

新疆榆树沟麻粒岩-橄榄岩地体: 南天山北缘 出露地表的古生代大陆壳-幔过渡带

嵇少丞¹, 王茜², 邵同宾¹, 孙圣思³, 李阿伟⁴,
道林克祯⁵, 近藤洋裕⁵, 李建峰²

(1.加拿大蒙特利尔综合工学院 民用、地质与采矿工程系, 蒙特利尔 H3C 3A7; 2.中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3.西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069; 4.中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 5.日本静冈大学 地球科学系, 静冈 422-8529)

摘要: 对于大陆造山带内部的超基性岩体, 除了蛇绿岩成因之外还有其他或许更为合理的解释。例如, 位于新疆托克逊库米什地区南天山北缘的榆树沟麻粒岩和橄榄岩分别代表早古生代时塔里木板块北部大陆地壳莫霍面附近的下地壳底部与上地幔顶部的岩石, 由于应变的局部化, 被剪切分割成两个透镜状冲断岩片, 顺着切割整个地壳直达上地幔顶部的韧性剪切带被挤出, 最终呈固态挤侵到中地壳内绿片岩-低角闪岩相的变沉积岩(构造片岩、长英质糜棱岩)之中。最后, 两个构造透镜体被剪切叠合到一起。榆树沟麻粒岩-橄榄岩地体为研究塔里木板块北部大陆地壳古莫霍面及其附近的岩石流变学与地球物理性质提供了一个十分难得的研究基地, 因为大陆古莫霍面很少直接出露地表。榆树沟麻粒岩-橄榄岩组合的地体的大地构造意义与蛇绿岩所代表的截然不同。

关键词: 大陆莫霍面; 壳-幔过渡带; 构造挤出体; 麻粒岩-橄榄岩地体; 新疆榆树沟; 天山

中图分类号: P541; P313 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2014)03-0473-022

0 引言

过去中国大陆构造研究存在这样一个有趣的问题: 只要见到一些零星分布的橄榄岩体, 无论其变形与蛇纹石化程度, 统统将其归类于蛇绿岩, 哪怕与之配套的超基性堆晶岩、基性堆晶岩、基性与中性岩浆岩体、基性岩墙群、枕状熔岩、放射虫硅质岩并不共存, 亦不严加追究, 概以“蛇绿岩套遭受严重破坏”或“蛇绿混杂带”论之。一旦承认蛇绿岩带的存在, 这就意味着地质史上曾有过洋盆, 后来经板

块俯冲与陆-陆碰撞彻底地消失了, 零星分布的橄榄岩体所在的位置就是碰撞后两个陆块之间的缝合线。例如, 仅新疆境内就被划分出来 20 余条蛇绿岩带(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 徐向珍等, 2011), 于是就有了大大小小 20 余个古板块以及假说存在于他们之间众多的古海洋, 它们先扩张, 接着俯冲消减, 最后陆-陆碰撞, 这样的故事在众多的文献中反复叙述, 却证据不足。以新疆托克逊库米什榆树沟、铜花山、硫磺山一带出露的橄榄岩体为例, 它一直被作为蛇绿岩(吴文奎等, 1992; 王润三等,

收稿日期: 2014-02-26; 改回日期: 2014-04-19

项目资助: 加拿大自然科学和工程研究基金会以及中国国土资源部“青藏高原东部和东南部岩石圈流变学及地球物理性质研究”项目(编号: 1212011121274)资助。

通信作者简介: 嵇少丞(1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事地球材料流变学、岩石物理和深部构造地质方面的研究。Email: sji@polymtl.ca
王茜(1977-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事岩石物理性质与流变学方面研究。Email: wangqian@gig.ac.cn

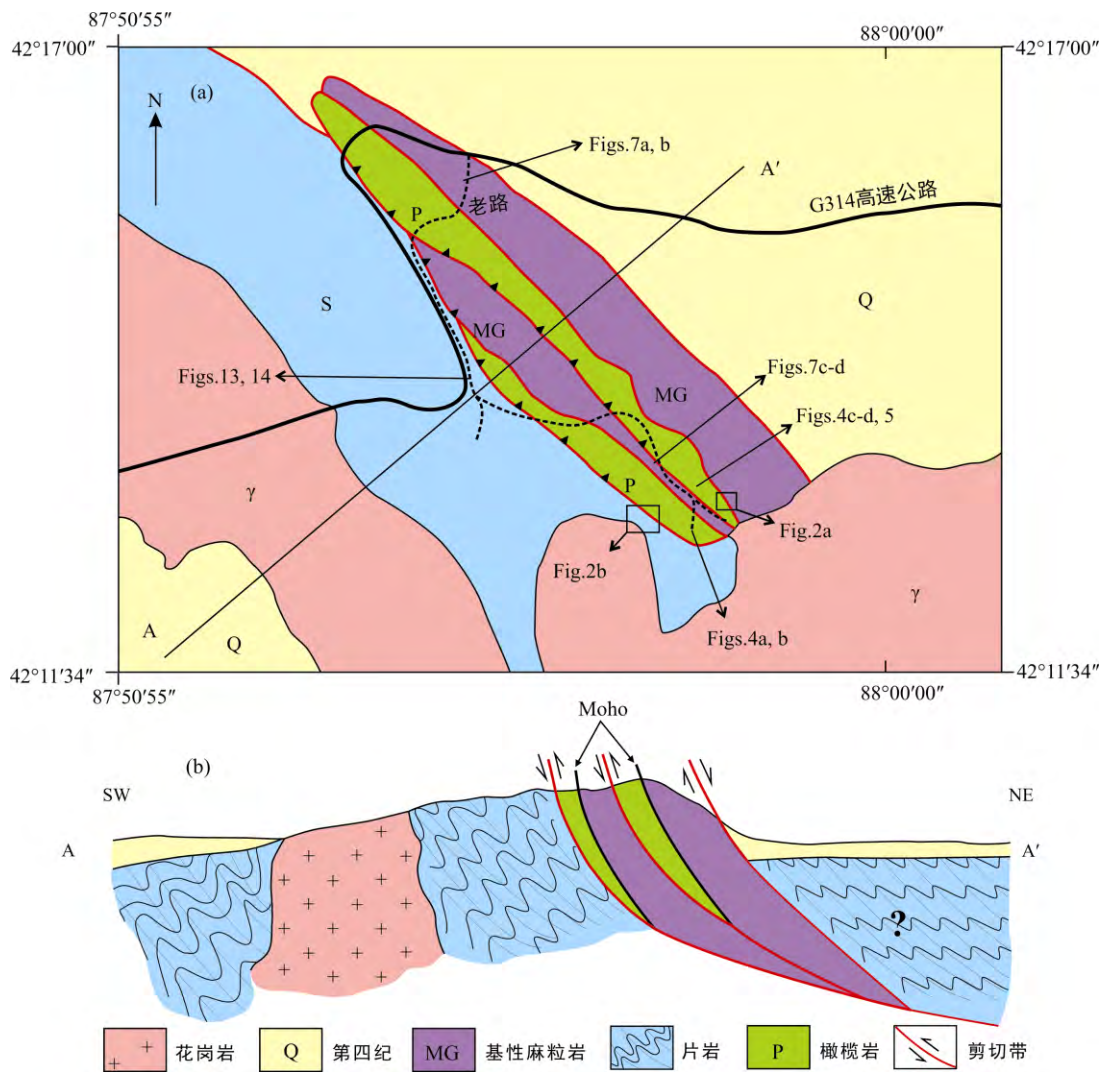
1999a; 马瑞士等, 1990, 1993; 舒良树等, 1996; 徐向珍等, 2011; 杨经绥等, 2011), 据此认为古生代晚奥陶世(~440 Ma)时那里存在过一个叫南天山的相当宽阔的大洋盆(郝杰和刘小汉, 1993; 王润三等, 1999a, b; 何国琦等, 2001)、有限洋盆(王作勋等, 1990; 肖序常等, 1992; 高俊等, 1995; 王学潮等, 1995)或弧后盆地(姜常义和李良辰, 1990; 郭召杰和张志诚, 1993; 高长林等, 1995; Chen et al., 1999; 董云鹏等, 2005), 后来在中志留世(~420 Ma)变成活动大陆边缘的构造环境(肖序常等, 1992; 夏林圻等, 2007), 南天山大洋岩石圈向北面的中天山大陆下面俯冲, 最后在早泥盆世(390~400 Ma)时北面的哈萨克斯坦-准噶尔板块与南面的塔里木板块以及其间的南天山地块在那里碰撞拼接, 形成缝合带(Charvet et al., 2007; 杨经绥等,

2011; 徐向珍等, 2011)。

对于大陆内部的超基性岩体, 除了蛇绿岩成因之外当然还有其他或许更为合理的解释, 例如, 与基性麻粒岩共生的阿尔卑斯型橄榄岩体极可能是作为构造岩片从紧挨着莫霍面附近的上地幔呈固态顺着逆冲剪切带挤侵到中地壳, 然后再抬升至地表, 其大地构造意义与蛇绿岩所代表的截然不同。现以新疆托克逊库米什地区南天山北缘榆树沟麻粒岩-橄榄岩地体(图 1)为例, 阐明上述地质科学问题。

1 榆树沟基性麻粒岩-橄榄岩地体

如图 1 所示, 在新疆托克逊库米什南天山北缘的榆树沟地区, 人们可以看到两个挤侵到绿片岩低



In (a), Q: Quaternary; MG: Mafic granulite; P: Peridotite; S: Schists derived from sediments; γ: granite (279–303 Ma). Tectonic emplacement of granulite-peridotite slices took place as intracrustal compressional uplifts during 380–420 Ma. Locations of the sites studied in detail are indicated.

图 1 新疆托克逊库米什地区南天山北缘榆树沟麻粒岩-橄榄岩地体略图(a)和解释的构造剖面图(b)

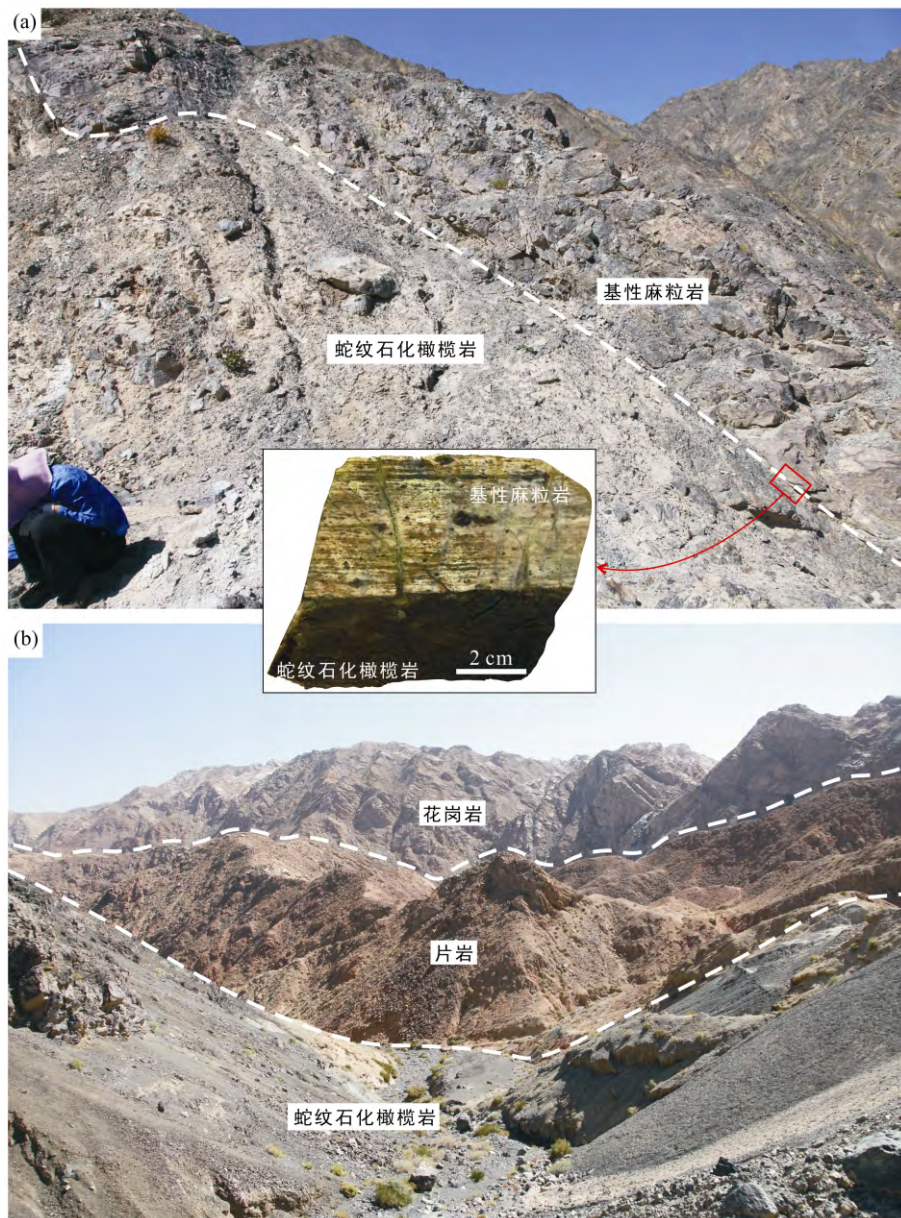
Fig.1 Geological sketch map (a) and interpreted cross-section (b) of the granulite-peridotite terrain in the Yushugou Massif at the northern margin of the south Tianshan orogenic belt, Xinjiang

角闪岩相中地壳的变沉积岩之中、来自大陆莫霍面附近的构造岩片或透镜体, 从南到北, 依次出露绿片岩-低角闪岩相构造片岩、橄榄岩、基性麻粒岩、橄榄岩和基性麻粒岩。榆树沟麻粒岩-橄榄岩地体的北侧为库米什中生代断陷盆地(图1), 推测其基底岩石应与该地体南侧的绿片岩-低角闪岩相变沉积岩相同或相似。

1.1 橄榄岩

榆树沟橄榄岩(图2~5)主要是强烈糜棱岩化的

方辉橄榄岩(Ol: $66.3\% \pm 4.9\%$, Opx: $23.1\% \pm 5.6\%$, Cpx: $10.5\% \pm 5.1\%$)和二辉橄榄岩(Ol: $69.2\% \pm 4.5\%$, Opx: $28.3\% \pm 5.2\%$, Cpx: $2.6\% \pm 1.3\%$), 其中还夹有强烈塑性变形的单辉橄榄岩、方辉辉石岩、斜长岩和基性麻粒岩的薄层或透镜体(单层厚度0.5~80 cm)。图3所示的岩性分布与世界上其他地区大陆岩石圈上地幔的岩性分布相似(例如, Peslier et al., 2002; Bodinier and Godard, 2014)。榆树沟橄榄岩中, 橄榄



(a) 蛇纹石化橄榄岩与基性麻粒岩的接触界线, 镜头朝向NW; (b) 绿片岩-低角闪岩相变沉积岩在北面与蛇纹石化橄榄岩成构造接触关系, 在其南面与石炭纪-二叠纪的花岗岩(279~303 Ma)呈岩浆侵入接触关系, 镜头朝向SW。

(a) The boundary between the serpentized peridotite and mafic granulite. View to the northwest; (b) The greenschist-lower amphibolite-facies metasediment unit overthrust by the serpentized peridotite unit in the north and intruded by the granitic pluton (279~303 Ma) in the south. View to the southwest.

图2 野外观察到的榆树沟地区岩性界线

Fig.2 Field photographs of the Yushugou area showing the lithological contacts

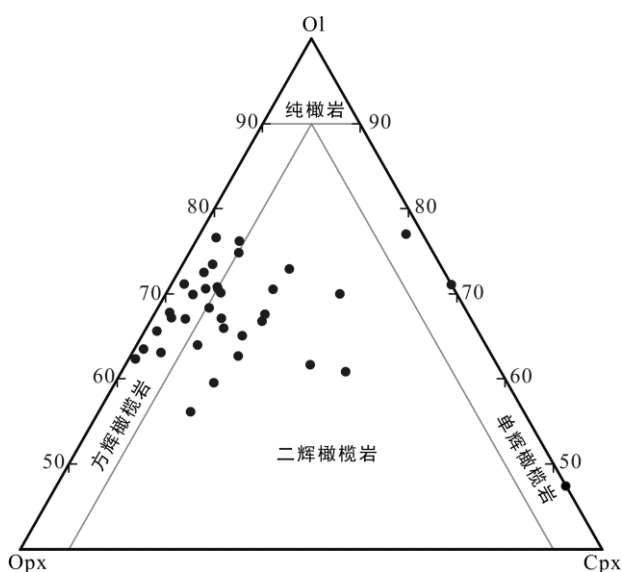
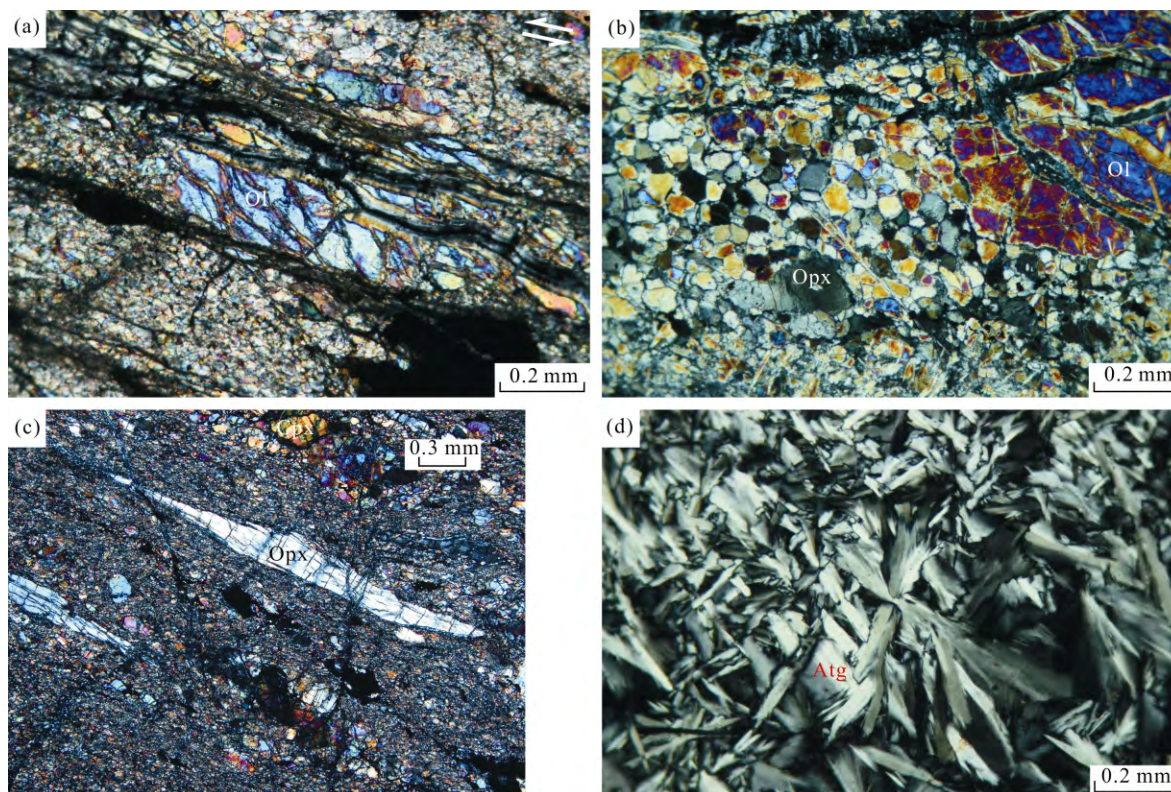


图 3 榆树沟橄榄岩的橄榄石-斜方辉石-单斜辉石体积分数投影(36 块标本, 其中 15 块方辉橄橄榄岩, 18 块二辉橄橄榄岩, 3 块单辉橄橄榄岩)

Fig.3 Modal compositions of the peridotites from the Yushugou Massif (36 samples: 15 harzburgites, 18 lherzolites, and 3 wehrlites)

石的 Fo 介于 89.3~91.5 之间, 平均为 90.4; 斜方辉石, Wo 0.28~1.07, En 88.9~90.2, Fs 9.22~10.5, 属顽火辉石; 单斜辉石, Wo 6.5~48.7, En 44.1~65.1, Fs 2.82~5.33, 属透辉石(徐向珍等, 2011)。榆树沟方辉橄橄榄岩中的尖晶石中, Cr_2O_3 含量介于 14.58%~24.98%, MgO 含量介于 15.39%~18.91%, $\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 比值介于 63.4%~74.6% 之间, $\text{Cr}^\# = \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 比值介于 15.6%~27.9% 之间(徐向珍等, 2011)。上述成分与世界上许多地区碱性玄武岩中大陆地幔岩包体的成分相当(例如, Peslier et al., 2002; Pearson et al., 2005; Bodinier and Godard, 2014)。据王润三等(1999a)与王焰等(1999), 榆树沟橄榄岩的矿物平衡温压条件为 1060 °C 和 1.76 GPa, 更精确的温压估算有待进一步研究。

如图 1 所示, 橄橄榄岩主要有两层, 每层平均厚度约 800 m, 最大厚度达 1.2 km; 南边的橄橄榄岩层长约 8 km, 北边的橄橄榄岩层长约 14 km。这两层橄橄榄岩在岩性上没有明显差别, 其主要组成矿物橄橄榄石、斜方辉石和单斜辉石皆发生了强烈的晶质塑性



(a) 橄橄榄石残斑的非对称性指示上盘向 SW 方向逆冲; (b) 橄橄榄石的重结晶作用形成的残斑(右边)和其周围细小的新颗粒; (c) 由细小的橄橄榄石和辉石重结晶新颗粒组成的复合基质包围的斜方辉石条带状晶体; (d) 叶蛇纹石的 X 状晶体穿插结构。

(a) Asymmetry of the olivine porphyroclasts indicating a top-to-SW thrusting; (b) A large olivine porphyroclast(right)recrystallized into a band of fine-grained neograins; (c) Elongated orthopyroxene porphyroclasts embedded in a completely recrystallized fine-grained olivine-pyroxene composite matrix suffered strong plastic deformation; (d) X-shaped interpenetrating texture observed in the weakly deformed antigorite serpentinite. Ol: olivine; Opx: orthopyroxene; Cpx: clinopyroxene; Atg: Antigorite.

图 4 橄橄榄糜棱岩(a-b)、超糜棱岩(c)及其退变作用形成的叶蛇纹岩(d)

Fig.4 Photomicrographs of the peridotitic mylonite (a-b), the ultramylonite (c) and the antigorite serpentinite (d)

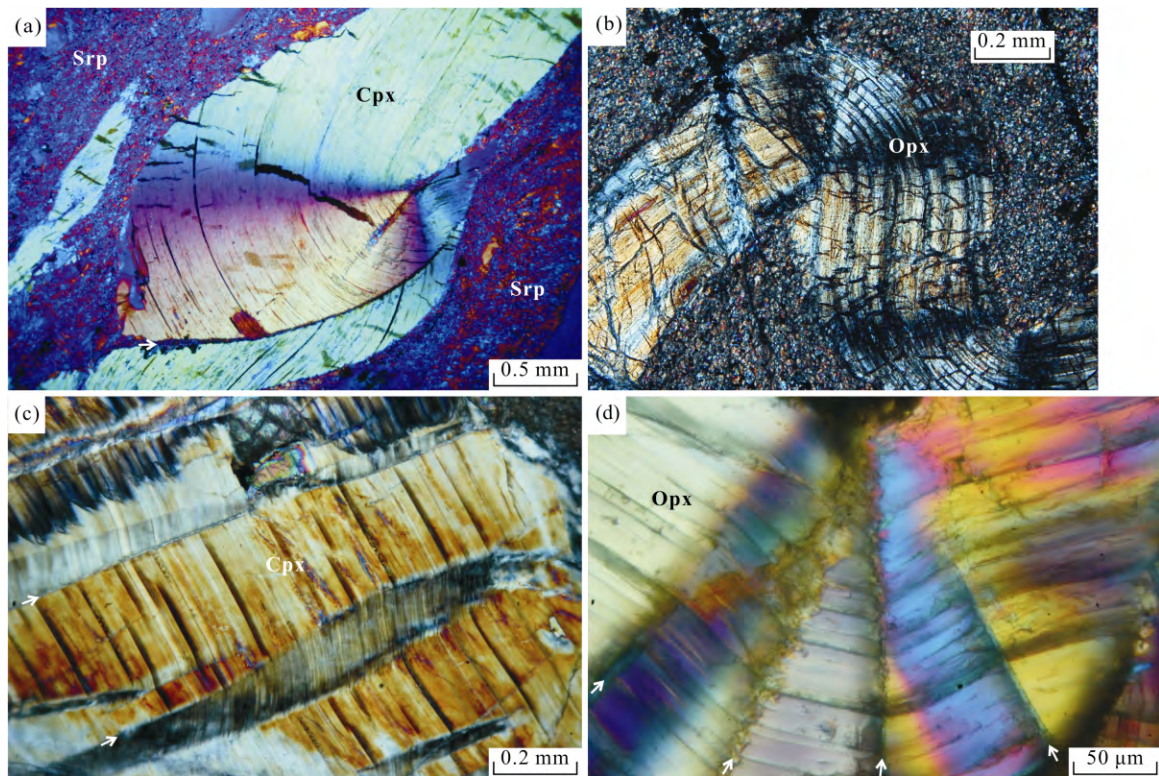


图5 榆树沟橄榄糜棱岩中辉石发生位错蠕变的显微光学证据: 波状消光、晶格旋转(褶皱)和膝折(正交偏光, 其中图 a, c-d 加了石膏试板。箭头指示膝折带边界)

Fig.5 Optical evidence for dislocation creep of pyroxenes in the peridotitic mylonites from the Yushugou Massif: undulatory extinction, lattice rotation (folding) and kinks (All images viewed in cross-polarized light, but with gypsum λ plate inserted for (a) and (c-d). Kink band boundary indicated by arrow)

变形, 形成残斑-重结晶新颗粒基质的糜棱结构和晶粒形状优选定向——构造面理与拉伸线理(图 4a-c)。构造面理向 NE 方向呈中等角度倾斜, 线理与面理走向呈高角度相交或近乎垂直。这些面理是构造剪切的变形结果, 而不是原生的层状构造。过去的学者把上述面理当作原生的、大洋火山岩的沉积层理或火成堆晶层理, 并进行所谓的沉积层序的韵律分析。事实上, 任何原生的层理早就在递进的剪切变形过程中被旋转、改造、置换, 现今地表露头上观察到的面理是早期塑性变形再叠加后期折返过程中形变的结果。

榆树沟橄榄糜棱岩中, 斜方辉石与单斜辉石被压扁拉长成条带(带鱼)状(图 4c), 在 XZ 切面上长宽比可高达 50:1, (100)面与面理(XY)呈非常小的角度, [001] 平行或近乎平行于拉伸线理(X), 指示这些辉石的位错蠕变主要利用(100)[001] 滑移体系(Ji et al., 1994; Ji, 2013; Saruwatari et al., 2001; Toy et al., 2010; Ohuchi et al., 2011; Frets et al., 2012)。那些(100)面或[001]方向原先与面理或线理呈高角度相交的辉石颗粒的变形特征主要是发生强烈的晶格旋转、形

成单晶褶皱或膝折(图 5), 通过晶格的旋转使得(100)[001]体系在外加构造应力场中增加剪切分量, 使之适宜滑移, 积累应变。榆树沟橄榄岩中橄榄石的变形特征主要是晶格扭曲(波状消光)、亚颗粒与亚晶界、以及围绕残斑边界重结晶形成细小的近等轴状新颗粒, 形成核-幔构造(图 4a-c)。上述显微构造表明, 橄榄石残斑的变形机制主要是位错蠕变, 而其恢复机制既有位错攀移(Climb)与交叉滑移(Cross slip), 又有颗粒边界迁移的动态重结晶作用。作者在日本静岡大学地球科学实验室对一块方辉橄榄糜棱岩标本(样号 YSG26-10, 含 71% Ol, 25% Opx, 4% Cpx)进行了电子背散射衍射(EBSD, Electron Backscattering Diffraction)组构测量, 橄榄石与斜方辉石的[100]、[010]和[001]以及单斜辉石的(100)、(010)和[001]的优选定向等值线施密特网下半球投影绘于图 6。总体来说, 上述三种主要矿物的组构强度都不大, pJ 系数皆 <1.5 。尽管岩石中橄榄石的体积含量比斜方辉石高得多, 但是, 斜方辉石的组构强度比单斜辉石特别是橄榄石的组构强度要高, 说明经受动态重结晶的橄榄石细颗粒与重结晶的辉石细颗

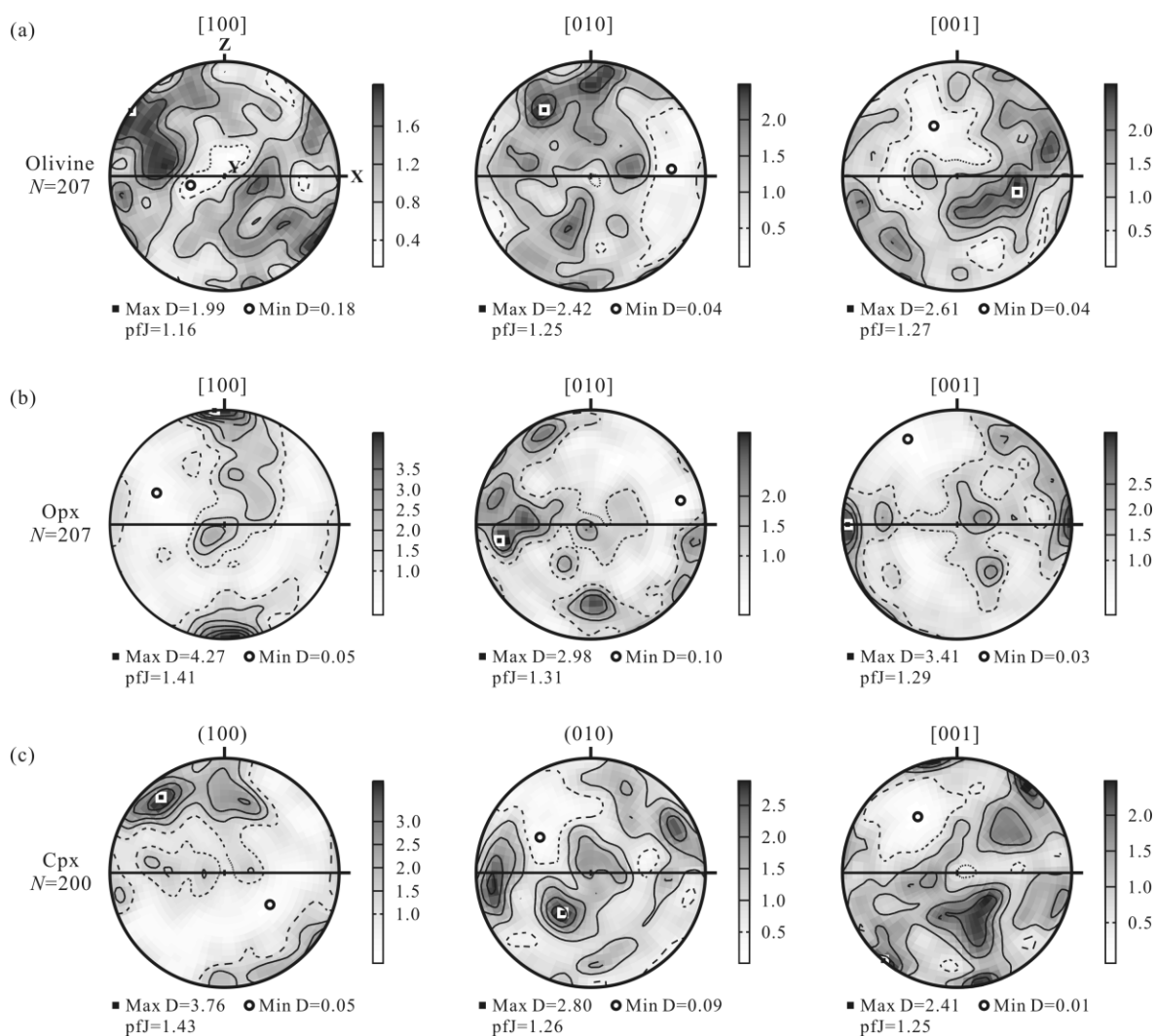


图 6 利用 EBSD 技术测量的榆树沟方辉橄榄岩 (标本号 YSG26-10) 的三种主要造岩矿物——橄榄石(a)、斜方辉石(b)和单斜辉石(c)的晶格优选方位图(等面积下半球投影, N 为测量颗粒数)

Fig.6 CPO (Crystallographic preferred orientation) figures for a harzburgite sample (YSG26-10) from the Yushugou Massif, measured using EBSD (Electron Backscattering Diffraction) techniques (Equal-area lower hemisphere projections. N : Measurements)

粒重新混合而成的细粒多晶集合体之中, 颗粒边界扩散与滑移大大减弱了重结晶作用发生之前地幔岩内由晶内位错滑移形成的强组构(例如, Skemer and Karato, 2008; Sundberg and Cooper, 2008; Ohuchi et al., 2012)。尽管如此, 原先的组构样式仍依稀可见(图 6), 斜方辉石与单斜辉石的滑移系主要为(100)[001], 次要为(100)[010], 造成辉石的[001][010]方向平行或近乎平行于拉张线理(X), 而(100)面平行或近乎平行于挤压面理(XY 面)。橄榄石的滑移系主要为(010)[100], 形成[100]与拉张线理(X)成小角度相交, 而(010)的法线方向靠近面理的法线(Z)方向。图 6 所示的矿物组构样式与世界上其他地区大陆岩石圈地幔岩石(Ji et al., 1996; Frets et al., 2012)

或由玄武岩浆携带至地表的地幔岩包体的测量结果非常吻合(Ji et al., 1994; Saruwatari et al., 2001), 表明两者形成于相似的温压条件。

在橄榄糜棱岩和超糜棱岩中, 偶见基性麻粒岩薄层、透镜体或布丁, 厚度几毫米到几十厘米不等, 同样也发生了强烈的韧性变形。上述的基性麻粒岩与橄榄岩互层构造说明其来源于莫霍面附近的壳-幔过渡带, 也说明莫霍面与壳-幔过渡带是一个应变强烈集中的韧性剪切带, 而且基性麻粒岩似乎与细颗粒橄榄超糜棱岩具有类似的流变强度。超糜棱岩中的橄榄石重结晶的粒度很小, 只有 5~20 μm , 晶格优选定向(CPO)的强度明显减弱(图 6), 说明主要变形机制由原先的位错蠕变转变为颗粒边界扩散

与滑移的超塑性机制。在折返过程中, 橄欖糜棱岩先遭受了高温叶蛇纹石化(300~600 °C, 图 4d), 然后在温度降至<300 °C之后再发生低温的利蛇纹石化和纤蛇纹石化, 这才有了当地开采的石棉矿。未变形或弱变形的叶蛇纹石发育典型的十字架或 X形晶体穿插结构(Ji et al., 2013; Shao et al., 2014; 王茜等, 2014)。没有任何显微构造证据证明榆树沟橄欖岩体是先经受进变质的深俯冲作用, 然后再折回地表, 伴之退变质作用的蛇绿岩(王润三等, 1999a, b, 2003)。杨经绥等(2011)和徐向珍等(2011)认为榆树沟橄欖岩体是从未经受进变质深俯冲的蛇绿岩, 但是解释不了该地区橄欖岩与基性麻粒岩共生的地质关系以及高温叶蛇纹石的成因。所以, 基于已有的数据, 我们认为最合理的解释就是, 榆树沟橄欖岩片本来就不是蛇绿岩的一部分, 而是来自于中天山地块大陆莫霍面之下的上地幔, 与其上覆的下地壳基性与中性麻粒岩一起作为构造岩片, 沿着逆冲剪切带被挤侵到绿片岩-低角闪岩相的中地壳, 然后再抬升至地表, 所以整个岩片仅遭受退变质作用。

1.2 基性与中基性麻粒岩

如图 1 所示, 与榆树沟橄欖岩互层出现的是高压变质、韧性变形的麻粒岩(图 7)。根据共生矿物组合可将这种麻粒岩分为三类, 第一类是含石榴子石的斜长二辉麻粒岩或斜长单斜辉石麻粒岩, 原岩可能为变泥岩或与泥岩互层的玄武岩, 含 55.4%±8.1%斜长石(An 65.2±8.2), 26.5%±10.5%单斜辉石, 9.3%±6.4%斜方辉石, 5.0%±3.5%石榴子石(Alm 52.40±3.62, Pyr 34.81±4.68; Gro 6.87±3.93; And 4.06±2.35, Spe 1.47±0.5, Uva 0.42±0.31)和 3.5%±1.3%不透明矿物(图 8)。第二类是不含石榴子石的斜长二辉麻粒岩、斜长单斜辉石麻粒岩或变形斜长岩, 原岩为辉长岩或斜长岩类的基性岩石, 含 62.2%±6.6%斜长石(An 67.0±12.0), 15.7%±5.5%单斜辉石, 19.7%±4.1%斜方辉石和 2.2%±1.5%不透明矿物(图 8)。上述两类麻粒岩皆不含石英。斜方辉石主要为紫苏辉石, 单斜辉石主要为透辉石, 不透明矿物主要为磁铁矿和钛铁矿。造岩矿物之间存在较为明显的流变强度的差异(图 7), 斜方辉石和单斜辉石往往构成残斑、而斜长石被强烈地压扁拉长、并

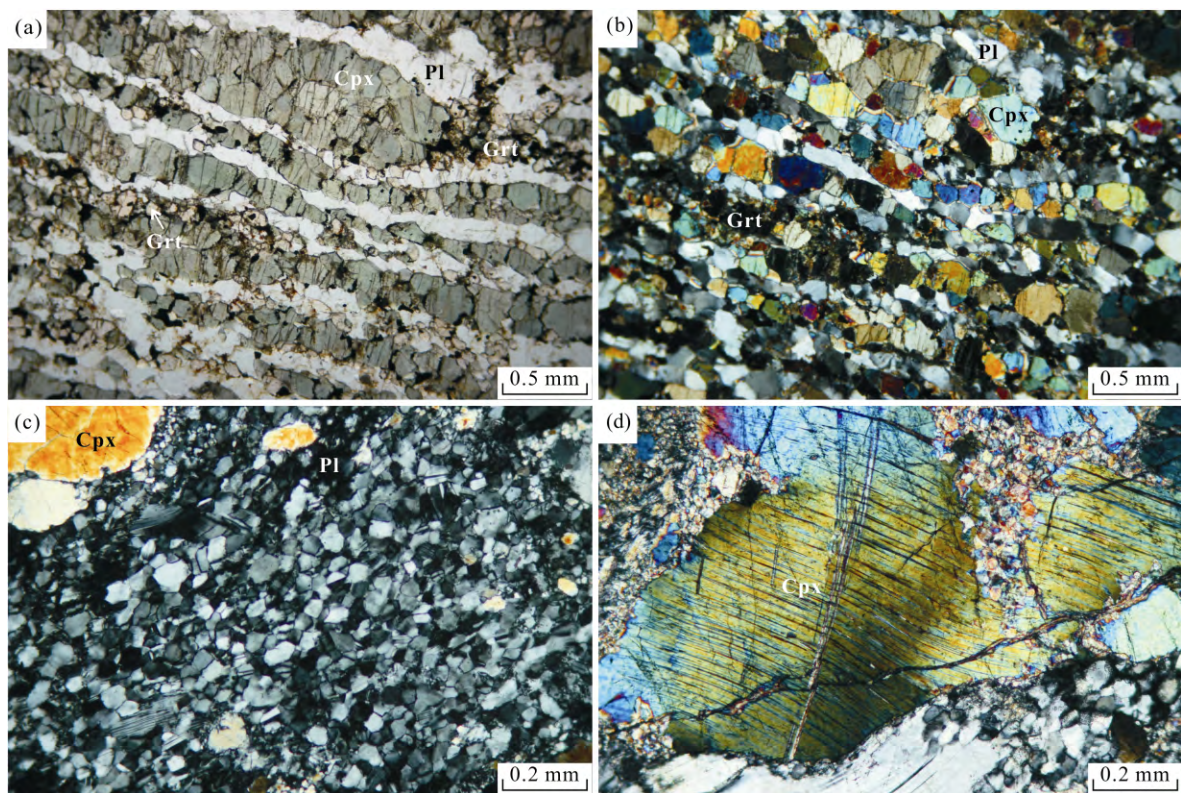


图 7 含石榴子石(a, 单偏光; b, 正交偏光)与不含石榴子石(c-d, 正交偏光)基性麻粒岩的典型显微构造(例如, 面理、成分层、斜长石与单斜辉石的晶格旋转与重结晶作用等)

Fig.7 Typical microstructures (e.g., foliation, compositional banding, recrystallization, and lattice rotation) for the garnet-bearing (a, plane polarized light; b, crossed nicols) and garnet-free (c-d, crossed nicols) mafic granulites

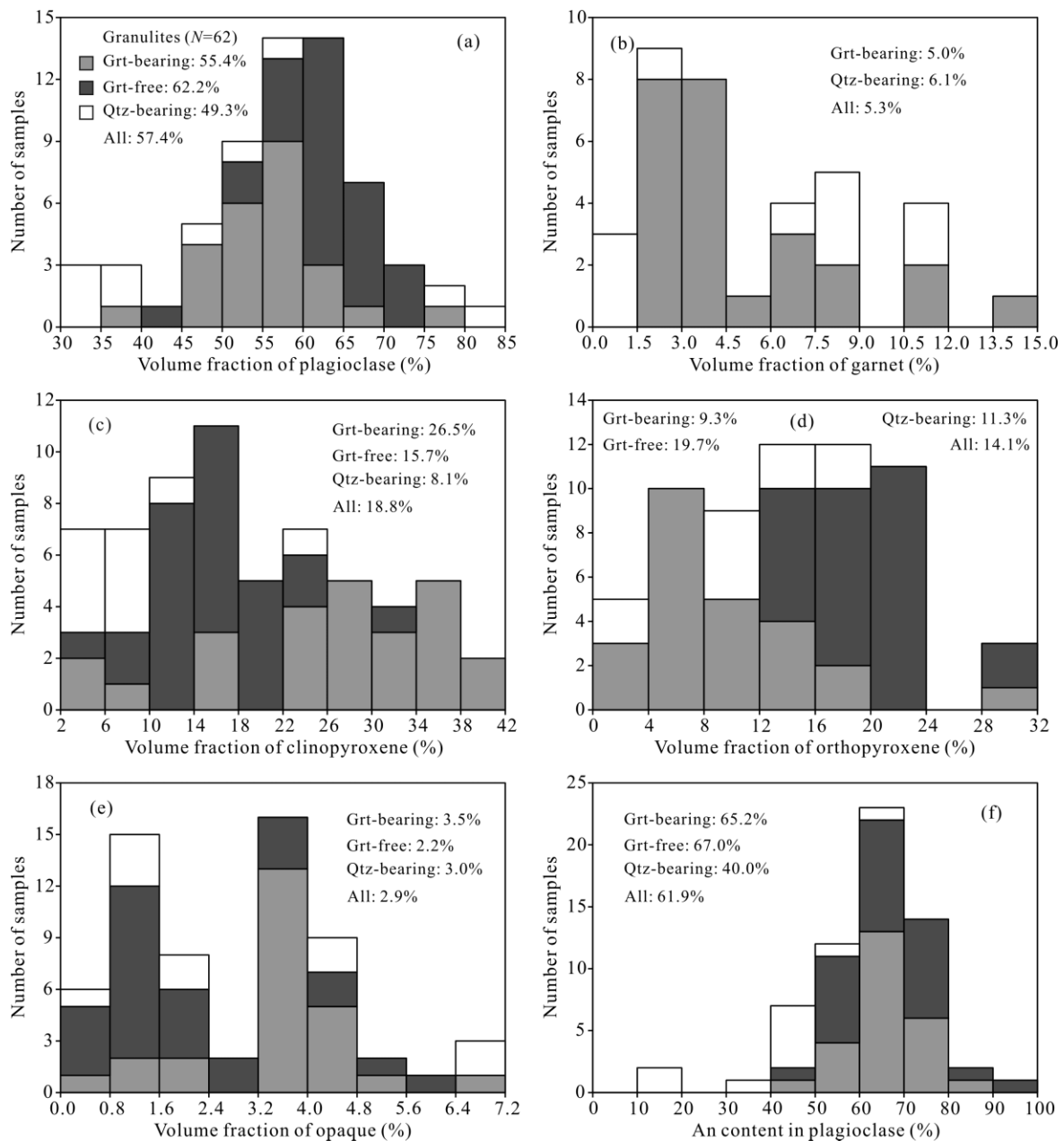


图 8 榆树沟含与不含石榴子石基性麻粒岩以及含石英中性麻粒岩中斜长石(a)、石榴子石(b)、单斜辉石(c)、斜方辉石(d)、不透明矿物(e)以及斜长石中 An(%)含量的分布直方图(f)

Fig.8 Histograms for the volume fractions of plagioclase (a), garnet (b), clinopyroxene (c), orthopyroxene (d) and opaque minerals (e) as well as for the anorthite content of plagioclase (f) in the garnet-bearing and garnet-free mafic granulites and quartz-bearing intermediate granulites from the Yushugou Massif

且发生晶格扭曲、旋转或膝折,动态重结晶作用基本上都是从颗粒的高应变区如颗粒边界、膝折带边界,最大晶格扭曲处开始(Ji and Mainprice, 1988; 1990; Ji et al., 1988, 1993),重结晶基质粒度很小,仅为 20~50 μm 。斜长石、斜方辉石和单斜辉石的重结晶细颗粒构成流动基质,发育显著的构造面理与线理,形成成分相间的薄层构造(图 7a-b)。王居里等(1999)比较了基性麻粒岩中斜方辉石、单斜辉石和斜

长石的残斑与重结晶新颗粒的化学成分,发现两者之间几乎没有差别,表明这些基性麻粒岩塑性变形过程中,较高的温压条件足以维持化学成分的平衡,而且水活度很低,其变形环境应为脱水后的下地壳。采用 Grt-Cpx-Pl-Qtz 温压计(Newton and Perkins, 1982)估算峰期温压条件为 800~960 和 0.97~1.42 GPa(王润三等, 1999a),对应于 20 ± 2 /km 的地热梯度,而在大洋俯冲带内地热梯度还不到 10 /km

(Liou et al., 1998)。所以, 榆树沟的基性麻粒岩不可能是形成于俯冲带(王润三等, 1999a, 2003; 王居里等, 1999; 王焰等, 1999; 董云鹏等, 2001), 而最可能来自大陆莫霍面附近的下地壳。在先前的文献中, 也有学者将上述两类基性麻粒岩描述成榴辉岩的(高长林等, 1995; 刘斌和钱一雄, 2003)。然后, 在 $T=743\pm 33$ 和 $P=720\pm 85$ MPa(对应于深度 26 ± 3 km 和地热梯度 28 ± 2 /km)的温压条件下, 麻粒岩过渡到高级角闪岩相(李天福等, 2011), 角闪岩相退变质作用主要发生在温压条件为 $640\sim 790$ 和 $640\sim 890$ MPa 的区间(对应于 $23\sim 32$ km 深度和 $24\sim 27$ /km 的地热梯度)(王焰等, 1999), 角闪石(主要为钙闪石与钠钙闪石)既作为辉石的退变质产物, 呈细颗粒围绕辉石残斑周围分布, 亦可作为 $Gt+Cpx+Pl_1+H_2O \rightarrow Amp+Pl_2$ 变质反应的产物, 后者呈不连续的条带状分布。

第三类是含石英和石榴子石的中性麻粒岩或片麻岩, SiO_2 含量介于 $54.61\%\sim 62.49\%$ 之间, 平均值为 58.13% (图 9), 原岩可能为含沉积岩(泥岩、杂砂岩)夹层的基性火山岩(王润三等, 1997)或中性岩浆岩与变质岩。这类中性麻粒岩中, 不仅斜长石、石英、辉石发生了塑性变形, 而且连石榴子石(Alm 48~49, Prp 16~17, Grs 21~32, Sps 1~2)也发生了少量塑性变形, 压扁拉长至透镜状, 甚至发生褶曲拖尾, 其非对称性指示剪切旋向(Ji and Martignole, 1994; 王居里等, 1999; Shu et al., 2004); 石榴子石晶内发育位错壁(杨帆等, 2009), 说明位错发生了攀移等恢复作用。上述显微构造特征表明峰期变形发生在大陆下地壳的深部(温度 ~ 813 , 杨帆等, 2009), 因为中上地壳的温度与压力不足以使石榴子石发生塑性变形与位错恢复(Ji and Martignole, 1994; Wang and Ji, 1999, 2000)。韧性变形的石榴子石及其所在麻粒岩还遭受了角闪岩相退变质作用, 后者发生的温压条件为 $640\sim 755$ 和 $810\sim 870$ MPa(王焰等, 1999), 对应的深度为 $30\sim 32$ km 和地热梯度 $22\sim 24$ /km。由石英亚颗粒动态重结晶颗粒大小估算的古应力约为 $150\sim 160$ MPa(杨帆等, 2009), 此值应对应于折返过程中中性麻粒岩的流动强度。此外, 石榴子石中还发育与构造抬升有关的垂直于拉张线理的张破裂(Ji et al., 1997)。

如图 9 所示, 含石英的中性麻粒岩以 SiO_2 含量高于 54% 为特征, 而基性麻粒岩, 无论含不含石榴子石, 其 SiO_2 含量皆在 45% 到 53% 之间。含石榴子石基性麻粒岩与不含石榴子石麻粒岩的最显著的区别

别在于其 MgO 的含量(图 9a), 前者 MgO 含量低于 8% , 而后者 MgO 含量高于 8% 。含石榴子石与不含石榴子石基性麻粒岩的平均 MgO 含量分别为 6.60% (25 个标本)和 10.82% (28 个标本)。在 SiO_2 - MgO 含量投图上(图 9a), 不含石榴子石的基性麻粒岩与含石英的中性麻粒岩数据点构成 MgO 含量随 SiO_2 增加而逐渐减小的整体趋势, 而含石榴子石基性麻粒岩明显地偏离上述趋势, 落在趋势线之下。与不含石榴子石基性麻粒岩相比, 含石榴子石麻粒岩明显地含更多的 $FeO+Fe_2O_3$ 和更低的 $Mg^\#$ ($Mg^\#=100\times Mg/(Mg+Fe)$)(图 9c)。此外, 上述三种麻粒岩的综合数据也表现出 CaO 含量随 SiO_2 含量增加而逐渐降低的趋势(图 9d)。

通过图 9, 我们还将新疆榆树沟麻粒岩构造岩片的平均化学成分与全球下地壳(Rudnick and Fountain, 1995)、下地壳包体(Rudnick and Taylor, 1987; Condie and Silverstone, 1999; Downes, 1993)、高压麻粒岩地体(Rudnick and Presper, 1990)的平均化学成分进行了对比。比较发现, 榆树沟麻粒岩的平均化学成分($50.17\% SiO_2$, $1.18\% TiO_2$, $16.49\% A_2O_3$, $9.62\% (FeO+Fe_2O_3)$, $0.18\% MnO$, $8.30\% MgO$, $11.27\% CaO$, $2.29\% Na_2O$, $0.37\% K_2O$, $0.12\% P_2O_5$)与 Rudnick and Fountain (1995)总结概括的全球下地壳成分模式($53.40\% SiO_2$, $0.82\% TiO_2$, $16.90\% A_2O_3$, $8.57\% (FeO+Fe_2O_3)$, $0.10\% MnO$, $7.24\% MgO$, $9.59\% CaO$, $2.65\% Na_2O$, $0.61\% K_2O$, $0.10\% P_2O_5$)非常接近, 虽然前者更基性一些, 这是因为榆树沟麻粒岩构造岩片来自紧挨着莫霍面的下地壳底部, 而 Rudnick and Fountain (1995)的数据却是 $25\sim 40$ km 深度范围内下地壳成分的总平均值, 即使在下地壳之内, 基性成分往往随深度呈增加趋势。此外, 榆树沟麻粒岩构造岩片似乎比由火山岩带到地表的麻粒岩包体(Rudnick and Taylor, 1987; Condie and Silverstone, 1999)更能代表靠近莫霍面的下地壳底部的化学成分, 因为岩浆对围岩包体的挟持与携运必然具有一定的选择性, 包体在岩浆中不可避免会遭受一定程度的溶解与分解, 包体与岩浆之间也会发生成分交换与化学反应(Ji et al., 1994)。还有, 那些现今直接暴露地表的麻粒岩地体大多位于前寒武纪的克拉通, 其下地壳比起古生代的碰撞造山带的下地壳含有较少的基性成分(Griffin and O'Reilly, 1987)。例如, 加拿大地盾上的 Kapuskasing 下地壳剖面(Shaw et al., 1994), 其化学成分较新疆榆树沟麻粒岩成分更偏中性, 含 $58.3\% SiO_2$, $0.65\% TiO_2$, $17.4\% A_2O_3$, $7.09\% (FeO+Fe_2O_3)$, $0.12\% MnO$, $4.36\% MgO$, $7.68\% CaO$,

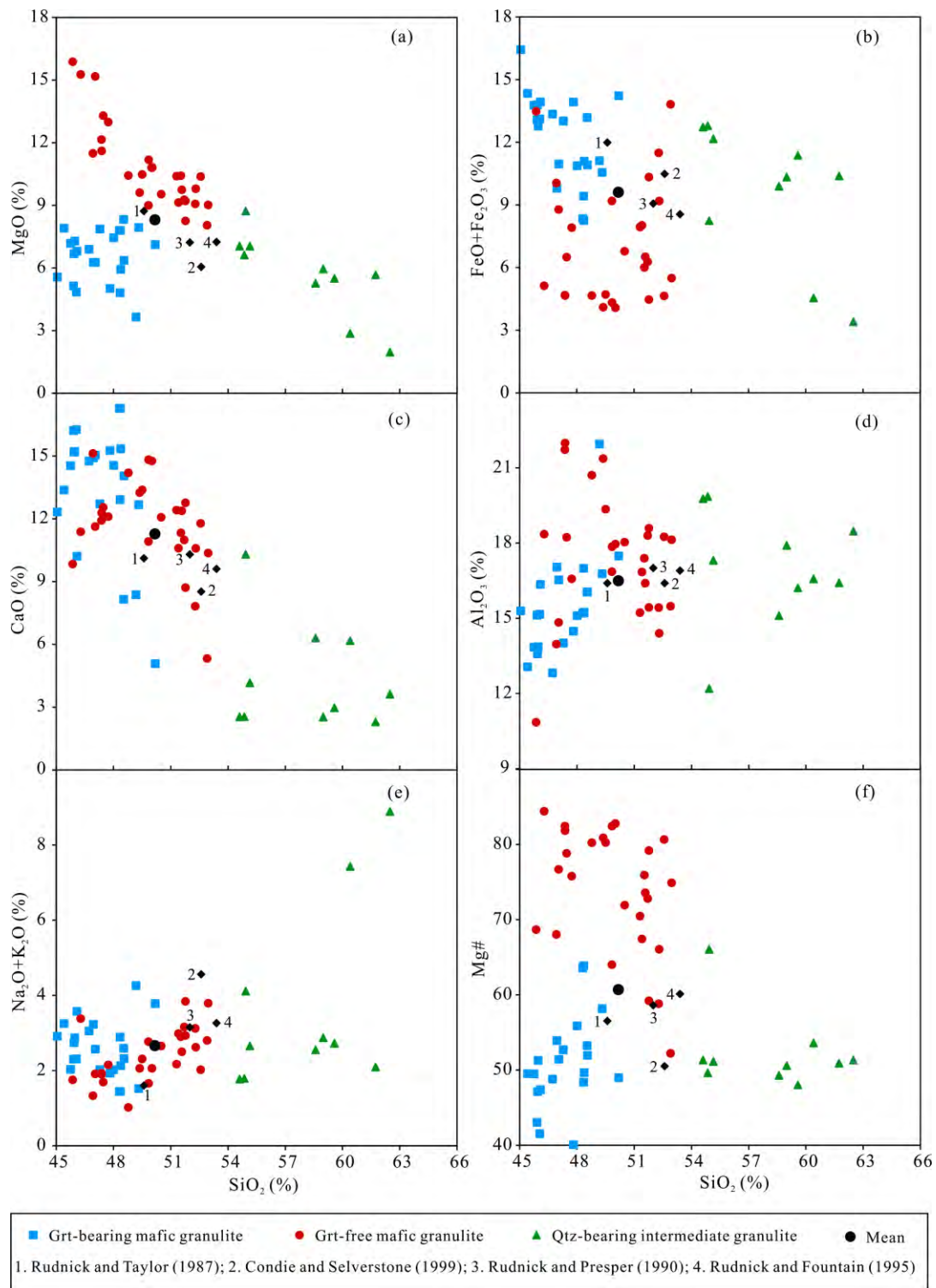


图 9 榆树沟三种类型麻粒岩化学成分的比较(蓝色方块: 含石榴子石的基性麻粒岩; 红色圆圈: 不含石榴子石的基性麻粒岩; 绿色三角: 含石英的中性麻粒岩; 黑色圆圈: 榆树沟麻粒岩的平均成分; 黑色菱形方块: 四组不同作者 1. Rudnick and Taulor, 1987; 2. Condie and Selverstone, 1999; 3. Rudnick and Presper, 1990; 4. Rudnick and Fountain, 1995)建议的下地壳模式成分)

Fig.9 Variations of MgO (a), $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (b), CaO (c), Al_2O_3 (d), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (e) and Mg# (f) versus SiO_2 contents for three types of granulites from the Yushugou Massif (Blue squares: Garnet-bearing mafic granulite; Red dots: Garnet-free mafic granulite; Green triangles: Quartz-bearing intermediate granulite; Black dot: Average composition of all the granulites from the Yushugou Massif; Black diamonds: Model compositions of the continental lower crust proposed by 1. Rudnick and Taulor, 1987; 2. Condie and Selverstone, 1999; 3. Rudnick and Presper, 1990; 4. Rudnick and Fountain, 1995)

2.7% Na₂O, 1.47% K₂O, 0.24% P₂O₅, 因为 Kapuskasing 剖面的角闪岩相变质岩(主要是英云闪长岩及其片麻岩、基性片麻岩和花岗片麻岩)来源于大约 20~30 km 深度(600~850 MPa), 其下还有约 20 km 厚度(30~50 km 深度)的麻粒岩相下地壳(以基性麻粒岩为主, 辅以副片麻岩和斜长岩)尚没有抬露地表(Percival et al., 1992; Moser and Heaman, 1997), 总体趋势是, 越向下基性成分越多。基于同样的原因, 苏格兰太古宙 Lewisian 杂岩中 Sourian 麻粒岩的成分亦明显地偏中性: 62.9% SiO₂, 0.50% TiO₂, 16.0% Al₂O₃, 5.4% (FeO+Fe₂O₃), 0.08% MnO, 3.50% MgO, 5.80% CaO, 4.50% Na₂O, 1.0% K₂O, 0.19% P₂O₅ (Weaver and Tarney, 1984)。南非 Kaapvaal 克拉通 (~2.7 Ga) 来自深度 >30 km 的下地壳的岩石包体多为变质泥岩等超高温麻粒岩, 而缺少基性麻粒岩 (Schmitz and Bowring, 2003), 而且该地区下地壳的 P 波速度亦相对较低(6.5~6.7 km/s, Durrheim and Green, 1992), 目前流行的说法是, 原先的基性下地壳已经转变成密度大的榴辉岩折沉到地幔之中(Kay and Kay, 1993; Niu and James, 2002; 嵇少丞等, 2008)。类似的现象或过程还出现在澳大利亚西部的 Yilgarn 克拉通(Drummond, 1988)和中国华北克拉通(张旗等, 2006; 路孝平等, 2004)。但是, 榆树沟麻粒岩的岩性资料与北美洲的 Wyoming 克拉通(Gorman et al., 2002)和北欧 Baltic 地盾(Luosto and Korhonen, 1986; Luosto et al., 1990)的下地壳成分数据相吻合, 亦与由全球大陆下地壳(25~40 km 深度)地震波速反演得到的岩性数据(Christensen and Mooney, 1995)相吻合(7% 英云闪长片麻岩, 93% 基性岩, 包括角闪岩、含石榴子石或不含石榴子石的基性麻粒岩), 说明至少在志留纪-泥盆纪时新疆中天山南缘下地壳以基性岩石为主, 尚没有发生显著的折沉作用。

我们理论计算了榆树沟三类麻粒岩在无蚀变、无空隙、无裂隙理想状态下的地震波性质(表 1, 图 10、11)。造岩矿物的多晶集合体的弹性系数取自 Ji et al. (2002, Table 1.1, p32)。含石榴子石与不含石榴子石麻粒岩的密度(ρ)分别为 $3.036 \pm 0.059 \text{ g/cm}^3$ 和 $2.956 \pm 0.054 \text{ g/cm}^3$ (图 10)。含石榴子石与不含石榴子石麻粒岩的 V_p 分别为 $7.091 \pm 0.127 \text{ km/s}$ 和 $6.934 \pm 0.067 \text{ km/s}$ (图 11), 介于全球大陆下地壳 V_p 的变化范围之内(6.9~7.2 km/s, 经温度与压力校定, Christensen and Mooney, 1995; Carbonell et al., 2013; Rabbell et al., 2013; Wang et al., 2013), 亦说明从全球范围地震波速测量值的统计结果来看, 大陆下地壳的岩性应该相当于新疆榆树沟的基性麻粒岩。含石英的中性麻粒岩, $\rho = 2.926 \pm 0.113 \text{ g/cm}^3$, $V_p = 6.753 \pm 0.143 \text{ km/s}$, $V_s = 3.942 \pm 0.144 \text{ km/s}$, $V_p/V_s = 1.715 \pm 0.069$, 对应的泊松比 $\nu = 0.240 \pm 0.030$, 这样的中性麻粒岩在榆树沟高压变质岩片中的比例 <5%, 在全球大陆下地壳中的平均体积分数亦不应高于 5%~10%。 $V_p = 6.7 \sim 6.8 \text{ km/s}$ 的大陆下地壳仅出现在个别地区, 例如, 南非的 Kaapvaal 克拉通(Durrheim and Green, 1992; Niu and James, 2002)、澳大利亚的 Yilgarn 克拉通(Drummond, 1988)和中国华北克拉通(Gao et al., 1998), 这些地区的下地壳内长英质和中性麻粒岩的体积含量可能高达 40%~50%, 原因是原先的基性岩石已经转变成榴辉岩折沉到地幔之中。

周鼎武等(2004)和李天福等(2011)采用 SHRIMP 方法研究了榆树沟基性麻粒岩中锆石核部与幔部的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。另外, 杨经绥等(2011)测量的榆树沟变形斜长岩(样品号 07Y759)和变质辉长岩(样品号 07Y773)亦同样属于基性麻粒岩。综合这些作者的锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据, 并对照其阴极发光图, 发现锆石边部的年龄相对集中, 为 380~420 Ma(图 12a), 代表其麻粒岩相峰期变质的时代; 而锆石核

表 1 新疆榆树沟古生代大陆莫霍面上下的下地壳麻粒岩(含与不含石榴子石的基性麻粒岩与含石英的中性麻粒岩)与上地幔橄榄岩(方辉橄榄岩、二辉橄榄岩与单辉橄榄岩)地震波性质

Table 1 Seismic properties of granulites (garnet-bearing and garnet-free mafic granulites and quartz-bearing intermediate granulites) and mantle rocks (lherzolite, harzburgite and wehrlite)

物理性质	下地壳麻粒岩						上地幔橄榄岩					
	Grt-bearing mafic granulites		Grt-free mafic granulites		Qtz-bearing intermediate granulite		Lherzolite		Harzburgite		Wehrlite	
	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.
$\rho(\text{g/cm}^3)$	3.036	0.059	2.956	0.054	2.926	0.113	3.307	0.001	3.308	0.000	3.303	0.004
$V_p(\text{km/s})$	7.091	0.127	6.934	0.067	6.753	0.143	8.215	0.029	8.231	0.026	8.211	0.091
$V_s(\text{km/s})$	3.955	0.086	3.879	0.050	3.942	0.144	4.814	0.016	4.837	0.005	4.753	0.060
V_p/V_s	1.793	0.009	1.788	0.011	1.715	0.069	1.707	0.005	1.702	0.004	1.728	0.003
ν	0.274	0.003	0.272	0.004	0.240	0.030	0.239	0.002	0.236	0.002	0.248	0.001

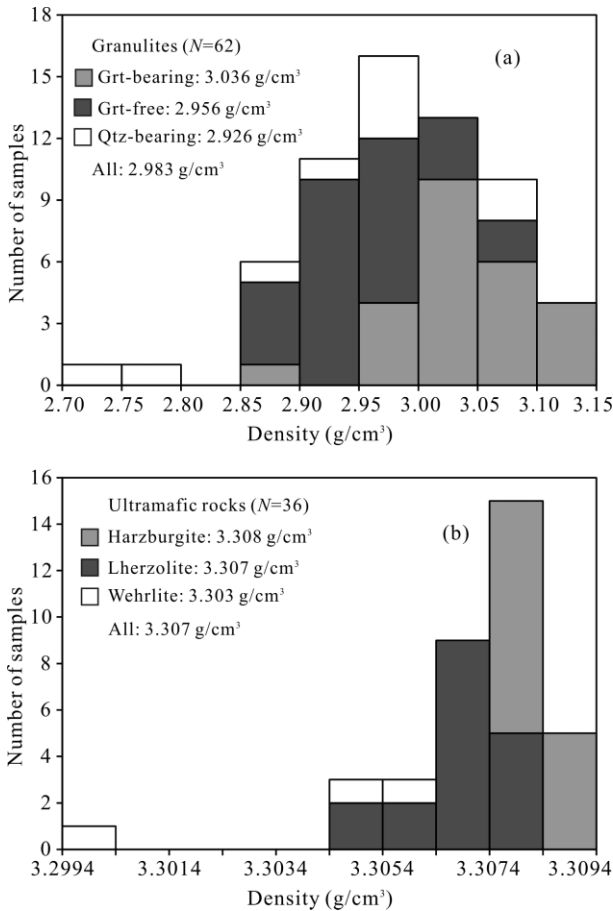


图 10 榆树沟麻粒岩(a, 含与不含石榴子石基性麻粒岩和含石英中性麻粒岩)和橄榄岩(b, 方辉橄榄岩、二辉橄榄岩与单辉橄榄岩)的密度分布直方图

Fig.10 Histograms for the densities of granulites (a, garnet-bearing and garnet-free mafic granulites and quartz-bearing intermediate granulite) and peridotites (b, harzburgite, lherzolite and wehrlite) from the Yushugou Massif

部的年龄却相当离散,除了有 380~420 Ma 的数据之外,还有 1520 Ma, 1170 Ma, 850 Ma, 680~700 Ma, 620~640 Ma, 590 Ma, 530~550 Ma, 510Ma 和 425~460 Ma 的年龄(图 12b),说明锆石来源非常复杂,含这些锆石的麻粒岩的原岩不可能是与蛇绿岩套有关的单一岩浆成因的洋脊拉斑玄武岩或镁铁质堆晶岩,而极可能是陆壳碎屑物质(变沉积岩)或上地幔部分熔融的玄武岩浆对下地壳多期多阶段的底侵作用(Underplating)及其后来叠加的高温高压变质作用的共同产物,就如那些来自南非太古宙 Kaapvaal 地台(Schmitz and Bowring, 2003)、加拿大中部 Superior 地盾(Moser and Heaman, 1997)和西北部 Slave 地台(Davis, 1997)下地壳包体所揭示的复杂的地质过程一样。过去持“蛇绿岩套”观点的学者往往把这套麻粒岩看成是同一时代形成的大洋玄武岩、辉长岩或

辉绿岩随大洋岩石圈俯冲 40~50 km 深度经高压变质,然后折返到地壳浅部的产物(王润山等, 1999a, b; 王居里等, 1999; 董云鹏等, 2001; 周鼎武等, 2004)。这样的基性麻粒岩极可能来自于大陆下地壳,如何与作为大洋地壳的“蛇绿岩套”中的超基性岩叠合到一起?这是持“蛇绿岩套”观点的学者迄今尚无法解释的关键问题,因为“蛇绿岩”是活动大陆边缘没能随大洋岩石圈俯冲下去而被强刮下来的洋壳,它连带一部分洋盆莫霍面之下地幔顶层的橄榄岩残留于两个板块之间的缝合带,往往仅遭受很低的变质作用(Nicolas, 1989; 杨经绥等, 2011)。我们认为,榆树沟的橄榄岩本来就不是来自洋壳之下的上地幔,而是大陆岩石圈的上地幔。如此这般,榆树沟的基性麻粒岩-橄榄岩组合的地体代表逆冲剪切带中先后被挤出、来自壳-幔过渡带的两个构造透镜体,每一个构造透镜体都包含南天山地块莫霍面之上属于下地壳的基性麻粒岩和之下属于上地幔的橄榄岩。换句话说,在榆树沟地区,南天山地块古生代的大陆莫霍面由于陆内逆冲和构造挤出(Tectonic intrusion)作用在现今的榆树沟地区直接出露地表,原来中天山地块和南天山地块同属塔里木板块,它们之间可能不存在一个所谓的古海洋。

1.3 绿片岩-低角闪岩相的变沉积岩

榆树沟橄榄岩体的南侧是绿片岩-低角闪岩相的变沉积岩(图 1、2b),主要是构造片岩、长英质细粒糜棱岩和大理岩,对应的原岩估计为中酸性火山岩(凝灰岩)、泥岩、杂砂岩、碳酸盐等。在先前的文献中这套变沉积岩统称为中上泥盆统的地层,其实尚缺严格的制约。例如,这套变沉积岩曾被斜长花岗岩脉侵入,然后一起变形,斜长花岗岩脉被剪切成布丁,用 SHRIMP 方法测定这些斜长花岗岩布丁中锆石年龄介于 419~450 Ma,平均年龄为 439 Ma(杨经绥等, 2011),说明这套变沉积岩原岩的形成时代至少应老于晚奥陶世,甚至更可能为寒武纪。这套变沉积岩在北东侧与橄榄岩呈构造接触关系,但在其东南侧被尚未变形的花岗岩体(锆石结晶的 U-Pb 年龄为 259~267 Ma,王润三等, 1999a)侵入(图 1、2)。基于野外观察,这套变质沉积岩最主要的变形特征就是形成一系列尺度不等的倒转或平卧的紧闭、同斜、直至无根的褶皱(图 13),说明这套岩石经受了极其强烈的构造挤压缩短。褶皱轴面系统地向 NE 方向倾斜,指示这些褶皱是由区域性从 NE 向 SW 方向强烈的推覆作用形成的,这一结论也与野外观察的各式剪切旋转标记(例如, S-C 构造、旋转

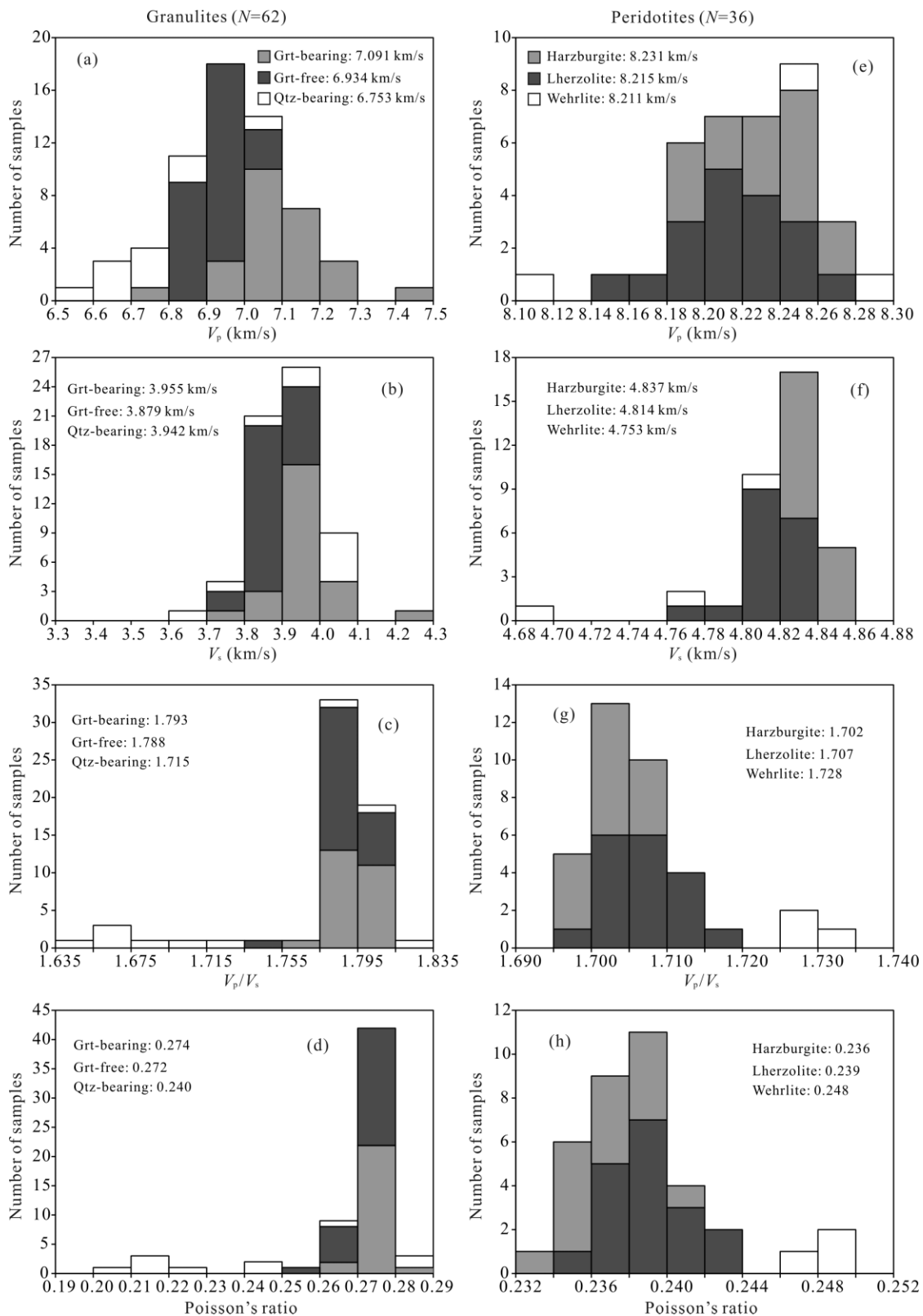


图 11 榆树沟麻粒岩(左边: 含与不含石榴子石基性麻粒岩和含石英中性麻粒岩)和橄榄岩(右边: 方辉橄榄岩、二辉橄榄岩与单辉橄榄岩)的 P 波速度(a, e), S 波速度(b, f), V_p/V_s 比值(c, g)和泊松比(d, h)的分布直方图

Fig.11 Histograms for the P-wave velocities (a and e), S-wave velocities (b and f), V_p/V_s ratios (c and g) and Poisson's ratios (d and h) of the granulites (left: garnet-bearing and garnet-free mafic granulite's and quartz-bearing intermediate granulite) and peridotites (right: harzburgite, lherzolite and wehrlite) from the Yushugou Massif

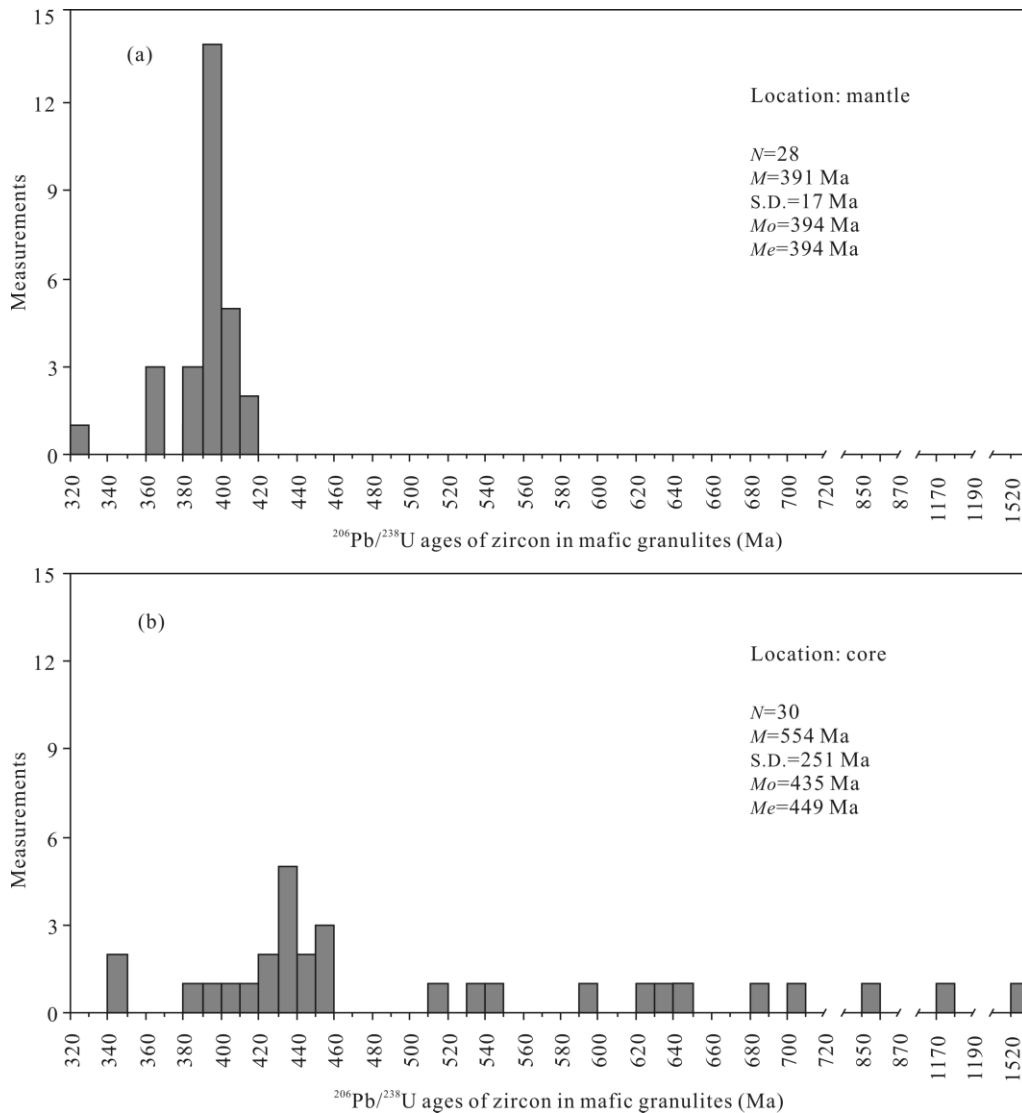


图 12 榆树沟基性麻粒岩中锆石边部(a)和核部(b)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布直方图(原始资料取自杨经绥等, 2011; 李天福等, 2011; 周鼎武等, 2004)

Fig.12 Histograms for the $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircon grains (a, mantle; b, core) from the mafic granulites from the Yushugou Massif (Data from Yang et al., 2011; Li et al., 2011; Zhou et al., 2004)

岩脉、非对称性的布丁构造等)一致。野外与显微镜下观察表明, 这套变质沉积岩记录了较完整的从塑性到半脆性再到脆性变形的演化过程(图 14), 早期的塑性变形形成透入性的晶粒形状组构——挤压面理与拉张线理, 石英、云母、方解石、绿泥石等皆作位错蠕变, 造成晶格旋转、弯曲、定向排列及其晶界迁移的重结晶作用, 在应变强烈集中的剪切带内形成颗粒很细的糜棱岩。半脆性变形主要表现为, 在原先塑性变形所致的晶粒形状组构之上又重新叠加了流体参与的溶解-搬运-结晶过程形成的系列构造, 例如, 选择性溶解形成的非透入性间劈理(图 14b)、雁形排列的长透镜状的石英脉(图 14c-d)等。

沿着这些构造劈理(即与最大构造主应力 σ_1 方向垂直或呈高角度相交的面), 易溶的矿物如石英, 被流体搬运到与最小构造主应力 σ_3 方向垂直或呈高角度相交的拉分部位(高压流体所致的张破裂)沉淀下来; 而那些难溶的矿物如云母、绿泥石、黄铁矿等暗色矿物则在与最大构造主应力 σ_1 方向垂直或呈高角度相交的面上相对集中起来, 形成暗色的构造劈理。除了上述的单个脉呈透镜体状、多条脉呈雁形排列组合、充填于半脆性或脆性张破裂的晚期石英脉体之外, 绿片岩-低角闪岩相变质沉积岩中至少还有一期早期的高温石英脉体, 它们普遍发生了强烈的褶皱(图 13e-f, 14b), 呈复杂的肠状或非对称状的褶

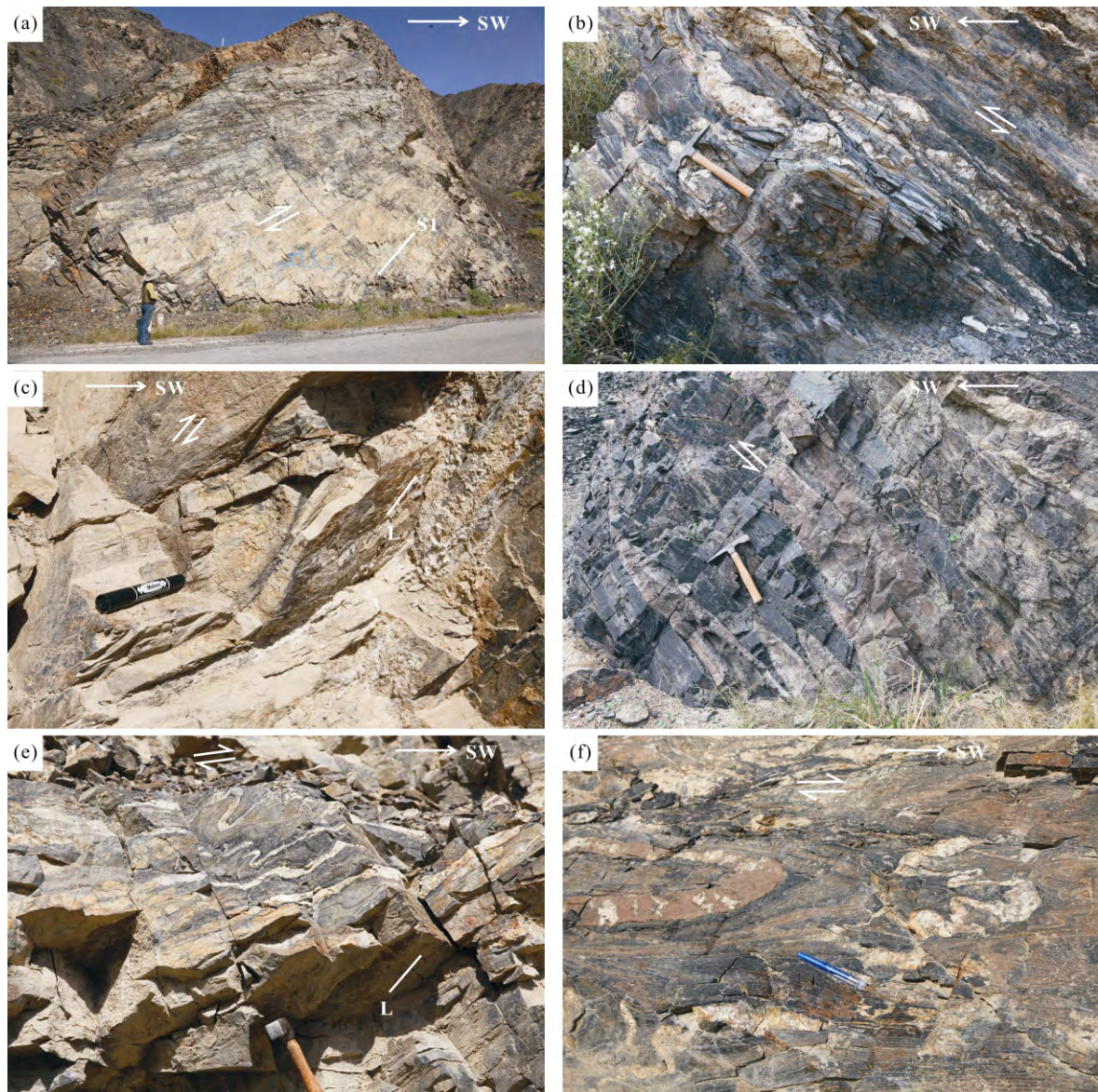


图 13 榆树沟绿片岩-低角闪岩相变沉积岩的特征变形构造(NE 向倾斜的面理、高角度侧伏的拉张线理、倒转或平卧的紧闭与同斜褶皱等)的野外照片

Fig.13 Field photographs showing the characteristic deformation structures (e.g., NE-dipping foliation, down-dip lineation, overturned and recumbent, tight to isoclinal folds) of the greenschist-lower amphibolite-facies metasediments, indicating a top-to-SW thrusting, in the Yushugou Massif

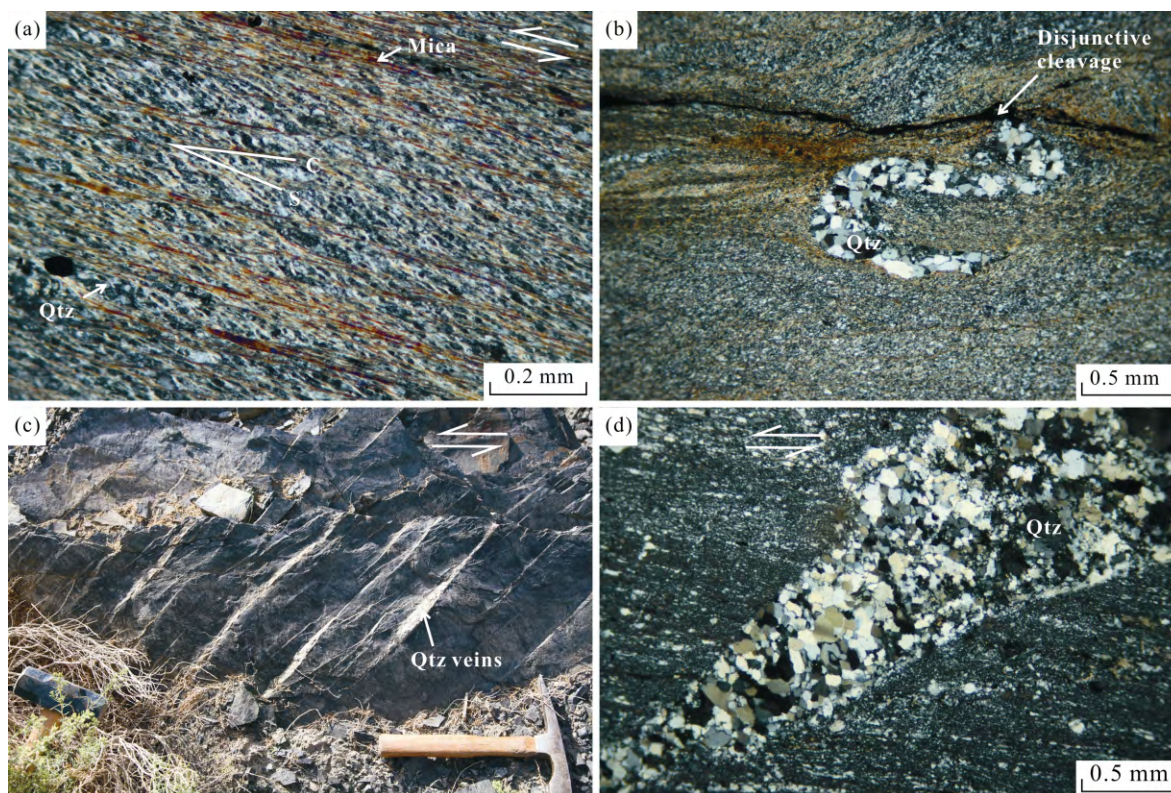
皱串或布丁串。据流体包裹体研究(刘斌和钱一雄, 2003), 晚期的石英脉体大概形成于温度 125~410 和压力 80~400 MPa 的条件下, 对应于深度 3~15 km。

在上述的绿片岩-低角闪岩相变质沉积岩中, 存在少量变形程度相对较弱的含角闪石和白云母的斜长花岗岩(Plagiogranite), 其中石英与白云母经受强烈的重结晶作用, 地表露头上岩石蚀变风化极其严重, 杨经绥等(2011)从中分选了 16 颗锆石, 采用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 方法测定锆石的 U-Pb 年龄为 439 Ma, 并将其作为南天山洋盆地壳或榆树沟蛇绿岩形成的年龄。斜长花岗岩侵入到沉积岩之后,

一同在绿片岩-低角闪岩相的变质条件下发生了变形。斜长花岗岩的形成似乎与蛇绿岩形成毫无关系, 其锆石结晶年龄亦不能代表榆树沟橄榄岩体或南天山洋盆地壳形成的时代。

2 讨 论

徐向珍等(2011)认为新疆榆树沟的橄榄岩为“形成于大洋中脊、后又经过俯冲带流体改造、并伴有岛弧火山岩的蛇绿岩”, 杨经绥等(2011)主张“新疆榆树沟的高压麻粒岩不属于蛇绿岩组合”。对于这



(a) 构造片岩中的 S-C 构造, 指示上盘向 SW 方向逆冲; (b) 早期的石英脉塑性变形成褶皱, 后被压溶形成的间劈理切割; (c) 充填于雁行排列的拉张破裂中的石英脉, 指示上盘向 SW 方向的剪切; (d) 糜棱岩中透镜状石英脉的显微照片。

(a) S-C structures in the schist, indicating a top-to-SW shear; (b) a folded quartz vein cut by pressure solution-related disjunctive cleavage; (c) quartz veins filled in tension gashes in en-echelon arrangement, indicating a top-to-SW shear; (d) polycrystalline quartz filled in a tension gash. Shear sense shown by arrows.

图 14 榆树沟绿片岩-低角闪岩相变沉积岩的韧性、半脆性与脆性变形的特征构造

Fig.14 Characteristic structures of the greenschist-lower amphibolite-facies metasediments deformed under ductile, semi-brittle and brittle conditions

些形成深度极浅的海洋地壳(蛇绿岩)又是如何与南天山北缘的深地壳高压麻粒岩走到一起之类的问题, 这些作者没有深究。西北大学的研究者(王润三等, 1999a, 2003; 王居里等, 1999; 王焰等, 1999; 董云鹏等, 2001; 周鼎武等, 2004)认为, 榆树沟橄榄岩-基性麻粒岩地体是俯冲到 40~50 km 深度, 经受麻粒岩相变质作用, 然后折返剪切抬升至地表的蛇绿岩残片, 后期叠加了角闪岩相退变质作用。但是, 对于该地体进入“俯冲带”之前是否曾是蛇绿岩套——大洋地壳岩石、与基性麻粒岩伴生的橄榄岩是否亦曾先发生深俯冲然后再折返地表、这些基性麻粒岩的原岩是否就是蛇绿岩等绕不过去的问题, 尚没有引起足够的重视。据 1972 年美国地质学会彭罗斯 (Penrose) 会议给出的蛇绿岩定义, 蛇绿岩必须为一套特殊的基性岩至橄榄岩的共生组合, 具有与现代大洋洋壳可以直接对比的完整的蛇绿岩剖面, 即从底部向上的层序依次为“构造化橄榄岩”层(即变形

橄榄岩层)、超镁铁堆积岩层、镁铁堆积岩层、席状岩墙杂岩层和枕状熔岩层。但是, 在榆树沟地区, 不仅堆晶岩没有, 而且亦缺少岩墙群。为了硬凑出一个蛇绿岩套来, 有人甚至把橄榄岩体北侧的塑性变形的、年龄分布复杂(图 12b)的基性麻粒岩当作蛇绿岩套中的层状镁铁质堆积岩(姜常义和李良辰, 1990; 杨经绥等, 2011), 再把其南侧的遭受绿片岩-低角闪岩相变质的极可能是寒武纪的火山-沉积岩(长英质片岩、千枚岩、大理岩、变质中酸性火山碎屑岩、变质砾岩等)当做晚奥陶世-早志留世蛇绿岩套中的细碧岩和硅质岩(吴文奎等, 1992; Windley et al., 1990; 马瑞士等, 1993), 颠倒了蛇绿岩剖面应有的岩性顺序。正如杨经绥等(2011)所说, “麻粒岩相变质的原岩可能不是榆树沟地区晚奥陶世-早志留世蛇绿岩洋壳, 而是陆壳物质和陆壳物质中早期存在的基性岩类”。

还有的人只研究榆树沟的橄榄岩, 把其当作形

成于大洋中脊(MOR)和俯冲带上盘(SSZ)的“蛇绿岩”,以说明南天山与中天山之间有个名叫南天山的古海洋的消失。例如,杨经绥等(2011)和徐向珍等(2011)把榆树沟麻粒岩当成“一个很特殊的构造块体”,认为它“不属于蛇绿岩的组合”,因为麻粒岩仅出现在榆树沟“蛇绿岩”北部。其实,麻粒岩不仅仅出现在榆树沟橄欖岩体的北部,还出现在其中部(图1)。杨经绥等(2011)认为“前人误把榆树沟麻粒岩当做蛇绿岩来研究”,“其实对榆树沟蛇绿岩没有真正做过研究工作”。杨经绥等(2011)和徐向珍等(2011)的上述解释似乎忽略了该地区麻粒岩与橄欖岩之间紧密共生的关系。尽管如此,这些作者还是把麻粒岩相变质-变形的斜长岩(基性麻粒岩)锆石核部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(419~452 Ma,平均 435 ± 2.8 Ma)作为奥陶纪-志留纪的洋盆形成时代,又把麻粒岩相变质-变形的锆石幔部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(396~405 Ma,平均 403 ± 1 Ma)作为早泥盆世板块斜向俯冲和碰撞的时代。

我们认为南天山陆块与中天山陆块一起,本来可能同属一个板块,都是前寒武纪后从塔里木大陆板块离散出来的块体(Allen et al., 1993; Gao et al., 1998; Chen et al., 1999; 郭召杰和张志诚, 1993),也就是说哈萨克斯坦-准噶尔板块和塔里木板块之间的界线应划在中天山的北缘。榆树沟麻粒岩与橄欖岩分别代表志留纪-泥盆纪时所处的大陆地壳莫霍面附近的下地壳底部与上地幔顶部的岩石,由于应变的局部化,被剪切分割成两个构造透镜体或透镜状冲断岩片,顺着切割整个地壳直达上地幔顶部的韧性剪切带被挤出,最终呈固态挤侵到中地壳内绿片岩-低角闪岩相的变沉积岩(构造片岩、长英质糜棱岩)中,两个构造透镜体被剪切叠合到一起。所

以,榆树沟麻粒岩-橄欖岩地体为研究塔里木板块北部大陆地壳古莫霍面及其附近岩石的流变学及其地球物理性质提供了一个十分难得的研究基地,毕竟大陆古莫霍面很少直接暴露地表(Carbonell et al., 2013; O'Reilly and Griffin, 2013; Rabbel et al., 2013; Wang et al., 2013)。例如,利用图10、11和表1给出的麻粒岩与橄欖岩的地震波速与密度数据,我们可以计算P波垂直入射莫霍面的反射系数(表2)。方辉橄欖岩($\rho=3.308\pm 0.001$ g/cm³, $V_p=8.231\pm 0.026$ km/s)、二辉橄欖岩($\rho=3.307\pm 0.001$ g/cm³, $V_p=8.215\pm 0.029$ km/s)和单辉橄欖岩($\rho=3.303\pm 0.004$ g/cm³, $V_p=8.211\pm 0.091$ km/s)的密度与波速相差不大。这些橄欖岩与无论含不含石榴子石的基性麻粒岩接触总能产生莫霍面上常见的强反射(反射系数>10%)。横跨莫霍面, V_p/V_s 比值亦会发生变化,基性麻粒岩的 $V_p/V_s=1.79$ ($v=0.27$),而地幔岩的 $V_p/V_s=1.70$ ($v=0.24$)。

利用主要造岩矿物的晶格优选定向(图6a-c)和单晶体的弹性系数(Aleksandrov and Ryzhova, 1961; Aleksandrov et al., 1974),我们理论计算了榆树沟一块典型的方辉橄欖岩标本(样号YSG26-10,含71% Ol, 25% Opx, 4% Cpx)的地震波速分布图(图15),计算得出 V_p 的各向异性为1.5%,最大的 V_s 的各向异性也才1.6%,与那些位错滑移蠕变的地幔岩相比(Ji et al., 1994, 2002; Saruwatari et al., 2001; Wang et al., 2013),榆树沟橄欖岩的波速各向异性低很多,原因是在后期的应变局部化过程中橄欖石的超塑性变形机制(颗粒边界扩散与滑移)摧毁早期由位错滑移蠕变形成的强烈的晶格优选定向。所以,在应变强烈集中的壳-幔过渡带中,橄欖岩的地震波速可能是近乎各向同性的。

表2 新疆榆树沟下地壳麻粒岩与上地幔橄欖岩之间地震波反射系数(%)

Table 2 Reflection coefficients (%) at the interfaces between the lower crust granulites and mantle rocks from Yushugou, Xinjiang

Unit	Lithology	Impedance (10^{-6} kg m ⁻² s ⁻¹)	Lower crust			Upper mantle		
			Grt-bearing mafic granulite	Grt-free mafic granulite	Qtz-bearing intermediate granulite	Lherzolite	Harzburgite	Wehrlite
			21.53	20.50	19.76	27.17	27.23	27.13
Lower crust	Grt-bearing mafic granulite	21.53	0	2.45	4.28	11.58	11.70	11.50
	Grt-free mafic granulite	20.50		0	1.83	14.00	14.11	13.92
	Qtz-bearing intermediate granulite	19.76			0	15.79	15.90	15.71
Upper mantle	Lherzolite	27.17				0	0.12	0.08
	Harzburgite	27.23					0	0.20
	Wehrlite	27.13						0

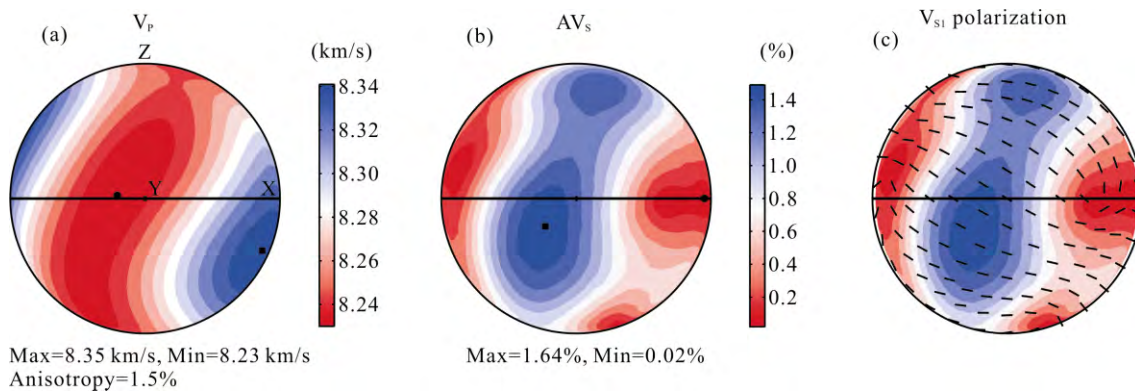


图 15 利用造岩矿物组构资料、模式成分和单晶弹性系数理论计算的榆树沟方辉橄榄岩(标本号 YSG2610)的 P 波波速分布(a)、S 波速度各向异性(b)和快波偏振方向(c)(施密特网, 下半球投影)

Fig.15 P-wave velocities (a), S-wave velocity anisotropy (b) and fast polarization directions (c) for harzburgite sample YSG26-10 from the Yushugou Massif, calculated from LPO data, modal composition, and single crystal elastic constants of each rock-forming mineral. Equal-area lower hemisphere projections

笔者相信, 本文提供的构造模式亦同样可以用来解释其他造山带中麻粒岩与橄榄岩沿断裂带共生的问题。

参考文献(References):

- 董云鹏, 王润三, 周鼎武. 2001. 南天山北缘榆树沟变质基性-超基性岩的地球化学及其成因机制. 地球化学, 30(6): 559-568.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 张成立, 夏林圻, 徐学义, 李向民. 2005. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境. 岩石学报, 21(1): 37-44.
- 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 刘斌, 丁道桂, 殷勇. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京: 地质出版社: 1-284.
- 高俊, 汤耀庆, 赵民, 王军. 1995. 新疆南天山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探. 岩石学报, 11(增刊): 85-97.
- 郭召杰, 张志诚. 1993. 中天山早古生代岛弧构造带研究. 石家庄经济学院学报, 16(2): 132-139.
- 郝杰, 刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及其大地构造意义. 地质科学, 28(1): 93-95.
- 何国琦, 李茂松, 韩宝福. 2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究. 新疆地质, 19(1): 7-11.
- 嵇少丞, 王茜, 许志琴. 2008. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄. 地质学报, 82(2): 174-193.
- 姜常义, 李良辰. 1990. 榆树沟层状堆积岩的岩石学与地球化学. 矿物岩石, 10(2): 31-36.
- 李天福, 杨经绥, 任玉峰, 陈松永, 徐向珍. 2011. 南天山北缘榆树沟麻粒岩的变质作用及其锆石 SHRIMP 年龄的研究. 岩石学报, 27(1): 147-165.

- 刘斌, 钱一雄. 2003. 东天山三条高压变质带地质特征和流体作用. 岩石学报, 19(2): 283-296.
- 路孝平, 吴福元, 林景任, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架. 地质科学, 39(1): 123-138.
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫等. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京: 南京大学出版社: 11-61.
- 马瑞士, 叶尚夫, 王赐银等. 1990. 东天山造山带构造格局和演化. 新疆地质科学(第二辑). 北京: 地质出版社: 21-36.
- 舒良树, 王赐银, 马瑞士. 1996. 南天山北缘麻粒岩残迹与辉石相韧性变形研究. 地质科学, 31(4): 375-383.
- 王居里, 王润三, 周鼎武, 王焰, 刘养杰. 1999. 天山榆树沟麻粒岩相构造岩研究. 岩石学报, 15(4): 539-547.
- 王茜, 邵同宾, 嵇少丞, 道林克祯, 近藤洋裕, 龙长兴, 孙圣思. 2014. 岫玉的地震波速、各向异性、弹性力学性质及其构造地质意义. 大地构造与成矿学, 38(1): 12-26.
- 王润三, 王焰, 刘养杰, 炎金才, 王居里. 1997. 新疆南天山榆树沟层状杂岩体中的副麻粒岩——岩石学特征及其地球动力学意义. 西北大学学报, 27(5): 411-416.
- 王润三, 周鼎武, 王居里, 王焰, 刘养杰. 1999a. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. 中国科学(D辑), 29(4): 306-313.
- 王润三, 王居里, 周鼎武, 王焰, 刘养杰. 1999b. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. 地质科学, 34(2): 166-176.
- 王润三, 周鼎武, 王焰, 王居里, 桑海清, 张任祜. 2003. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体多期变质定年研究. 岩石学报, 19(3): 452-460.

- 王学潮, 何国琦, 李茂松, 高俊, 陆书宁. 1995. 南天山南缘蛇绿岩岩石化学特征及同位素年龄. 河北地质学院学报, 18(4): 295-302.
- 王焰, 王润三, 周鼎武, 刘养杰. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相高压地体的抬升过程——角闪石提供的信息. 西北大学学报(自然科学版), 29(6): 565-568.
- 王作勋, 邬继勇, 吕喜朝, 张经国, 刘德成. 1990. 天山多旋回构造演化及成矿. 北京: 科学出版社: 1-217.
- 吴文奎, 姜常义, 杨复, 李良辰. 1992. 南天山榆树沟-铜花山构造混杂体综述. 西安地质学院学报, 14(1): 8-13.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 2007. 天山岩浆作用. 北京: 中国大地出版社: 1-350.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社: 1-169.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1-488.
- 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 李天福, 任玉峰, 陈松永. 2011. 新疆天山地区榆树沟-铜花山蛇绿岩特征和构造背景. 岩石学报, 27(1): 96-120.
- 杨帆, 舒良树, 张富生. 2009. 南天山基性麻粒岩中变形石英和石榴子石的TEM研究. 大地构造与成矿学, 33(4): 481-487.
- 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 陈松永, 任玉峰, 李金阳, 刘钊. 2011. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石U-Pb同位素定年: 早古生代洋盆的证据. 岩石学报, 27(1): 77-95.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 李承东, 王焰, 贾秀勤. 2006. 大陆下地壳拆沉模式初探. 岩石学报, 22: 265-276.
- 周鼎武, 苏莉, 简平, 王润三, 柳小明, 陆关祥, 王居里. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及构造意义. 科学通报, 49(14): 1411-1415.
- Aleksandrov K S and Ryzhova T V. 1961. The elastic properties of rock-forming minerals: II layered silicates, *Izv., Bulletin of the Academy of Science of the USSR, Geophysical Serials*, 12: 1165-1168.
- Aleksandrov K S, Alchikov U V, Belikov B P, Zaslavskii B I and Krupnyi A I. 1974. Velocities of elastic waves in minerals at atmospheric pressure and increasing precision of elastic constants by mean of EVM(in Russian). *Bulletin of the Academy of Science of the USSR, Geology Serials*, 10: 15-24.
- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia. *Tectonophysics*, 220: 89-115.
- Bodinier J L and Godard M. 2014. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. *Treatise on Geochemistry*, 3: 103-167.
- Carbonell R, Levander A and Kind R. 2013. The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints. *Tectonophysics*, 609: 353-376.
- Charvet J, Shu L S and Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan(NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates. *Episodes*, 30(3): 162-186.
- Chen C M, Lu H F, Jia D, Cai D S and Wu S M. 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: An oblique collisional orogeny. *Tectonophysics*, 302: 23-40.
- Christensen N I and Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. *Journal of Geophysical Research*, 100: 9761-9788.
- Condie K C and Selverstone J. 1999. The crust of the Colorado plateau: new views of an old arc. *Journal of Geology*, 107: 387-397.
- Davis G L. 1997. The areas and uranium contents of zircons from kimberlites and associated rocks. *Carnegie Institute of Wash. Yearbook*, 76: 631-635.
- Downes H. 1993. The nature of the lower continental crust of Europe petrological and geochemical evidence from xenoliths. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 79: 195-218.
- Drummond B J. 1988. A review of crust upper mantle structure in the Precambrian areas of Australia and implications for Precambrian crustal evolution. *Precambrian Research*, 40: 101-116.
- Durrheim R J and Green R W E. 1992. A seismic refraction investigation of the Archaean Kaapvaal craton, South Africa, using mine tremors as the energy source. *Geophysical Journal International*, 108: 812-832.
- Frets E, Tommasi A, Garrido C J, Padron-Navarta J A, Amri I and Targuisti K. 2012. Deformation processes and rheology of pyroxenites under lithospheric mantle conditions. *Journal of Structural Geology*, 39: 138-157.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Hu Y K and Zhao Z D. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959-1975.

- Gorman A R, Clowes R M, Ellis R M, Henstock T J, Spence G D, Keller G R, Levander A, Snelson C M, Buriannyk M J A, Kanasewich E R, Asudeh I, Hajnal Z and Miller K C. 2002. Deep probe: imaging the roots of western North America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39: 375–398.
- Griffin W L and O'Reilly S Y. 1987. The composition of the lower crust and the nature of the continental Moho–xenolith evidence. *Mantle Xenoliths*, 413–430.
- Ji S. 2013. Rheology of orthopyroxene constrained by folding of single crystals. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(2): 194–205.
- Ji S, Li A, Wang Q, Long C, Wang H, Marcotte D and Salisbury M. 2013. Seismic velocities, anisotropy, and shear-wave splitting of antigorite serpentinites and tectonic implications for subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 118(3): 1015–1037.
- Ji S and Mainprice D. 1988. Natural deformation fabrics of plagioclase: Implications for slip systems and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 147: 145–163.
- Ji S and Mainprice D. 1990. Recrystallization and fabric development in plagioclase. *Journal of Geology*, 98: 65–79.
- Ji S, Mainprice D and Boudier F. 1988. Sense of shear in high temperature movement zones from fabric asymmetry of plagioclase feldspars. *Journal of Structural Geology*, 10: 73–81.
- Ji S, Salisbury M and Hanmer S. 1993. Petrofabric, P-wave anisotropy and seismic reflectivity of high grade tectonites. *Tectonophysics*, 222: 195–226.
- Ji S and Martignole J. 1994. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation. *Journal of Structural Geology*, 16(7): 985–996.
- Ji S, Rondenay S, Mareschal M and Senechal G. 1996. Obliquity between seismic and electrical anisotropies as an indicator of movement sense for ductile mantle shear zones. *Geology*, 24: 1033–1036.
- Ji S, Wang Q and Xia B. 2002. Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores. Polytechnic International Press: 630.
- Ji S, Zhao X and Francis D. 1994. Calibration of shear-wave splitting in the subcontinental upper mantle beneath active orogenic belts using ultramafic xenoliths from the Canadian Cordillera and Alaska. *Tectonophysics*, 239: 1–27.
- Ji S, Zhao P and Saruwatari K. 1997. Fracturing of garnet crystals in anisotropic metamorphic rocks during uplift. *Journal of Structural Geology*, 19(5): 603–620.
- Kay R W and Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177–189.
- Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, Rumble III D and Maruyama S. 1998. High pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks // Hemley R J. Ultrahigh-Pressure Mineralogy: Physics and Chemistry of the Earth's Deep Interior. *Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, Chantilly, Virginia, 37: 33–96
- Luosto U and Korhonen H. 1986. Crustal structure of the Baltic shield based on off-nadir refraction data. *Tectonophysics*, 128: 183–208.
- Luosto U, Tiira T, Korhonen H, Azbel I, Burmin V, Buyanov A, Kosminskaya I, Ionkis V and Sharov N. 1990. Crust and upper mantle structure along the DSS Baltic profile in SE Finland. *Geophysical Journal International*, 101: 89–110.
- Moser D E and Heaman L M. 1997. Proterozoic zircon growth in Archean lower crust xenoliths, southern Superior craton: A consequence of Matachewan ocean opening. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 164–175.
- Newton R C and Perkins D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet-plagioclase-orthopyroxene-clinopyroxene-quartz. *American Mineralogist*, 67: 203–222.
- Nicolas A. 1989. Structures of ophiolites and dynamic of oceanic lithosphere. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers: 384.
- Niu F L and James D E. 2002. Fine structure of the lowermost crust beneath the Kaapvaal craton and its implications for crustal formation and evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 200: 121–130.
- Ohuchi T, Karato S-I and Fujino K. 2011. Strength of single-crystal orthopyroxene under lithospheric conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161: 961–975.
- Ohuchi T, Nishihara Y, Kawazoe T, Spengler D, Shiraishi R, Suzuki A, Kikegawa T and Ohtani E. 2012. Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: implications for shear localization in Earth's upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 335–336: 59–71.
- O'Reilly S Y and Griffin W L. 2013. Moho vs crust-mantle boundary: Evolution of an idea. *Tectonophysics*, 609:

- 535–546.
- Pearson D G, Canil D and Shirey S B. 2005. Mantle samples included in volcanic rocks: Xenoliths and diamonds. *Treatise on Geochemistry*, 171–275.
- Percival J A, Fountain D M and Salisbury M H. 1992. Exposed cross sections as windows on the lower crust // Fountain D M, Arculus R and Kay R W. *Continental Lower Crust*. Elsevier, Amsterdam: 317–362.
- Peslier A H, Francis D and Ludden J. 2002. The lithospheric mantle beneath continental margins: Melting and melt-rock reaction in Canadian Cordillera xenoliths. *Journal of Petrology*, 43(11): 2013–2047.
- Rabbal W, Kaban M and Tesauro M. 2013. Contrasts of seismic velocity, density and strength across the Moho. *Tectonophysics*, 609: 437–455.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33: 267–309.
- Rudnick R L and Presper T. 1990. Geochemistry of intermediate to high-pressure granulites // Vielzeuf D and Vidal P. *Granulites and Crustal Evolution*. Kluwer, Amsterdam: 523–550.
- Rudnick R L and Taylor S R. 1987. The composition and petrogenesis of the lower crust: a xenolith study. *Journal of Geophysical Research*, 92: 13981–14005.
- Saruwatari K, Ji S, Long C and Salisbury M H. 2001. Seismic anisotropy of mantle xenoliths and constraints on upper mantle structure beneath the southern Canadian Cordillera. *Tectonophysics*, 339: 403–426.
- Schmitz M D and Bowring S A. 2003. Ultrahigh-temperature metamorphism in the lower crust during Neoproterozoic rifting and magmatism, Kaapvaal craton, southern Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 115: 533–548.
- Shao T, Ji S, Kondo Y, Michibayashi K, Wang Q, Xu Z, Sun S, Marcotte D and Salisbury M H. 2014. Antigorite induced seismic anisotropy and implications for deformation in subduction zones and the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 119: 2068–2099.
- Shaw D M, Dickin A P, Li H, McNutt R H, Schwarcz H P and Truscott M G. 1994. Crustal geochemistry in the Wawa-Foley region, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31: 1104–1121.
- Shu L S, Yu J H, Charvet J, Laurent-Charvet S, Sang H Q and Zhang R G. 2004. Geological, geochronological and geochemical features of granulites in the Eastern Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 25–41.
- Skemer P and Karato S-I. 2008. Sheared lherzolite xenoliths revisited. *Journal of Geophysical Research*, 113, B07205, doi: 10.1029/2007JB005286.
- Sundberg M and Cooper R F. 2008. Crystallographic preferred orientation produced by diffusional creep of harzburgite: Effects of chemical interactions among phases during plastic flow. *Journal of Geophysical Research*, 113, B12208, doi: 10.1029/2008JB005618.
- Toy V G, Newman J, Lamb W and Tikoff B. 2010. The role of pyroxenites in formation of shear instabilities in the mantle: Evidence from an ultramafic ultramylonite, Twin Sisters massif, Washington. *Journal of Petrology*, 51: 55–80.
- Wang Q, Bagdassarov N and Ji S. 2013. The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks. *Tectonophysics*, 609: 395–422.
- Wang Z C and Ji S. 1999. Deformation of silicate garnets: Brittle-ductile transition and its geological implications. *Canadian Mineralogist*, 37: 525–541.
- Wang Z C and Ji S. 2000. Diffusion creep of fine-grained garnetite: Implications for the flow strength of subducting slabs. *Geophysical Research Letters*, 27: 2333–2336.
- Weaver B L and Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, 310: 575–577.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y and Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. *Geology*, 18: 128–131.

The Yushugou Granulite-Peridotite Terrane as a Paleozoic Continental Crust-Mantle Transition Zone Exposed at the Northern Margin of the Southern Tianshan (Xinjiang)

JI Shaocheng¹, WANG Qian², SHAO Tongbin¹, SUN Shengsi³, LI Awei⁴,
MICHIBAYASHI Katsuyoshi⁵, KONDO Yosuke⁵ and LI Jianfeng²

(1. *Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec H3C 3A7, Canada*; 2. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*; 3. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China*; 4. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 5. *Institute of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan*)

Abstract: The Yushugou massif in the Kumishi region at the northern margin of the southern Tianshan (Xinjiang) consists of extensively deformed peridotites (lherzolite, harzburgite and wehrlite) associated with foliated and lineated mafic composition-dominated granulites, together carried up and emplaced into greenschist-lower amphibolite-facies metasediments at 380–420 Ma. The granulite-peridotite units are interpreted as tectonic slices of continental mantle and lower crustal materials immediately adjacent the Moho. The high pressure metamorphic slices were extruded by tectonic compression from a detachment in the crust-mantle boundary up into the greenschist-lower amphibolite-facies middle crust along intracontinental thrust shear zones. Such compressional uplifts of the crust-mantle transition zone were similar to the Ivrea-Verbano zone in the southern Alps of Italy and the Jijal-Patan-Chilas sequence in the Kohistan arc of Pakistan. The boundary between mafic granulites and peridotites, which represents an exposed example of the Moho, is a high strain zone: in the mantle rocks olivine deformed by diffusion-accommodated grain boundary sliding while pyroxenes deformed by dislocation creep, and in the lower crustal mafic granulites both pyroxenes and plagioclase deformed by dislocation creep. Thus, the Yushugou massif provides important clues to the nature and seismic reflectivity of the continental Moho.

Keywords: exposed continental Moho; window on crust-mantle transition zone; compressional uplift; granulite-peridotite terrain; Yushugou; Tianshan