

华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系 及其大地构造意义

嵇少丞¹⁾, 王茜¹⁾, 杨文采²⁾

1) 加拿大蒙特利尔综合工学院民用、地质、采矿工程系, 蒙特利尔, H3C 3A7;

2) 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京, 100037

内容提要:华北克拉通破坏和岩石圈减薄已成为我国乃至国际地学界研究的热点之一。本文作者对许卫卫和郑天愉(2005)采用接收函数方法测量渤海湾西北盆岭地区 58 个宽频地震台站下面地壳厚度和地壳泊松比的资料进行了详细的分析研究。在冀东北、辽西以及石家庄附近的南太行山地区地壳泊松比随地壳厚度增加呈非线性骤然陡降, 说明在这些地区中新生代地壳减薄作用主要集中于长英质的中上地壳。在保定一大同和官厅水库—张家口—张北地区, 地壳泊松比随地壳厚度增加作缓慢地线性减小, 说明由玄武岩浆底侵作用造成的地壳泊松比增加抵消了一部分由长英质中上地壳减薄造成的泊松比减小。所以, 在中新生代华北克拉通地壳减薄过程中, 上地幔部分熔融及玄武岩浆底侵作用主要集中在保定一大同和官厅水库—张家口—张北等冀西北地区。

关键词: 华北克拉通; 泊松比; 地壳成分; 岩石圈减薄; 基性岩浆底侵作用

泊松比(ν)是构成地球和行星物质成分(岩石)的极其重要的弹性力学参数, 测量泊松比已成为人类探索地球内部物质成分、构造和物理状态最有用的方法之一(Holbrook et al., 1988; Ji et al., 1993; Zandt et al., 1995; Christensen, 1996; Ji et al., 2002)。泊松比的大小取决于岩石中 P 波和 S 波速度的比值(V_p/V_s), 反映在挤压与剪切条件下造岩矿物晶格原子间键的性质以及岩石内部显微构造特征(例如, 微裂隙的几何形状与空间分布、孔隙度以及各矿物相在三维空间中的连接性和连续性等)。 ν 的变化范围介于-1 与 0.5 之间, 但对绝大多数岩石来说, ν 介于 0 到 0.5 之间。当 $V_p/V_s < \sqrt{2}$, $\nu < 0$ 。负的泊松比主要出现于泡沫材料(Lakes, 1987; Gercek, 2007)和各向异性材料(例如, 方石英的 $\nu = -0.164$)中。流体或熔体的存在能有效地提高岩石的 V_p/V_s 比值, 从而增加泊松比。在石油地质领域, 泊松比常作为指示沉积岩孔隙度和孔隙几何形态的重要标志(Wilkens et al., 1984; Mavko et al., 1998)。最近, Mishra and Zhao (2003) 还利用现代震源区泊松比的变化探讨流体的时空分布。

图 1 表示岩石圈中主要造岩矿物的泊松率-密

度(ν - ρ)关系, 从中可见下列特点:

(1) 石英的泊松比最小, $\nu = 0.08$, 而蛇纹石的泊松比最大($\nu = 0.343$)。方解石也具较大的泊松比, $\nu = 0.32$ 。

(2) 钾长石和斜长石的泊松比较高。在斜长石固溶体系列中, 随着钙长石(An)含量的增高, 泊松比作相应的非线性增加。钠长石和钙长石的泊松比分别等于 0.28 和 0.31。

(3) 层状矿物云母的泊松比呈三角形分布, 金云母(富 Mg)具较高的 ν 和较低的密度; 黑云母(富 Fe)具较高的密度和中等的泊松比; 白云母具低的泊松比和中等的密度。

(4) 普通辉石和绿辉石具与常见的橄榄石(Fe_{90})相似的泊松比, 透辉石相对于普通辉石、绿辉石和硬玉来说具有较小的密度但较高的泊松比。

(5) 斜方辉石的泊松比呈 J 形分布, 低值出现在顽火辉石, 而高值出现于古铜辉石。总之, 斜方辉石的泊松比随其 Fe 含量的增加而增加。

(6) 在橄榄石组矿物中, 泊松比随 Fe_2SiO_4 含量增加而增加。在图 1 中, 我们仅投影了成分为 Fe_{90-100} 的橄榄石, 因为上地幔中橄榄石的成分主要

注: 本文为中国国家杰出海外青年学者基金, 中国科学院杰出海外青年学者和加拿大自然科学和工程研究基金联合资助的成果。

收稿日期: 2007-11-28; 改回日期: 2008-10-22; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 嵇少丞, 男, 留法博士(1987), 加拿大蒙特利尔综合工学院教授, 中国科学院广州地球化学研究所和国土资源部大陆动力学实验室客座教授。主要从事地球物质流变学、岩石物理和深部构造方面的研究。Email: sjj@polymtl.ca。

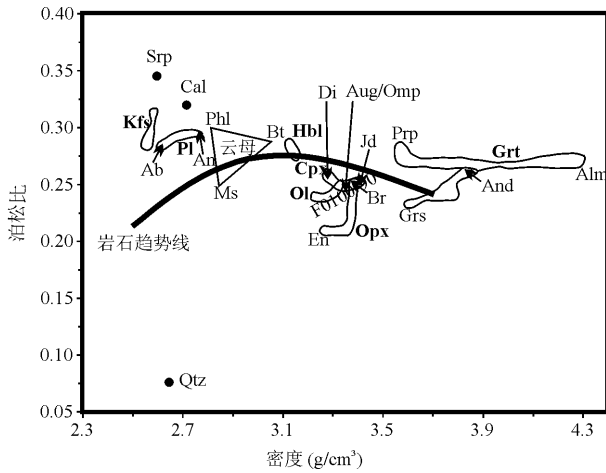


图 1 主要造岩矿物的泊松比-密度投影图

Fig. 1 Poisson's ratio—density plots for main rock-forming minerals

Ab—钠长石; Alm—铁铝榴石; And—钙铁榴石; Aug—普通辉石; Br—古铜辉石; Bt—黑云母; Cal—方解石; Cpx—单斜辉石; Di—透辉石; En—顽火辉石; Grs—钙铝榴石; Grt—石榴子石; Hbl—角闪石; Jd—硬玉; Kfs—钾长石; Ms—白云母; Ol—橄榄石; Omp—绿辉石; Opx—斜方辉石; Phl—金云母; Pl—斜长石; Prp: 镁铝榴石; Qtz—石英; Srp—蛇纹石
Ab—albite; Alm—almandine; And—andradite; Aug—augite; Br—bronzite; Bt—biotite; Cal—calcite; Cpx—clinopyroxene; Di—diopside; En—enstatite; Grs—grossular; Grt—garnet; Hbl—hornblende; Jd—Jadeite; Kfs—K-feldspar; Ms—muscovite; Ol—olivine; Omp—omphacite; Opx—orthopyroxene; Phl—phlogopite; Pl—plagioclase; Prp—pyrope; Qtz—quartz; Srp—serpentinite

位于这个区间之中。

(7) 硅酸盐石榴子石可分为两组, 一组叫 Pyralspite, 即镁铝榴石-铁铝榴石-锰铝榴石系列, 另一组叫 Ugrandite, 即钙铬榴石-钙铝榴石-钙铁榴石系列。在 Pyralspite 系列中, 泊松比随密度增加略有减小; 而在 Ugrandite 系列中, 泊松比随密度增加而明显地增加(Wang et al., 2001)。

Ji 等 (2002) 在其出版的总共 630 页的《Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores》中系统地汇总了全世界各种岩石密度和 P 波、S 波速度随围压的变化, 据此手册汇总的波速数据, 我们分别计算了岩石圈中主要种类岩性的泊松比并分析了其与密度之间的关系 (图 2), 图中的趋势线表示泊松比随密度变化的总体规律 (稽少丞等, 2007; Ji et al., 2008)。该趋势线呈上拱弧状, 最高点位于 $\rho=3.05\text{g/cm}^3$ 处。在 $\rho=2.26\text{--}3.05\text{g/cm}^3$ 之间, 泊松比随密度增加而增加, 但当

$\rho>3.05\text{--}3.10\text{g/cm}^3$ 时, 泊松比随密度增加呈缓慢地减小。然而, 单矿岩诸如石英岩、大理岩、灰岩、斜长岩和蛇纹岩等明显地偏离了总的趋势线, 蛇纹石化强烈的橄榄岩也偏离了该趋势线, 而除此之外的其它所有常见岩性都位于或非常靠近该趋势线。

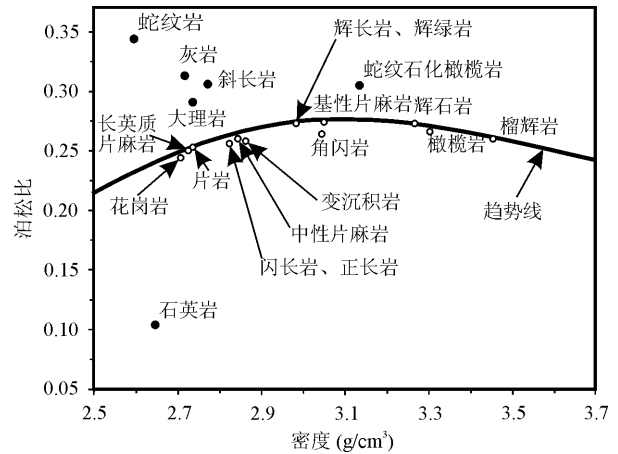


图 2 主要类型岩石的泊松比-密度投影图

Fig. 2 Poisson's ratio-density plots for main categories of rocks

分析图 1 和图 2, 可以得出一些定性的结论: 在长英质岩石如花岗岩、花岗闪长岩以及闪长岩中, 石英含量的增加会使岩石的泊松比减小, 而长石含量的增加会使岩石的泊松比增加。基性岩如辉长岩、辉绿岩以及基性片麻岩具有较大的泊松比, 主要原因就是这些岩石不含石英, 而含大量基性斜长石。新鲜的橄榄岩较之辉长岩、辉绿岩和基性片麻岩具有较小的泊松比, 但橄榄岩的泊松比实际上随其蛇纹石化程度的增加而明显地增加, 原因是蛇纹石具特别高的泊松比。榴辉岩的泊松比主要受其主要造岩矿物石榴子石和绿辉石的制约, 不同榴辉岩泊松比的差异主要反映所含石榴子石化学成分 (Wang and Ji, 1999) 以及退变质程度的差异 (Ji et al., 2003)。

1 华北盆岭地区泊松比与地壳厚度的关系

许卫卫和郑天愉 (2005) 利用渤海湾西北盆岭地区 58 个宽频数字化台站 (图 3) 在 2001 年到 2003 年两年期间记录的 5.5 级以上远震三分量数据, 从接收函数中测量出 Ps 转换波以及多次波 PpPs、PpSs 和 PsPs 与直达波的时差, 计算出各台站下面地壳的厚度 (H) 和 V_p/V_s (然后换算成泊松比 ν)。

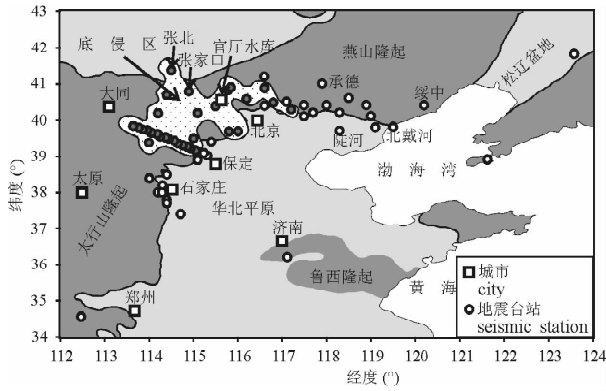


图3 北京市和河北省境内华北克拉通上地震台站分布
Fig. 3 Map of stations in the North China Craton

这是一篇重要的地球物理学文献,应该受到“华北克拉通岩石圈减薄与破坏”研究人员的重视。现将他们的全部数据重新投影到一张“地壳厚度—泊松比”图上(图4),不难发现华北地区存在两种截然不同的 ν - H 变化趋势。在保定—大同以及官厅水库—张家口—张北附近地区, ν 随 H 增加作缓慢地线性减小,而在冀东北—辽西以及石家庄附近的太行山地区, ν 随 H 增加作迅速地非线性减小。

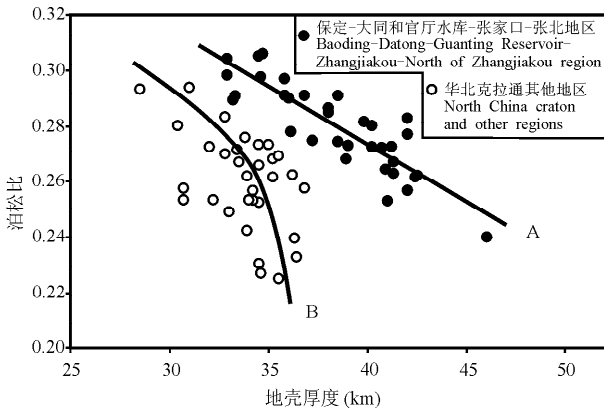


图4 北京市和河北省境内华北克拉通上各地震台站下面泊松比与地壳厚度变化的关系
Fig. 4 Measured Poisson's ratio as a function of crustal thickness for the North China Craton

2 讨论

从地震波接收函数分析得到的泊松比只是该台站下面整个地壳的一个平均值。由于全部台站都位于基岩之上(许卫卫和郑天愉,2005),故地表疏松沉积物对整个地壳泊松比的影响完全可以忽略不计。可以合理地假设石英岩、大理岩、斜长岩、蛇纹岩等

单矿岩在地壳中比例很少,仅在局部区域出现,而华北大陆地壳的物质组成也和世界上其它大陆地壳一样,主要由酸性岩($\nu \leq 0.26$,如花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩、花岗闪长片麻岩、酸性麻粒岩等)、中性岩($0.26 < \nu \leq 0.28$,如闪长岩、闪长片麻岩、中性麻粒岩等)和铁镁质的基性岩($0.28 < \nu \leq 0.30$,如辉长岩、角闪岩、榴辉岩、基性麻粒岩等)三个端元组分按一定比例复合而成(Christensen, 1996; Ji et al., 2002)。泊松比大于0.30~0.31的区域可归因于或者发生了部分熔融、或者是破碎带(孔隙度高、存在流体),还可能是强烈蛇纹石化的断裂带。可以说, $\nu \leq 0.26$ 的地壳其主要组成岩性是长英质的酸性岩(图5), $\nu = 0.28 \sim 0.30$ 的地壳其主要组成岩性是铁镁质的基性岩,但 $\nu = 0.26 \sim 0.28$ 的地壳既可能是中性岩,也可能是酸性岩和基性岩按一定比例混合的复合体。

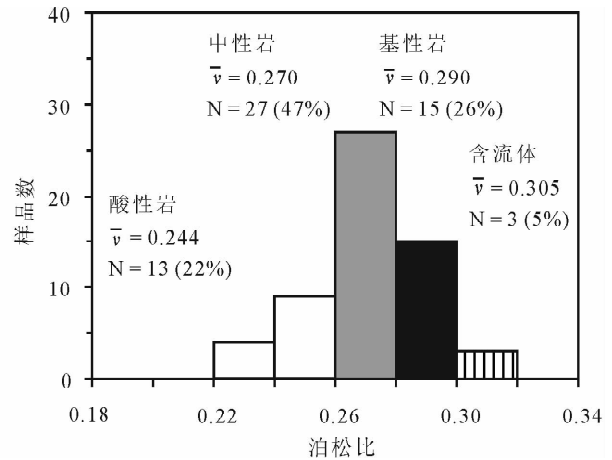


图5 北京市和河北省境内华北克拉通上地壳泊松比分布直方图
Fig. 5 Histogram of measured Poisson's ratio data for the North China craton

地壳厚度和泊松比之间关系可能隐含大陆地壳形成和构造演化过程的重要信息。如果大陆地壳成分单一,即从地表到莫霍面皆由同一种岩石组成,那么无论构造增厚或减薄作用都不会影响地壳泊松比的大小。如果地壳成分在水平方向上极度的不均匀,则地壳厚度和泊松比之间绝不会存在任何简单的关系。如果地壳由一系列水平延伸的不同岩性层在垂直方向上叠合而成,由于不同岩性具有不同的流变学强度,在构造挤压缩短(增厚)或拉张伸展(减薄)过程中,应变总是优先集中于弱岩层而不是强岩层。受到构造挤压,处于相同温度、压力条件下的长

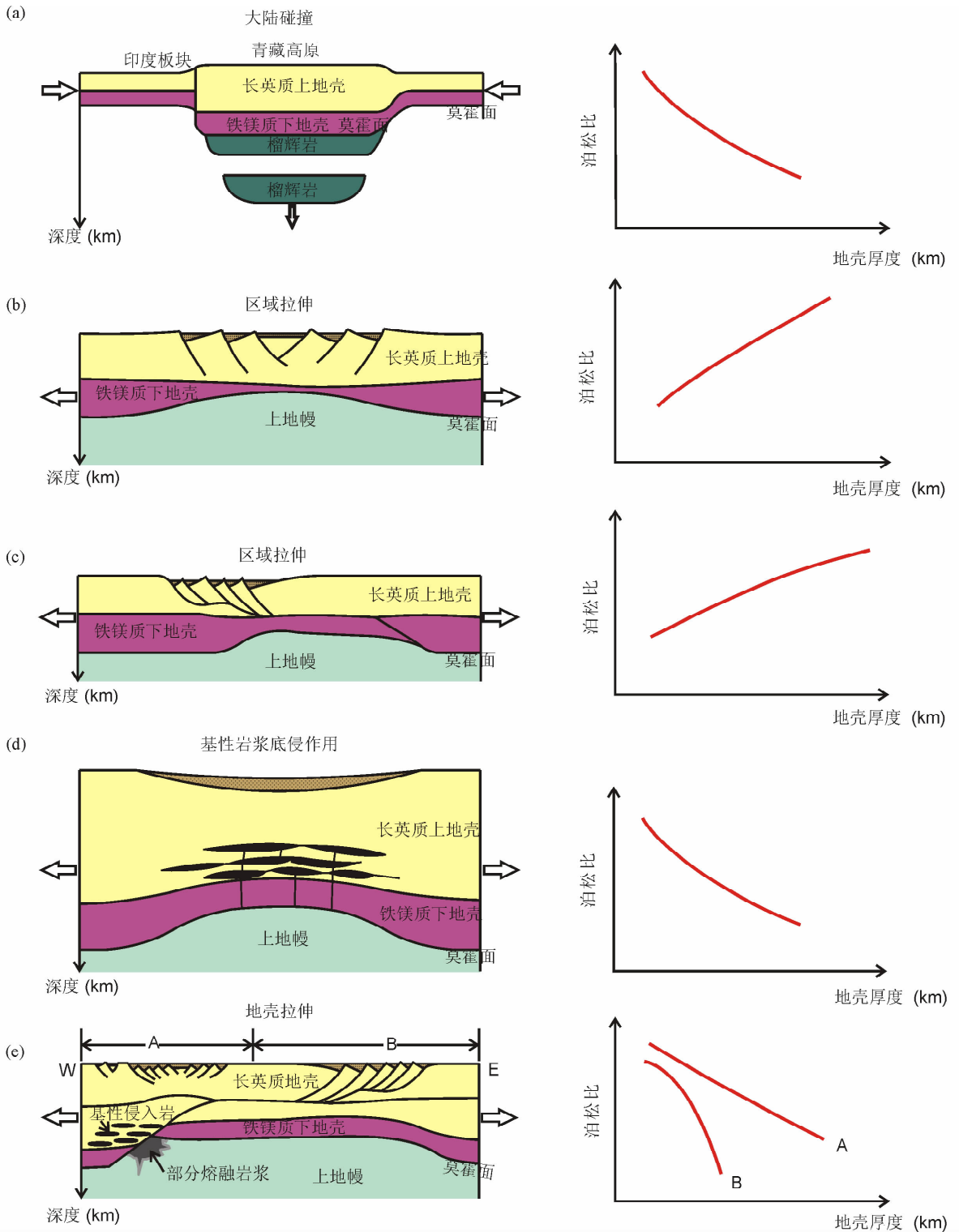


图 6 解释泊松比和地壳厚度相关性的流变学构造模式

Fig. 6 Rheology-based tectonic models for the interpretation of the correlation between crustal thickness and Poisson's ratio

(a) —地壳增厚与下地壳拆沉模式; (b) —对称伸展模式; (c) —非对称伸展模式; (d) —底侵模式; (e) —华北克拉通伸展分区模式
 (a) —Lower crustal delamination beneath a thickened crust; (b) —Symmetrical extension; (c) —Asymmetrical extension;
 (d) —Underplating; and (e) a model for the North China craton

英质岩石比起基性岩石更容易形成褶皱和推覆构造,其结果势必造成地壳泊松比随地壳厚度增加而减少(图 6a)。拆沉作用(Delamination)造成地壳中基性岩石相对减少,从而使得地壳泊松比减小(图 6a)。基性岩浆从莫霍面之下的上地幔底侵到大陆下地壳结晶成铁镁质侵入岩,造成地壳泊松比增加(图 6d)。地壳厚度和泊松比之间的负消长关系已发现出现在中国华南地块、拉萨地体、羌塘地体、松潘—甘孜地体以及印支地块(滇西)等地区(Ji et al., 2008)。

在华北的保定—大同和官厅水库—张家口—张北地区,地壳泊松比随地壳厚度增加作缓慢地线性减小,而在冀东北、辽西以及石家庄附近的太行山南部,泊松比随地壳厚度增加作非线性骤然陡降(图 4)。众所周知,华北克拉通岩石圈在中新生代时发生了强烈的伸展减薄。中国华北与世界上许多地区一样,地壳具双层结构,上地壳主要为长英质的酸性岩或中酸性岩,下地壳主要为铁镁质的基性岩(Gao et al., 1998)。如果在构造伸展作用下,韧性变形的下地壳的流动强度不仅比其上覆的上地壳而且比其下伏的上地幔的强度都要低(Ji and Xia, 2002; Ji, 2008),就像夹在上下两片烤面包之间的那层果酱。换句话说,在构造伸展作用下,如果下地壳比上地壳遭受了更大的减薄(图 6b,c),那么随着地壳整体厚度(即 Moho 面的深度)减小,基性下地壳比起长英质的上地壳发生了更加显著的减薄。其结果就会是,地壳的泊松比随地壳的厚度减小而降低,即泊松比和地壳厚度呈正消长关系(图 6b,c)。这明显有悖于华北地区的实际情况(图 4)。

在构造伸展作用下,随着地壳整体厚度减少,局部区域(如深大断裂和剪切带内)压力骤减,那里的上地幔可能发生部分熔融,形成的玄武岩浆底侵到其上方的深部地壳(图 6d),从而增加了地壳内基性岩的体积分数。在这种情况下,地壳的泊松比随地壳厚度的减小不但不减小反而增加(图 6d)。据此,我们有理由推测在华北的保定—大同和官厅水库—张家口—张北地区,中新生代时发生玄武岩浆底侵作用,而在华北其他地区如冀东北和石家庄附近的南太行山地区地壳的减薄主要集中于长英质的中上地壳之中(图 6e)。冀西北中新生代确实有玄武岩浆沿深大断裂喷溢至地表,这些地质资料和本文所述的地球物理数据吻合。由玄武岩浆底侵作用造成的地壳泊松比增加抵消了一部分由长英质中上地壳减薄造成的泊松比减小,两种作用的综合结果就造

成地壳泊松比随地壳厚度增加作缓慢地线性减小(图 6e 中的 A 线)。然而在冀东北、辽西以及石家庄附近的太行山南部,由于没有玄武岩浆的底侵作用,地壳减薄主要集中在长英质的中上地壳,所以泊松比随地壳厚度增加作非线性骤然陡降(图 6e 中的 B 线)。

3 结 论

(1)岩石圈中主要组成岩性展示非常有趣的泊松比随密度变化的总体趋势(图 2)。在 $\rho = 2.60 \sim 3.05 \text{ g/cm}^3$ 之间,泊松比随密度增加而增加,但当 $\rho > 3.05 \sim 3.10 \text{ g/cm}^3$ 时,泊松比反而随密度增加呈缓慢地减小。单矿岩(诸如石英岩、大理岩、灰岩、斜长岩和蛇纹岩等)明显地偏离了总的趋势线,蛇纹石化强烈的橄榄岩也偏离了该趋势线,而除此之外的其它所有常见岩性都位于或非常靠近这条趋势线。在长英质岩石如花岗岩、花岗闪长岩以及闪长岩中,岩石泊松比随密度增加而增加,这是因为石英($v = 0.08$)含量的增加不仅会使岩石的泊松比减小,而且也会使岩石的密度减小。斜长石中 An 含量的提高也会增加岩石的泊松比和密度。此外,由于蛇纹石化具有特别高的泊松比(图 1),蛇纹石化能显著地增加橄榄岩的泊松比。榴辉岩的泊松比主要反映所含石榴子石的化学成分以及退变质程度。这些结果将为利用岩石泊松比确定大陆地壳和上地幔矿物组成与化学成分提供有用的制约。

(2)在渤海湾西北的华北盆岭地区(北京市和河北省境内,图 3),高达 31% 的台站下面地壳的泊松比 $v \geq 0.28$ (铁镁质基性岩),还有 47% 的台站下面地壳的泊松比界于 0.26~0.28 之间(中性岩或长英质酸性岩与铁镁质基性岩的复合物)(图 5)。华北克拉通在中新生代是否发生过大规模的基性下地壳的折沉作用? 目前尚不能得出肯定的结论,至少没有得到许卫卫和郑天愉(2005)这批地壳泊松比资料的支持。

(3)由褶皱-逆冲推覆等构造挤压缩短作用造成的地壳增厚或基性下地壳折沉作用往往导致地壳整体泊松比随地壳厚度的增加而减小(图 6a),例如中国华南地块、拉萨地体、羌塘地体、松潘—甘孜地体以及印支地块(滇西)等地区(Ji et al., 2008)。在区域伸展(如大陆裂谷、盆岭)的构造拉张环境中,如果减薄主要发生于基性下地壳,则地壳整体泊松比随地壳厚度减小而减小(图 6b,c)。相反,如果地壳减薄仅集中于长英质的中上地壳,则地壳泊松比随

地壳厚度减小而增加(图 6e)。如果地壳减薄导致上地幔发生部分熔融,形成的玄武岩浆底侵到下地壳,冷却结晶成为铁镁质基性岩,其结果将会造成地壳整体泊松比随地壳厚度减小而增加(图 6d)。

(4)在冀东北、辽西以及石家庄附近的南太行山地区地壳泊松比随地壳厚度增加作非线性骤然陡降,说明在这些地区中新代地壳减薄作用主要集中于长英质的中上地壳(图 6e)。然而,在保定—大同和官厅水库—张家口—张北地区,地壳泊松比随地壳厚度增加作缓慢地线性减小,说明由玄武岩浆底侵作用造成的地壳泊松比增加抵消了一部分由长英质中上地壳减薄造成的泊松比减小。

致谢:加拿大自然科学与工程委员会(NSERC)、中国自然科学基金委员会海外杰出青年学者基金和中国科学院杰出海外学者基金提供资助。

参 考 文 献

嵇少丞,王茜,王勤,许志勤. 2007. 苏鲁—大别超高压变质岩的弹性力学性质与密度的关系. 岩石学报, 23 (12):3054~3064.

许卫卫,郑天愉. 2005. 渤海湾盆地北西盆地边界地区泊松比分布. 地球物理学报, 48 (5):1077~108.

Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research*, 101:3139~3156.

Gao S, Zhang B R, Jin Z M, Kern H, Luo T C, Zhao Z D. 1998. How mafic is the lower continental crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 161 (1~4):101~117.

Gercek H. 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44: 1~13.

Holbrook W S, Gajewski P, Krammer A, Prodehl C. 1988. An interpretation of wide-angle compressional and shear wave data in southwest Germany: Poisson's ratio and petrological implications. *Journal of Geophysical Research*, 93: 12081~12106.

Ji S C, Salisbury M H. 1993. Shear-wave velocities, anisotropy and

splitting in the high grade mylonites. *Tectonophysics*, 221: 453~473.

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, Xia B. 2002. *Rheology of Polyphase Earth Materials*. Montreal: Polytechnic International Press, 260.

Ji S C. 2008. *Deformation Mechanisms, Rheology, and Seismic Properties of Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 539.

Ji S C, Saruwatari K, Mainprice D, Wirch R, Xu Z Q, Xia B. 2003. Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultrahigh-pressure eclogites from Sulu region, China: Implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 370:49~76.

Lakes R S. 1987. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235: 1038~1040.

Mavko G, Mukerji T, Dyorkin J. 1998. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. New York: Cambridge University Press, 339.

Mishra O P, Zhao D P. 2003. Crack density, saturation rate and porosity at the 2001 Bhuj, India, earthquake hypocenter: A fluid-driven earthquake? *Earth and Planetary Science Letters*, 212:393~405.

Wang Z C, Ji S C. 1999. Deformation of silicate garnets: brittle-ductile transition and its geological implications. *Canadian Journal of Mineralogy*, 37:525~541.

Wang Z C, Ji S C. 2001. Elasticity of six polycrystalline silicate garnets at pressure up to 3.0 GPa. *American Mineralogist*, 86: 1209~1218.

Wilkins R, Simmons G, Caruso L. 1984. The ratio V_p/V_s as a discriminant of composition for siliceous limestones. *Geophysics*, 49:1850~1860.

Zandt G and Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 374:152~154.

Correlation between Crustal Thickness and Poisson's Ratio in the North China Craton and Its Implication for Lithospheric Thinning

JI Shaocheng¹⁾, WANG Qian¹⁾, YANG Wencai²⁾

1) *Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, école Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada;* 2) *Laboratory of Continental Geodynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract

Data of the crustal thickness and Poisson's ratio from 58 broadband seismic stations in the North China Craton, measured by Xu and Zheng (2005, Chinese Journal of Geophysics, 48, 1077~1084) using the techniques of teleseismic receiver functions, have been carefully examined. Two types of correlation between the crustal thickness (H) and Poisson's ratio (ν) have been observed; with decreasing H, ν increases gently and linearly in the Baoding-Datong and Guanting-Zhangjiakou-Zhangbei regions, while increasing abruptly and nonlinearly in the rest of the block (e. g., Northeastern Hebei province and the southern Taihangshan area near Shijiazhuang). The linear correlation is interpreted as due to the summed, opposing contribution of tectonic thinning of felsic crust and the addition of mafic rocks crystallized from underplated magmas to the bulk crustal ν . The abrupt increase of ν with decreasing H suggests that much larger thinning strains have taken place in the felsic upper and middle crust than in the mafic lower crust during Mesozoic-Cenozoic tectonic extension. It is further inferred that basaltic underplating has been localized mainly in the Zhangjiakou and adjacent regions.

Key words: North China craton; Poisson's ratio; Crustal composition; Lithospheric thinning; Underplating of mafic magma

《地质论评》被引次数最高的论文和作者

据《中国地学期刊网》(<http://www.geojournals.cn/>)统计,截至2009年1月,《地质论评》发表的论文,被引频次最高的前十名名单如下:

1. 徐嘉炜, 马国锋. 郯庐断裂带研究的十年回顾.《地质论评》,1992,38(4):316~324.

被引次数:112.

2. 赵越. 燕山地区中生代造山运动及构造演化.《地质论评》,1990,36(1):1~13.

被引次数:68.

3. 朱光, 徐嘉炜, 孙世群. 郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据.《地质论评》,1995,41(5):452~456.

被引次数:58.

4. 邓晋福, 赵国春. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山——深部过程.《地质论评》,2000,46(1):41~48.

被引次数:57.

5. 朱金初, 黄革非, 张佩华, 李福春, 饶冰. 湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究.《地质论评》,2003,49(3):245~252.

被引次数:50.

6. 和政军. 燕山—阴山地区晚侏罗世强烈推覆—隆升事件及沉积响应.《地质论评》,1998,44(4):407~418.

被引次数:49.

7. 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变.《地质论评》,2004,50(3):304~322.

被引次数:44.

8. 肖序常. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述.《地质论评》,1998,44(4):372~381.

被引次数:44.

9. 宗国洪, 王秉海. 济阳盆地中生代构造特征与油气.《地质论评》,1998,44(3):289~294.

被引次数:43.

10. 韩宝幅, 洪大卫. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长.《地质论评》,1998,44(4):396~404.

被引次数:41.

(注:本网站可以查询专家个人各个期刊发表的论文引文情况,欢迎使用)