地质学理科基地基金(No. J0630538); 国家杰出青年科学基金项目(No. 40425002)。

作者简介: 焦淑娟(1984—), 本科生(理科基地班), 岩石学专业。E-mail: jiaoshujuan2006@163.com。通讯作者: 郑建平, E-mail: jpzheng@cug.edu.cn

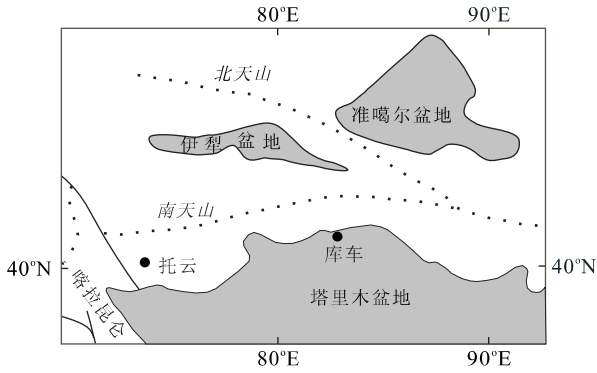


图 1 研究样品的位置(据 Brookfield, 2000 略修改)

Fig. 1 The locality map of the studied samples

等, 2003; 许文良等, 2004; 邓晋福等, 2006; 郑建平等, 2006)相比, 对于中国西部地区岩石圈尤其是深部岩石圈的性质和结构人们还知之甚少。樊祺诚和刘若新(1996)在研究汉诺坝的高温麻粒岩包体时, 提出了高温麻粒岩是由幔源岩浆底侵下地壳, 再经壳—幔相互作用导致麻粒岩相变质而形成的, 较早在国内探讨岩浆的底侵作用。近些年来, 在新疆塔里木北缘的托云地区以及西北缘的西昆仑地区的火成岩中相继发现了深源岩石包体以及矿物巨晶(韩宝福等, 1998; Han *et al.*, 1999; 罗照华等, 2000; 张招崇等, 2002), 这为研究中国西部地区的深部过程打开了一扇“天窗”(郑建平等, 2001; Zheng *et al.*, 2006a, 2006b)。然而到目前为止, 将深源岩石包体和地球物理深部探测技术两者有机结合起来进行深部岩石圈的研究还很少。

有人工地震剖面通过附近的托云盆地(图 1), 在其玄武岩中发育有大量深源岩石包体, 它们提供了用上述两种方法共同限制深部岩石圈情况的良好机会。本文就是利用这样有利的条件, 计算麻粒岩和橄榄岩包体的岩石波速, 并与沙雅—布尔津综合地质剖面的实测地震波速(Zhao *et al.*, 2003)对比, 探测该区深部岩石圈的壳—幔过渡带性质和可能的形成机制。

1 地质背景及样品描述

天山造山带是世界上最高(海拔 $>7\ 000\ \text{m}$)、最年轻(年龄 $<20\ \text{Ma}$)的内陆造山带之一, 位于欧亚大陆的腹部, 全长近 $3\ 000\ \text{km}$ 。西南天山坐落在塔里木板块和伊犁—伊塞克湖板块之间, 位于塔里木板块北缘的活动带上(陈哲夫和成守德, 1997), 属于南

天山晚古生代裂陷槽。天山造山带最复杂的地区之一, 在我国境内西起乌鲁木齐恰提, 东到阿合齐一带; 北至那伦—那拉提缝合线, 南与乌洽断裂、柯坪隆起相邻(肖序常等, 1992; 刘刚, 2004)。

本文样品采于托云盆地(图 1)。它位于南天山早—中生代活动边缘与塔里木盆地北缘喀拉铁热克晚古生代陆坡的接合部位, 是在晚古生代碰撞造山带基础上发展起来的陆内裂陷盆地(肖序常等, 1992; 王彦斌等, 2000)。盆地中的玄武岩产于白垩纪—古近纪间盆地红层中(罗照华等, 2003; 王永成等, 2004), 喷发时代为早白垩世(周清杰和郑建京, 1990; 徐学义等, 2003)。火山岩成层状产出, 与围岩呈整合接触关系, 可分为 3 层, 其中在最下层发现有大量深源岩石包体(韩宝福等, 1998; 郑建平等, 2001)。其中麻粒岩包体个体大, 粒径为 $12\sim 15\ \text{cm}$, 角砾状或浑圆状, 细粒变晶结构, 多数为块状或条带状构造, 矿物组合为 $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Pl} \pm \text{Grt} \pm \text{Q} \pm \text{Kfs}$, 大多数属于基性麻粒岩, 根据矿物组合可分为: 石榴石麻粒岩、橄榄石麻粒岩、辉石麻粒岩和石英麻粒岩, 其中以橄榄石麻粒岩和辉石麻粒岩为主。其平衡温度为 $910 \pm 35\ ^\circ\text{C}$, 最大压力为 $13.5 \times 10^8\ \text{Pa}$, 表明麻粒岩来自于壳—幔边界附近, 且当时的地壳厚度小于 $44\ \text{km}$ (郑建平等, 2005; Zheng *et al.*, 2006a)。橄榄岩包体相对较小, 粒径为 $3\sim 3.5\ \text{cm}$, 角砾状, 多为细粒结构, 有些表现出一定的剪切变形特征, 矿物组合为 $\text{Ol} + \text{Opx} + \text{Cpx} \pm \text{Sp} \pm \text{Amp} \pm \text{Phl}$, 主要岩石类型是二辉橄榄岩、尖晶石二辉橄榄岩和纯橄榄岩等(表 1)。其平衡温度变化范围为 $894\sim 1\ 060\ ^\circ\text{C}$, 来自岩石圈地幔顶部, 估计最大深度约 $58\ \text{km}$ (郑建平等, 2001; Zheng *et al.*, 2006b)。

本文中实测地震波速数据引自国家“305”课题和“973”课题资助的沙雅—布尔津综合地球物理剖面的研究成果, 即由地震反射所得该剖面下的二维实测波速结构。该剖面南起塔里木盆地北缘的沙雅, 自南而北近于垂直地穿过塔里木盆地北缘、天山造山带和准噶尔盆地, 北至阿尔泰山南麓的布尔津, 全长 $995\ \text{km}$ (Zhao *et al.*, 2003)。这一剖面在塔里木盆地北缘(如库车), 与托云较近, 两地的速度结构应具有可比性。

2 计算方法与结果

要进行两种方法的有效结合, 关键是要得到实

表 1 麻粒岩、橄榄岩包体的矿物组成与含量(%)

Table 1 The mineral composition and mode of granulite and peridotite xenoliths

岩石类型	样品号	Cpx	Opx	Pl	Grt	Ol	Kfs	Qtz	Bt	Ilm	Ap	Sp	Amp	Mica
石英麻粒岩	TY1b	20.2	18.5	53.9				5.2	0.9	1.3				
	TY7d	19.3	17.0	57.1			1.5	3.8	0.3	1.0				
辉石麻粒岩	TY13	18.2	22.7	52.0			2.1		1.9	3.1				
	TY62	27.2	23.3	43.6			0.7		0.7	5.2				
	TY67	26.1	25.4	43.6			1.6			3.3				
	TY16	27.4	27.6	42.2						2.8				
	TY17	27.0	27.2	41.9						3.9				
橄榄石麻粒岩	TY61	24.1	27.5	40.1			2.2		1.8	2.1	2.2			
	TY12	24.1	27.2	37.4		4.9	0.5		1.7	4.2				
	T4p3	26.3	33.9	35.3		2.1				2.4				
	T5ap2	28.1	29.3	37.9		1.6				3.1				
石榴石麻粒岩	T7bp2	28.3	27.6	38.8		3.4				1.9				
	TY15	23.7	21.2	47.1	8.0									
尖晶石二辉橄榄岩	TY65	24.4	20.9	47.8	6.9									
	T1c	21.5	26.0			52.0						0.5		
含金云母尖晶石二辉橄榄岩	T1e	21.0	23.0			55.5						0.5		
	T4p1	18.0	21.0			60.0						1.0		
	T4p2	11.5	23.5			61.0						2.0		2.0
含角闪石尖晶石二辉橄榄岩	T3bp2	14.0	27.5			56.5						1.5	0.5	
	T2	21.5	24.5			54.0								
二辉橄榄岩	T14d	17.5	25.5			57.0								
	T39bp2	23.0	26.0			51.0								
	T30	22.5	27.4			50.0								0.1
	T24b	12.0	24.0			59.5							4.0	
角闪石二辉橄榄岩	T24a	19.5	16.0			50.5							14.0	
尖晶石纯橄榄岩	T3bp1					97.0						3.0		

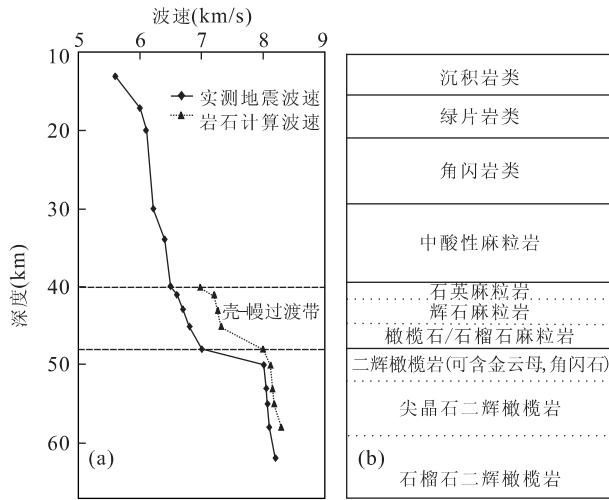


图 2 西南天山地下壳—上地幔顶部岩石计算波速与地震实测波速的对比(a)和岩性柱状图(b)

Fig. 2 Comparison of rock calculated velocities of lower crust-top of upper mantle and seismic wave velocities (a), and lithology column of lower crust-top of upper mantle (b), southwestern Tianshan

测地震波速和岩石计算波速各自随深度变化的曲线。前者取沙雅—布尔津剖面的库车下方实测地震波速结构,将其转化为实测地震波速随深度变化的曲线(图 2a 中实线)。后者由托云深源岩石包体计算得出,计算方法如下:在样品的矿物含量已知的前提下,如表 1,且可查得所含矿物的实测波速(Christensen, 1989),由内插法可得到麻粒岩和橄榄岩包体的计算波速(表 2)。

麻粒岩的计算波速变化范围为 6.98~7.36 km/s(表 2),平均计算波速为 7.21 km/s。其中石榴石麻粒岩的计算波速为 7.26 km/s;橄榄石麻粒岩为 7.32 km/s;辉石麻粒岩为 7.20 km/s;石英麻粒岩为 6.99 km/s。可以看出橄榄石麻粒岩与石榴石麻粒岩的计算波速要大于辉石麻粒岩,石英麻粒岩的计算波速最小。石榴石麻粒岩的计算波速小于橄榄石麻粒岩,可能是因为在 TY15 和 TY65 中不含有波速较大的钛铁矿。橄榄岩的计算波速变化范围为 7.96~8.47 km/s(表 2),平均计算波速为 8.15 km/s。

表 2 麻粒岩、橄榄岩包体的计算波速

Table 2 The calculated velocities of granulite and peridotite xenoliths

岩石类型	样品号	波速 (km/s)	平均波速 (km/s)
石英麻粒岩	TY1b	7.01	6.99
	TY7d	6.98	
辉石麻粒岩	TY13	7.05	7.20
	TY62	7.25	
	TY67	7.21	
	TY16	7.26	
	TY17	7.26	
	TY61	7.18	
橄榄石麻粒岩	TY12	7.29	7.32
	T4p3	7.36	
	T5ap2	7.32	
	T7bp2	7.32	
石榴石麻粒岩	TY15	7.27	7.26
	TY65	7.25	
尖晶石二辉橄榄岩	T1c	8.12	8.15
	T1e	8.15	
	T4p1	8.19	
含金云母尖晶石二辉橄榄岩	T4p2	8.18	8.18
含角闪石尖晶石二辉橄榄岩	T3bp2	8.18	8.18
	二辉橄榄岩	T2	
二辉橄榄岩	T14d	8.15	8.12
	T39bp2	8.11	
	T30	8.10	
	含角闪石二辉橄榄岩	T24b	
角闪石二辉橄榄岩	T24a	7.96	7.96
尖晶石纯橄榄岩	T3bp1	8.47	8.47

其中含尖晶石岩石的计算波速略大于不含尖晶石的岩石,若岩石中含有适量的金云母或角闪石等含水矿物,会使岩石的计算波速相对较低。

根据 Zheng *et al.* (2006a) 提供的托云麻粒岩包体的压力值,由公式: $H(\text{km}) = 4.2 + 0.03 \times p$ (MPa) (Avé Lallemand *et al.*, 1980) 可得麻粒岩包体来自的深度范围,大致为 40~45 km。对于橄榄岩, Zheng *et al.* (2006b) 提到托云橄榄岩包体的深度为 58 km 左右。这样我们知道了各种包体的计算岩石波速,又知道了它们来自的深度,就可以作出包体的计算岩石波速随深度变化的曲线(图 2a 中的虚线)。同理,知道了包体来自的深度和包体本身代表地球深部的岩性特征,可作出岩性随深度变化的图形,即岩性柱状图(图 2b)。其中 10~15 km 可能为沉积岩类;约 15~20 km 为绿片岩类;上述两者应为上地壳。约 20~30 km 为角闪岩类,为中地壳;约

30~40 km 为中酸性麻粒岩类,为下地壳。它们都是根据地震波速实测数据所推断的。岩石圈剖面中,约 40~48 km 为基性麻粒岩类,本文认为它是壳—幔过渡带的产物;根据岩石计算波速从上到下依次为石英麻粒岩、辉石麻粒岩和橄榄石麻粒岩/石榴石麻粒岩;约 48~58 km 为橄榄岩类,为上地幔顶部。

3 讨论

将计算波速与实测波速对比后,发现二者之间既有相互吻合的一面,又有不相同的地方。相互吻合的一面主要表现在两者不约而同地表明一个深度为 40~48 km 波速渐变的壳—幔过渡带的存在。且麻粒岩的计算波速 6.98~7.36 km/s,也符合壳—幔过渡带(6.8~7.8 km/s; Mooney and Meissner, 1992)的波速特征,由小波转换资料也可确定在南天山下部有壳—幔过渡带的存在(赵俊猛, 2005)。该研究表明用地球物理深部探测技术所得的现代岩石圈的情况在一定程度上还能反映中生代时岩石圈的情况(计算岩石波速所代表的岩石圈),这两种方法均反映了壳—幔过渡带的存在。

当然,曲线也存在明显的不一致,即岩石计算波速明显高于实测地震波速,造成这种差异的可能原因有:(1)方法不同,研究方法的不同所引起的误差是很难避免的,另外矿物的波速值本身就随着矿物中化学成分的变化而变化,本文数据为各矿物的平均波速值。且由于缺少必要的数据,得出的计算波速没有经过温度和压力的校正;(2)时代不同,图 2a 中虚线代表寄主玄武岩浆喷发时即早白垩世前的深部岩石圈情况,而图 2a 的实线代表现代西南天山下部岩石圈的情况;(3)粒间相的影响,在计算包体的岩石波速时,没有考虑矿物颗粒间相的影响,在各个矿物颗粒之间应该存在不同种类不同比例的“杂质”,而由于数据有限这部分未考虑进去。

对托云地区 4 种麻粒岩包体进行的 LAM-ICPMS 单颗粒锆石 U-Pb 同位素研究,得到 690~770 Ma 的上相交年龄和 80~125 Ma 的下相交年龄。锆石颗粒核部的环带结构暗示上相交年龄反映了岩浆结晶作用和随后发生的麻粒岩相变质作用;下相交年龄反映了下地壳的一次大规模的热事件,可能与寄主玄武岩浆的喷发有关。Hf 同位素的组成随年龄变化很小,表明大多数较年轻的锆石经过热的重组。这些麻粒岩锆石的 Hf 模式年龄从 1.3 Ga

变化到 1.7 Ga, 以上的数据以及麻粒岩的全岩化学分析表明这些麻粒岩包体的原岩是由镁铁质的岩浆底侵以及与地壳原有物质混染形成。Hf 模式年龄也表明下地壳组分的年龄 ≥ 2.5 Ga、甚至 >3.4 Ga, 属于新元古代(Zheng *et al.*, 2006a)。并混染更古老的大陆地壳组分, 从而可认为下地壳(相对于先存的古老组分)是新生的, 与壳—幔过渡带的形成有关。

关于下地壳底部麻粒岩包体的成因已有多种解释, 如熔融残余、堆晶、变质分异(Rudnick, 1995)、变沉积岩(Stosch *et al.*, 1992)等。对于西南天山深部麻粒岩的成因, Zheng *et al.* (2006a) 提出为地幔岩浆底侵作用所致, 早在樊祺诚和隋建立(2001)及樊祺诚等(2005)研究汉诺坝新生代玄武岩中麻粒岩包体时, 就提出了岩浆底侵作用导致壳—幔过渡带形成的岩石学证据, 通过对这些包体进行岩相学、矿物化学、地球化学等的描述和研究, 可以恢复壳—幔过渡带的组成和状态。而本文的研究说明将地球物理深部探测技术和深源岩石包体两者相结合共同显示了西南天山深部壳—幔过渡带的存在, 壳—幔过渡带的存在特征就为岩浆底侵作用的观点提供了可靠的证据, 即认为壳—幔过渡带的物质(麻粒岩)主要是由新生的地幔岩浆上升过程中发生了结晶分异和变质作用形成的, 是岩浆底侵作用的产物。

4 结论

新疆西部西南天山托云地区中、新生代火成岩中的橄榄岩、麻粒岩的计算波速分别是 6.98~7.36 km/s、7.96~8.47 km/s。这些结果与地震反射探测得到的地震波速的对比, 说明在西南天山岩石圈剖面的 40~48 km 处存在壳—幔过渡带, 从上到下由石英麻粒岩、辉石麻粒岩和橄榄石/石榴石麻粒岩组成。上地幔顶部主要由含或不含挥发成分矿物(金云母或角闪石)的尖晶石相二辉橄榄岩组成。壳—幔过渡带的形成可以用岩浆底侵—变质作用来解释。

References

Avé Lallemant, H. G., Mercier, J. C. C., Cater, N. L., et al., 1980. Rheology of the upper mantle: Inferences from peridotite xenoliths. *Tectonophysics*, 70: 85—113.

Brookfield, M. E., 2000. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tianshan. *Tectonophysics*, 328: 1—14.

Chen, Z. F., Cheng, S. D., 1997. Opening and closing tectonics and mineralization in Xinjiang. Science and Technology and Health Publishing House, 乌鲁木齐 (in Chinese).

Christensen, N. I., 1989. Seismic velocity. In: Camichael, R. S., ed., Practical handbook of physical properties of rocks and minerals. CRC Press, Boca Raton, 429—534.

Deng, J. F., Su, S. G., Liu, C., et al., 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: Delamination or thermal erosion and chemical metasomatism. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105—119 (in Chinese with English abstract).

Fan, Q. C., Liu, R. X., 1996. The high temperature granulite xenoliths in the Hannuoba basalt. *Chinese Science Bulletin*, 41(3): 235—238 (in Chinese).

Fan, Q. C., Sui, J. L., 2001. The granulite-eclogite facies cumulate xenoliths in Hannuoba area—The evidence of the crust-mantle transitional zone. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 1: 23—27 (in Chinese with English abstract).

Fan, Q. C., Zhang, H. F., Sui, J. L., et al., 2005. Magma underplating and composition of crust-mantle margin nowadays: Evidence from the petrology and geochemistry of the xenoliths in Hannuoba area. *Science in China (Series D)*, 35(1): 1—14 (in Chinese).

Gao, S., Roberta, L. R., Richard, W. C., et al., 2003. Removal of lithospheric mantle in the North China craton: Re-Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 61—67 (in Chinese with English abstract).

Han, B. F., Wang, X. C., He, G. Q., et al., 1998. Discovery of upper mantle and lower crust xenolith in Early Cretaceous volcanic rock from southwest Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 43(23): 2544—2547 (in Chinese).

Han, B. F., Wang, X. C., He, G. Q., et al., 1999. Discovery of mantle and lower crust xenoliths from Early Cretaceous volcanic rocks of southwestern Tianshan, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 44(12): 1119—1123.

Liu, G., 2004. Metallogenic perspective analyzing of representative deposits in southwest Tianshan. In: He, G. Q., Xu, X., eds., Geology and mineral collection of Tianshan, Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing, 119—124 (in Chinese).

Liu, Y. S., Gao, S., Zhou, L., et al., 2001. Geochronology and geodynamic implications of the felsic granulite xenoliths from the Hannuoba basalt. *Geochimica*, 30(1): 51—56 (in Chinese with English abstract).

- Luo, Z. H., Bai, Z. D., Zhao, Z. D., et al., 2003. Cenozoic magmatism in the south and north rims of Tarim basin; Petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 179–189 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Zhang, W. H., Deng, J. F., et al., 2000. Characteristic and geological significance of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, western Kunlun Mountains, China. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 295–298 (in Chinese with English abstract).
- Mooney, W. D., Meissner, R., 1992. Multi-genetic origin of crustal reflectivity; A review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and MOHO. In: Fountain, D. M., Arculus, R., Kay, R., et al., eds., *Continental lower crust*. Elsevier, Amsterdam-London-New York-Tokyo, 45–71.
- Rudnick, R. L., 1995. Continental crust: Growth from below. *Nature*, 347: 711–712.
- Stosch, H. G., Schmuker, A., Reys, C., 1992. The nature and geological history of the deep crust under the Eifel. *Germany Terra Nova*, 4(1): 53–62.
- Wang, Y. B., Wang, Y., Liu, X., et al., 2000. Geochemical characteristics and genesis of Late Cretaceous to Paleocene basalts in Tuoyun basin, South Tianshan Mountain. *Acta Petrologica Mineralogica*, 19(2): 131–139 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. C., Huang, B. C., Zhu, R. X., et al., 2004. The paleomagnetic results of Cenozoic volcanic rocks in Tuoyun basin, Southwest Tianshan and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 993–999 (in Chinese).
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. Tectonics of North Xinjiang and its adjacent region. Geological Publishing House, Beijing, 2–3 (in Chinese).
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2004. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China craton; Evidence from Mesozoic igneous rocks and deep-seated xenoliths. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 309–317 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. Y., Xia, L. Q., Xia, Z. C., et al., 2003. Geochemistry and genesis of Cretaceous-Paleogene basalts from the Tuoyun basin, Southwest Tianshan Mountains. *Geochimica*, 32(6): 551–560 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Fan, Q. C., 2002. Mesozoic replacement of bottom crust in North China craton; An orogenic mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Xiao, X. C., Wang, J., et al., 2002. Discovery of enclaves from Cenozoic Pulu volcanic rocks of west Kunlun Mountains and their geological implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 386–390 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. M., 2005. Lithospheric structure and geodynamics of Tianshan orogenic belt. Seismological Publishing House, Beijing, 3–105 (in Chinese).
- Zhao, J. M., Liu, G. D., Lu, Z. X., et al., 2003. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. *Tectonophysics*, 376: 199–239.
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2006a. Granulite xenoliths and their zircons, Tuoyun, NW China; Insights into southwestern Tianshan lower crust. *Precambrian Research*, 145: 159–181.
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2006b. The lithospheric mantle beneath the southwestern Tianshan area, Northwest China. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 151(4): 457–479.
- Zheng, J. P., Lu, F. X., O'Reilly, S. Y., et al., 2001. Trace element of Tuoyun clinopyroxene; Implication for the deep processes of lithospheric mantle beneath the southwest Tianshan, West China. *Chinese Science Bulletin*, 46(6): 497–502 (in Chinese).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., Yu, C. M., et al., 2006. Peridotitic petrochemistry of the eastern North China; Significance for lithospheric mantle evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Luo, Z. H., Yu, C. M., et al., 2005. Geochemistry and zircon U-Pb ages of granulite xenolith from Tuoyun basalts, Xinjiang; Implications for the petrogenesis and the lower crustal nature beneath southwestern Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 50(8): 793–801 (in Chinese).
- Zhou, Q. J., Zheng, J. J., 1990. Tectonic analysis of Tarim. Science Press, Beijing, 27–59 (in Chinese).
- Zhou, X. M., Yu, J. H., Xu, X. S., et al., 1992. Discovery and implications of the granulite xenoliths in basalts from Nüshan. *Chinese Science Bulletin*, 37(13): 1198–1201 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈哲夫,成守德,1997.新疆开合构造与成矿.乌鲁木齐:新疆科技卫星出版社.
- 邓晋福,苏尚国,刘翠,等,2006.关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论:是拆沉,还是热侵蚀和化学交代.地学前缘,13(2):105—119.
- 樊祺诚,刘若新,1996.汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体.科学通报,41(3):235—238.
- 樊祺诚,隋建立,2001.汉诺坝麻粒岩相—榴辉岩相堆晶岩捕虏体——壳—幔过渡带的证据.中国科学基金,1:23—27.
- 樊祺诚,张宏福,隋建立,等,2005.岩浆底侵作用与汉诺坝现今壳—幔边界组成——捕虏体岩石学与地球化学证据.中国科学(D辑),35(1):1—14.
- 高山,Roberta, L. R., Richard, W. C.,等,2003.华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re—Os 同位素证据.地学前缘,10(3):61—67.
- 韩宝福,王学潮,何国琦,等,1998.西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体.科学通报,43(23):2544—2547.
- 刘刚,2004.利用遥感技术对西南天山几个典型矿床的成矿远景分析.见:何国琦,徐新,中国新疆天山地质与矿产论文集.北京:地质出版社,119—124.
- 刘勇胜,高山,周炼,等,2001.汉诺坝长英质麻粒岩包体同位素年代学及其地球动力学意义.地球化学,30(1):51—56.
- 罗照华,白志达,赵志丹,等,2003.塔里木盆地南北缘新生代火山岩成因及其地质意义.地学前缘,10(3):179—189.
- 罗照华,张文会,邓晋福,等,2000.西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体.地学前缘,7(1):295—298.
- 王彦斌,王永,刘训,等,2000.南天山托云盆地晚白垩世—早第三纪玄武岩的地球化学特征及成因探讨.矿物岩石学杂志,19(2):131—139.
- 王永成,黄宝春,朱日祥,等,2004.西南天山托云盆地新生代火山岩古地磁结果及构造意义.科学通报,49(10):993—999.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等,1992.新疆北部及邻区大地构造.北京:地质出版社,2—3.
- 许文良,王清海,王冬艳,等,2004.华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制:中生代火成岩和深源捕虏体证据.地学前缘,11(3):309—317.
- 徐学义,夏林圻,夏祖春,等,2003.西南天山托云地区白垩纪—早第三纪玄武岩地球化学及其成因机制.地球化学,32(6):551—560.
- 翟明国,樊祺诚,2002.华北克拉通中生代下地壳置换:非造山过程的壳幔交换.岩石学报,18(1):1—8.
- 张招崇,肖序常,王军,等,2002.西昆仑山普鲁新生代火山岩中包体的发现及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,27(4):386—390.
- 赵俊猛,2005.天山造山带结构与动力学.北京:地震出版社,3—105.
- 郑建平,路凤香, O'Reilly, S. Y.,等,2001.新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程.科学通报,46(6):497—502.
- 郑建平,路凤香,余淳梅,等,2006.华北东部橄榄岩岩石化学特征及其岩石圈地幔演化意义.地球科学——中国地质大学学报,31(1):49—56.
- 郑建平,罗照华,余淳梅,等,2005.新疆托云麻粒岩捕虏体地球化学和锆石年代学:岩石成因及西南天山下地壳性质.科学通报,50(8):793—801.
- 周清杰,郑建京,1990.塔里木构造分析.北京:科学出版社,27—59.
- 周新民,于津海,徐夕生,等,1992.女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义.科学通报,37(13):1198—1201.