岩石探针和地震探测手段约束华北深部地壳结构组成及演化

郑建平^{1*}, 夏冰^{1,2}, 平先权¹, 魏颖^{1,3}, 汤华云¹, 苏玉平¹, 马强¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

3. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

* 联系人, E-mail: jpzhang@cug.edu.cn

2020-09-23 收稿, 2021-01-20 修回, 2021-01-21 接受, 2021-02-10 网络版发表

国家自然科学基金(41930215)和国家重点基础研究发展计划(2006CB403503)资助

摘要 厘清大陆深部地壳形成、演化及其动力学过程, 对于了解板块构造、揭示壳幔相互作用至关重要. 针对华北深部地壳物质组成、结构及演化等问题, 本研究在限定其地震学结构特征基础上, 结合深部地壳岩石捕虏体的来源深度(定深)、化学和物理性质(定性)和形成年龄(定年)的研究成果, 构建了华北深部地壳多维度物理、化学结构模型. 结果表明: 华北陆块地壳厚度变化于30~48 km, 全地壳和地壳内部各层均呈现东薄西厚特征. 东、西部地壳虽然厚度上有明显差异, 但内部结构特征有一致性, 即整体上较少典型的高速基性下地壳, 平均P波波速(~ 6.3 km/s)、密度($2.72\sim 2.78$ g/cm³)并呈中性岩石特征. 深部地壳岩石捕虏体除斜长角闪岩外主要成分包括基性和酸性的麻粒岩. 中生代时期华北陆块部分地区地壳存在榴辉岩捕虏体, 指示了当时局部地区曾存在厚达45 km的地壳, 但现今地震学剖面并未显示; 此外, 有些地区(如汉诺坝)基性岩石捕虏体揭示出新生代基性岩浆底侵, 难以在地震学模型中识别. 因此, 岩石探针与地震探测结果的结合, 将更有助于全面认识深部地壳结构组成和演化.

关键词 地壳结构, 地震学, 深部地壳, 捕虏体, 岩石探针, 华北陆块

准确厘清深部地壳的岩石及其物理、化学特征, 对认识大陆地壳成分、研究大陆地壳的形成及演化具有重要意义. 与浅部地壳易于采样不同, 深部地壳的探索由于难以获得直接样品而更显曲折. 对于深部地壳研究, 地球物理学与岩石探针(特别是捕虏体的岩石地球化学)都是重要的手段, 但两者在针对性和分辨率上存在差别: 地球物理学可以构建大范围内现今地壳的深部物理结构模型, 但分辨率有限, 难以有效约束特定地点/小尺度的精细地壳结构; 岩石地球化学以高级变质岩(如地质体和捕虏体)为主要研究对象, 可以得到特定位置高精度的深部地壳结构、组成及年代学信息,

通过对岩石样品开展系统定深、定性和定年分析, 可以实现从几何学到动力学跨越, 但受制于样品出露局限, 难以形成大范围覆盖. 岩石物理与化学特征的相关性为地球物理学、岩石地球化学综合约束深部地壳结构组成及演化提供了重要依据(图1). 华北陆块(图2(a))作为岩石圈遭受后期强烈改造、壳幔解耦典型地区, 其深部地壳的结构组成特征如何? 在克拉通形成和破坏过程中深部地壳是否也发生相应的剧烈改变? 本研究根据地震学NC_{crust}地壳结构模型^[23]及深部地壳捕虏体的系统研究成果, 限定华北地块地壳物理、化学结构特征, 以便获取对华北深部地壳精细结构及其演化

引用格式: 郑建平, 夏冰, 平先权, 等. 岩石探针和地震探测手段约束华北深部地壳结构组成及演化. 科学通报, 2021, 66: 3018–3031

Zheng J P, Xia B, Ping X Q, et al. Rock probes and seismic methods to constrain the structure, composition and evolution of the deep crust beneath North China Block (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3018–3031, doi: [10.1360/TB-2020-1204](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1204)

图1 (网络版彩色)不同地壳岩石 SiO_2 含量与 V_p 、密度关系. 全球地壳物理/化学参数来源见文献[1–22]. 阴影表示95%置信区间
Figure 1 (Color online) SiO_2 versus V_p and density of different crustal rocks. Crustal physical/chemical parameters are from Refs. [1–22]. The shadings show the 95% confidence intervals

过程更完整的认识.

1 大陆地壳深部结构

太古宙陆块地壳形成时间早, 其物理、化学结构对了解大陆形成和演化至关重要. 岩石地球化学研究揭示, 新太古代时期地壳化学组成整体由镁铁质向长英质演化, 指示其形成背景改变与板块构造起源等重大科学问题密切相关[24–27]. 区域地震学研究显示, 全球太古宙克拉通地区地壳厚度变化范围较大, 而且内部结构也不尽相同. 例如就地壳厚度而言: 澳大利亚西部Pilbara克拉通约为30 km[26], 南非Kaapvaal克拉通为36–40 km[28], 印度Dharwar克拉通为45–50 km[29], 就高速的下部地壳在全地壳中所占比例看, Pilbara克拉通、Kaapvaal克拉通及部分Dharwar克拉通只有低速的($V_p < 6.8 \text{ km/s}$)上部地壳, 而Ukraine地盾、Wyoming克拉通、Superior地盾部分地区则存在巨厚高速(V_p

$> 6.8 \text{ km/s}$)甚至超高速($V_p > 7.2 \text{ km/s}$)的下地壳[30]. 高温高压实验岩石学研究揭示, 具高 V_p 的下地壳主要由基性岩组成, 其所占比例直接影响全地壳的平均化学组成.

地球物理观测结合深部地壳捕虏体岩石学地球化学的研究, 是全面认识地壳结构、组成及演化的重要方法. 地球物理学方法中, 被动源地震宽角反射/折射剖面具有高分辨率的P波速度结构特征. 根据P波波速的变化, 可以将大陆地壳分为上、中、下三部分(图1(a)): 其中上地壳波速 $< 6.4 \text{ km/s}$, 对应长英质的岩石组成; 中地壳波速为 $6.4 \sim 6.8 \text{ km/s}$, 化学组成上呈中性; 下地壳波速 $> 6.8 \text{ km/s}$, 通常为基性岩石. 部分地区由于深部地壳石榴石含量较高致使波速 $> 7.2 \text{ km/s}$; 此外, 由于榴辉岩与橄榄岩有相近波速值, 地震学有时难以区分[31]. 总体而言, 通过P波波速及其与密度和成分关系所得到地壳总体偏中性的化学组成特征, 与岩石捕虏体得到的结果一致(图1(b)). 岩石学上根据深度及岩石变质程度(变质相)对地壳进行划分, 包括结晶的上地壳($< 10 \sim 15 \text{ km}$), 主要由花岗岩类及低级变质岩组成; 中地壳(介于 $10 \sim 15$ 与 $20 \sim 25 \text{ km}$ 之间)为片麻岩类、角闪岩类等中级变质岩; 下地壳($> 20 \sim 25 \text{ km}$)主要为麻粒岩等高级变质岩[32]. 无疑, 中-高级变质岩石是示踪深部地壳生长和演化的关键样品. 火成岩携带的深源捕虏体, 包括麻粒岩、角闪岩、变辉长岩、辉石岩等中、高级变质岩, 是来自深部地壳的直接样品[33], 记录着深部地壳原位信息. 对捕虏体开展系统研究, 可以重建大陆下地壳的组成和精细结构[34], 揭示大陆下地壳的形成和演化历史[35–37].

2 地震学 NC_{crust} 地壳结构模型及结果

地壳结构参数中的Moho面深度模型, 通常可通过人工源宽角反射/折射地震剖面、天然地震层析成像、接收函数及重力反演等多种方法获得. 对于地壳内部结构(如各层的平均速度及厚度), 相对于天然地震方法, 人工源宽角反射/折射地震剖面可以获取更高的分辨率, 是限定地壳绝对速度结构的有效方法. 同时, 通过地壳厚度、波速特征计算可以进一步得到密度并在一定程度上反映地壳整体组成.

近年来, 我国学者通过多种地震学方法得到Moho面深度模型(表1). 例如, 通过分析41条总长度约36000 km折反射剖面数据, Li和Mooney[44]发表了中国大陆Moho面深度分布图; 随着统计剖面数增至90条,

图 2 华北陆块地质地球物理背景. (a) 构造单元、构造分区及深部地壳捕虏体出露位置. (b) 用来限定 NC_{crust} 模型用到的地震剖面分布及接收函数台站分布. 蓝色短线代表剖面完成于1990年以前, 黄色短线说明剖面完成于1990–2005年, 红色短线代表2005年之后完成剖面, 绿点为控制Moho面深度的接收函数台站(含永久台站与临时台站), 修改自文献[23]

Figure 2 Geological and geophysical background of the North China Block. (a) Tectonic units, structural divisions and exposure locations of the deep crustal xenoliths. (b) Locations of wide-angle reflection/refraction seismic profiles and receiver function stations used to constrain the NC_{crust} model. The short lines in blue mean that the sections were completed before 1990, those in yellow and red indicate that the sections were completed during 1990–2005 and after 2005, respectively. The green dots are receiver function stations (including permanent and temporary ones) that constrain the Moho depths. The figures were modified after Ref. [23]

表 1 华北及全国地壳结构模型列表

Table 1 Summary of crustal model for North China Block and China

地壳模型	覆盖范围	剖面数量	文献
NC _{crust}	30°~45°N, 100°~130°E	65	[23]
Duan16	36°~42°N, 112°~120°E	42	[38]
Wei07	31.5°~38°N, 104°~112°E	14	[39]
Jia05	32°~42°N, 106°~125°E	18	[40]
Li01	39°~41°N, 114°~119°E	6	[41]
Zhang11	全国	65	[42]
Li06	全国	90	[43]
Li98	全国	41	[44]
Gao98	全国	18	[42]

Li等人^[43]更新了此前的Moho面深度结果。随后,通过对中国大陆及周边日本、韩国等地区114条的深地震剖面数据分析,更全面的成果得到展示^[45]。与此同时,通过天然地震接收函数方法对中国大陆约800台站>80000次远震事件分析,也建立相应的Moho面深度模型^[46~48]。

除Moho面深度取得丰富成果外,近年我国在地壳速度结构方面也取得长足进展。例如,对有密集剖面穿过的首都圈地区,经处理得到了局域的地壳速度结构模型^[38,39,41,49]。此外,利用近30条约20000 km人工地震宽角反射/折射资料,得到华北内部双层地壳结构模型^[40]。Gao等人^[42]首先提出中国大陆不同构造区可能由上地壳、中地壳、下地壳上和下层地壳等4层结构组成的构想。通过分析全国90条宽角反射/折射剖面,得到了14个典型构造单元的地壳结构^[43]。根据对全国344个中-新生代沉积盆地分析资料,结合地震测深剖面数据成果,得到了包括我国主要前寒武陆块及其周边造山带沉积层厚度的内部地壳结构复合模型^[50]。从表2列示的华北主要地壳速度结构和Moho面深度结果看,它们总体上局域范围小,或即使范围大甚至涉及全国但受制于剖面数量控制,而且得到的常常是某一地区的平均地壳结构等特点。

基于上述现状,本研究利用更全面的剖面结果,尤其是近年所发表的超长距离剖面资料,构建了NC_{crust}地壳结构模型。NC_{crust}模型采取统一的划分方案,有利于进行全球地壳模型对比。该模型所使用基础数据是截至2018年12月在东经100°~130°、北纬30°~45°范围内可获取数据的所有深地震折射剖面结果(图2(b)),其中Moho面深度限定结合部分天然地震接收函数成果,具

体方法详见文献^[23]。NC_{crust}模型包括Moho面深度和地壳内部结构(沉积盖层以及上、中、下地壳4层结构的厚度和它们的P波速度),横向分辨率为0.25°,4层地壳结构模型P波速度特征如下:沉积层:<5.8 km/s,上地壳:5.8~6.4 km/s,中地壳:6.4~6.8 km/s,下地壳:6.8~7.3 km/s。

下地壳采取定义方案为 $V_p=6.8\sim7.3$ km/s:(1)与高温高压实验测得全球^[1~20]及华北陆块^[21,22]基性岩石P波波速一致(图1(a));(2)也与全球地壳模型^[31]及其他区域地壳模型相符^[51,52]。通过对NC_{crust}模型结果进行详细分析(表2,图3和4),可以得到:

(1)东部陆块地壳较薄(30~36 km)、西部陆块较厚(平均为~44 km),并表现为自东向西增加的趋势,但是全地壳平均P波波速变化不明显而且偏低,为6.30~6.40 km/s。通过SiO₂含量与P波波速相关关系计算可知,华北地壳整体偏中酸性(图1(a))。根据 V_p - ρ 相互关系^[52],

表 2 华北地壳地球物理结构相关参数

Table 2 Typical crustal structure in the North China Block

块体名称	Moho面深度(km)		地壳P波波速(km/s)	
	平均值	误差	平均值	误差
华北整体	38.5	5.6	6.34	0.04
华北东部	33.3	1.2	6.33	0.02
中部过渡区	37.2	2.4	6.33	0.04
华北西部	44.9	3.1	6.37	0.04

图 3 (网络版彩色)华北陆块及不同部位地壳结构图。修改自文献^[23]
Figure 3 (Color online) Crustal seismic velocity sections of different parts of the North China Block. Modified after Ref. [23]

图4 根据 NC_{crust} 得到两条典型地壳厚度剖面

Figure 4 Typical crustal cross sections based on the NC_{crust}

计算得到的全地壳密度为 $2.72 \sim 2.78$ g/cm³, 也进一步验证华北地块地壳整体偏中酸性的组成特征(图1(b)).

(2) 华北上地壳、中地壳和下地壳的平均P波波速分别为 $6.05 \sim 6.20$ 、 $6.50 \sim 6.65$ 和 < 6.90 km/s, 并且显示出与Moho面深度类似的东薄、西厚特征. 例如: 上地壳由东段的 $16 \sim 20$ km逐渐增加至西段的 $20 \sim 24$ km; 中地壳厚度自东部块体 $10 \sim 14$ km, 西部块体厚达 $15 \sim 22$ km;

下地壳东部大部分地区厚度为 < 2 km, 而西部块体下地壳厚度变化于 $4 \sim 5$ km.

(3) 如果以P波波速为 $6.8 \sim 7.3$ km/s来定义地震学下地壳^[31], 那么东部陆块和中部过渡区的地震学下地壳很薄(< 2 km). 此外, 虽然西部陆块下地壳厚于东部陆块, 但也只占全地壳的12%, 远低于全球平均大陆下地壳 $\sim 30\%$ 的比例^[51]. 这种较高密度的基性下地壳普遍偏

薄,进一步印证华北陆块全地壳偏长英质-中性的地球化学特征。

3 岩石探针揭示深部地壳结构

火成岩携带的深部地壳捕虏体为构建岩石学地壳结构提供了直接的物质基础。对于华北古生代金伯利岩等以及中生代、新生代火成岩中的深部地壳捕虏体(图2(a))已有详细工作介绍^[37,53,54]。根据岩石类型、矿物组成间的平衡温度和压力条件建立了不同时代、位置的深部地壳结构,总结于表3。

3.1 古生代

古生代金伯利岩及钾镁煌斑岩中的深部地壳捕虏体使得构建华北地块这一时期岩石学深部地壳结构成为可能。华北克拉通东部的辽宁复县金伯利岩喷发年龄为~480 Ma^[68,69],所携带的深部地壳捕虏体是基性的,主要为石榴石麻粒岩并含有少量辉石角闪岩、变辉长岩、斜长岩和辉石岩^[55]。这些镁铁质麻粒岩被认为是新太古代(2.8~2.5 Ga)岩浆底侵并先后经历古元古代和新元古代两期变质作用的产物^[37,55]。中部过渡区山西应县钾镁煌斑岩中的深部地壳捕虏体主要是角闪岩^[37]。锆石年代学和Hf同位素揭示这些角闪岩经历了古元古代的变质作用且其原岩形成时代可能追溯到2.2 Ga^[37]。总体上,这些捕虏体代表了华北太古代-古元古代时期的深部地壳物质。例如,复县金伯利岩中辉石角闪岩平衡温度和压力(以下简称平衡温压)为744~821°C、0.76~0.88 GPa^[55],对应深度约为25~30 km;石榴石辉石岩的变质作用程度相对高于辉石角闪岩,特别是石榴石的存在暗示其形成位置应该略大于30 km。因此,可以推测古生代华北东部及腹部地区的地壳厚度约为30~35 km,与现今地震学约束的Moho面深度位置是一致的,其原因可能包括:(1) 这些地区自古生代至今未受改造;(2) 受到一定程度的改造,但未能剧烈地改变地壳厚度(如>5 km);(3) 地壳经历过多阶段、多期次的改造,厚度最后均衡了。

3.2 中生代

华北陆块中生代深部地壳捕虏体在北缘、南缘、东缘均有分布。北缘包括在赤峰和宁城早中生代闪长岩(~227 Ma^[56])中发现的二辉石麻粒岩及少量单斜辉石麻粒岩、紫苏辉石麻粒岩和斜长角闪岩^[56,70],阜新晚中生代玄武岩(100~92 Ma)中发现的麻粒岩、二长

岩^[37,71],四子王旗玄武岩(128~108 Ma)中含有的二辉麻粒岩^[72]。南缘及东南缘捕虏体在数量和种类上更加丰富,包括信阳晚中生代火山岩中的榴辉岩、麻粒岩、变辉长岩和辉石岩^[34],徐淮闪长岩中麻粒岩、角闪岩、辉石岩及榴辉岩^[59,60,73],青岛、莒南晚中生代晚期火山岩中携带的麻粒岩、辉石岩^[61,62,74]。其中,信阳、徐淮及青岛莒南等地区丰富的捕虏体类型及研究基础,可以较好地构建完整的深部地壳结构。

信阳地区基性火山碎屑岩(~160 Ma)岩筒中的角闪岩、麻粒岩及榴辉岩等多种深部地壳捕虏体,捕获深度范围为20~45 km。结合岩石平衡温压及年代学,Zheng等人^[34]建立了该区详细的中生代地壳及壳幔边界岩石组成及演化模型。其中,长英质麻粒岩捕虏体的锆石研究显示该地区存在3.82~3.65 Ga的地壳物质^[57,75],并在随后经历新太古代到古元古代多阶段的增生和再造^[57];榴辉岩和蛇纹石化橄榄岩则记录了古生代(387~330 Ma)和中生代(220 Ma)的变质和交代年龄^[34]。丰富的捕虏体年代学数据揭示出信阳深部地壳由浅至深存在年轻化趋势。根据地表出露岩石推测,地表为新太古代太华群(年龄~2.85 Ga)覆盖,浅部地壳主要由绿片岩相岩石和花岗岩等而成^[76]。中地壳(20~25 km)以斜长角闪片岩、斜长角闪片麻岩等角闪岩相变质岩代表。深部地壳由麻粒岩相岩石组成,主体为基性麻粒岩、石榴石角闪岩,并有少量中性麻粒岩、长英质麻粒岩、辉石岩、变辉长岩等。其中,基性麻粒岩温度和压力约束地壳厚度为41~52 km,榴辉岩捕虏体(平衡温压为800°C及1.3~1.7 Ga)的出现同样揭示了地壳厚度>45 km^[58]。

徐淮地区闪长岩(~132 Ma)携带的捕虏体深度位于25~45 km,大致可分为麻粒岩类(石榴石麻粒岩/含石榴石麻粒岩)、辉石岩类(含尖晶石的石榴石单斜辉石岩/金云母单斜辉石岩/尖晶石辉石岩)、角闪岩类(石榴石角闪岩或斜长角闪岩、片麻状角闪岩等)/片麻岩类(镁铁质片麻岩和含石榴子石的长英质片麻岩)^[59],并有榴辉岩报道^[60]。其中片麻岩类、角闪岩类岩石平衡温压条件为660~705°C、0.6~0.8 GPa,对应深度约为22~30 km;麻粒岩对应于33~40 km的深度,榴辉岩平衡温压为800~1060°C及>1.5 GPa,对应地壳深度为>45 km。这些在结构和深度上均与信阳地区相似。Xu等人^[60]认为榴辉岩捕虏体的产出暗示晚中生代以前华北克拉通东部曾经历一次重要的陆壳加厚过程,可能与扬子克拉通向华北克拉通俯冲有关。

表 3 华北陆块深部地壳捕虏体岩石组合、平衡温压和形成时代综合表

Table 3 Comprehensive data of rock assemblages, equilibrium temperatures and pressures and formation ages of the deep crustal xenoliths from North China Block

	岩石组合	平衡温压	深度(km)	SiO ₂ (wt%)	锆石年龄(Ma)	锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	文献
古生代							
复县 (122°10'E, 38°30'N)	辉石角闪岩、 变辉长岩、 斜长岩、 石榴辉石岩	744~821°C	25~30	47.3~49.9	上交点: 2601~2498	太古代: +12~+0.8	[55]
		0.76~0.88 GPa			下交点: 605; 1789~1904	古元古: -11.8~+7.4	[56]
					谐和点: 2610~2580	新元古: -34~-7	[55]
晚中生代早期							
信阳 (113°53.4'E, 32°33.4'N)	斜长角闪片岩、 斜长角闪片麻岩	460~577°C	20~25				[34]
		0.6~0.64 GPa					
	变辉长岩、 长英质麻粒岩、 中性麻粒岩	740~784°C	30~35	44.0~45.6	上交点: 3817~1958	太古代: -47~+3.2	[57]
		0.9~1.1 GPa		71.0~75.4	下交点: 2143~1722	元古代: -26.1~+4.2	[34]
					谐和点: 327~160; 2050~1415	古生代: -22.9	[34]
						中生代: -1.7~+1.2	[34]
	基性麻粒岩	765~890°C	41~52	46.1~49.1	上交点: 1915~1685	元古代: -16.5~+14.7	[34,58]
1.3~1.6 GPa				下交点: 330		[34]	
	榴辉岩		>45	47.7	谐和点: 1950~1585; 857~160		[34]
					谐和点: 2000~1816; 363~284	元古代: -2.6~+0.7	[34,58]
						古生代: -25.1~-18.9	
徐淮 (116°58.7'E,33°38.4'N)	片麻岩类/ 角闪岩类	660~705°C	20~25	37.9~67.1	谐和点: 393; 2631~1805	太古代: +11~+1	[59]
		0.6~0.8 GPa				元古代: +10.3~-3.9	
	麻粒岩类	794~892°C	30~35	42.0~48.1	谐和点: 1607~2529	古生代: +0.5	[59]
		1.0~1.5 GPa					
	榴辉岩	800~1060°C	>45		谐和点: 2519		[60]
		>1.5 GPa					
晚中生代晚期							
青岛 (120°23.0'E, 36°4.0'N)	富辉石麻粒岩、 富长石麻粒岩	860~890°C	33~36				[61]
		1.0~1.2 GPa					
莒南 (118°50.1'E, 35°10.5'N)	二辉石麻粒岩、 石榴石麻粒岩	806~920°C	30~35	45.2~57.9	上交点: 2354~1887	元古代: -17.1~-2.7	[62]
		0.9~1.1 GPa			谐和点: 122	中生代: -17.4、 +3.1、+8.4	
新生代							
汉诺坝 (114°33.2'E, 40°59.5'N)	变沉积岩	750°C	25~33		下交点: 105		[63,64]
		~1.1 GPa					
	长英质麻粒岩	750~785°C	25~33	53.2~73.0	上交点: 2548~1750	太古代: +2.5~+18.3	[65]
		0.7~1.1 GPa			下交点: 88~129	元古代: -16.1~+10.1	
	基性麻粒岩	800~950°C	33~38	44.2~54.8	谐和点: 1817~2447 ; 91~180	中生代: -46.5~-19.8	[53]
		0.8~1.4 GPa			下交点: 45	古生代: +1.2~+3.7	[65]
					谐和点: 45~539; 844~2669	中生代: -23~-20.1	
						新生代: +3.5~+8.2	
女山 (117°59.4'E, 32°46.6'N)	长英质、中性、 基性麻粒岩	887~1080°C	~42	44.9~50.9	上交点: 2715	太古代: +4~+8.1	[53]
		1.1~1.5 GPa			下交点: 45~47	中生代: -1.4, -8.5	[65]
					谐和点: 45~229; 1851~2752	新生代: +3.8~+13.4	
女山 (117°59.4'E, 32°46.6'N)	长英质、中性、 基性麻粒岩	830~869°C	20~30	46.4~55.3	上交点: 2700~1915	太古代: -4.8~-3.0	[66,67]
		0.6~0.95 GPa			谐和点: 117~140; 2282~1949	元古代: -18.8~-15.4	[57]

青岛基性脉岩(~86 Ma)携带富辉石及富长石两类麻粒岩捕虏体平衡温压为860~890°C和0.99~1.17 GPa, 对应的形成深度约为33~36 km^[61]。莒南(67 Ma)玄武质脉岩中携带的二辉石麻粒岩及石榴石麻粒岩具有相似的平衡温压, 为806~920°C及0.86~1.12 GPa, 对应深度约为28~35 km^[62]。结合前人研究成果, Tang等人^[74]揭示莒南下地壳由两部分组成: 上部由镁铁质-中性麻粒岩组成, 形成于古元古代早期(2.3 Ga), 并经历了古元古代晚期(2.0~1.8 Ga)热事件改造; 而下地壳下部主要由堆晶辉石岩组成, 其岩浆来源可能与被再循环的扬子克拉通下地壳强烈改造的地幔或古特提斯洋壳释放熔体交代的富集岩石圈地幔有关^[77]。华北克拉通东南部约2.3~2.1 Ga下地壳的发现表明了整个华北克拉通东部前寒武纪下地壳的不均一性。

3.3 新生代

汉诺坝、女山、鹤壁等地新生代火山岩都携带深部地壳捕虏体, 其中河北汉诺坝深部地壳捕虏体类型最为多样, 包括基性麻粒岩(含或不含石榴石)、中性麻粒岩、酸性麻粒岩、辉石岩等^[65], 是我国新生代深部地壳结构及演化研究成果最丰富的地区。汉诺坝深源捕虏体的成因复杂, 除部分富辉石的麻粒岩被认为是中生代下地壳重熔的残留^[78]外, 多数镁铁质麻粒岩代表了中生代(140~120 Ma)和新生代(47~45 Ma)的幔源岩浆底侵产物, 而长英质麻粒岩多为下地壳重熔后的结晶-变质产物^[63,79]。此外, 也有部分麻粒岩捕虏体的原岩形成于新太古代(2.7~2.5 Ga), 代表早期的下地壳物质^[80,81]。根据捕虏体的岩相学及岩石温度和压力研究, 综合岩石地球化学和年代学结果, 前人建立了汉诺坝地区详细的深部地壳岩石学模型^[64,65,82]。

整体上, 河北汉诺坝(华北中北部)深部地壳捕虏体来源深度为24~42 km, 结合周边麻粒岩地质体的相关研究, 可以将该地区下地壳划分为主体年龄和岩性不同的三部分。下地壳上部(24~33 km)由酸性(长英质)麻粒岩组成, SiO₂平均含量为62.1wt%, 其主体年龄为2.7~2.5 Ga, 局部受到140~120 Ma的底侵作用改造。下地壳中部(33~38 km)主要由镁铁质麻粒岩组成, 既包括以地质体为代表的太古代-古元古代麻粒岩, 也含有以捕虏体为代表的晚中生代镁铁质麻粒岩。下地壳底部(38~42 km)绝大部分被晚中-新生代底侵及变质产物置换, 以镁铁质麻粒岩和辉石岩捕虏体为代表。中部和底部镁铁质岩石的地球化学组成与形成时间没有明显的

相关性, 其SiO₂平均含量约为48wt%。整体而言, 汉诺坝深部地壳捕虏体的SiO₂含量约为58wt%, 与根据地表岩石估算的中国东部下地壳SiO₂含量相似^[42]。

安徽女山(华北东南端)玄武岩携带的镁铁质和中性麻粒岩平衡温压分别为830~869°C和0.60~0.95 GPa, 对应深度为20~30 km, SiO₂含量为46.4wt%~55.3wt%^[66]。结合计算波速和年代学, Ping等人^[67]构建了该区详细的新生代深部地壳岩石组成及演化模型。其中来自中地壳底部到上地壳顶部的长英质麻粒岩的计算纵波速度为6.32 km/s, 形成于新太古代(2716±32 Ma), 并于古元古代(2100 Ma)遭受热事件改造。长英质麻粒岩之下的中性麻粒岩的计算波速 V_p =6.53 km/s, 且形成于古元古代(2.1~1.9 Ga)。最下部的镁铁质麻粒岩具有的计算纵波波速为6.86 km/s, 且主体形成于晚中生代(~115 Ma), 并可能遭受了新生代热事件的影响^[37,67]。地壳的垂向结构表明女山下地壳的岩石随着深度增加逐渐变年轻, 反映了地壳的垂向增生过程。

河南鹤壁(华北中部)玄武岩中携带的深部地壳捕虏体有片麻岩、角闪岩和长英质麻粒岩。锆石年代学及Hf同位素研究显示, 这三类捕虏体的源区物质起源于新太古代早期(2.8~2.7 Ga), 并于新太古代晚期(2.6~2.5 Ga)部分熔融形成, 最后在中元古代晚期(1.7~1.6 Ga)遭受热事件改造。这些捕虏体的年龄与该区橄榄岩捕虏体中硫化物Re-Os同位素的年龄(2.6~1.8 Ga)基本一致, 表明该区深部岩石圈基本上未受到中元古代以来构造热事件的显著影响。

4 地震学与岩石学的深部地壳结构对比

地震学研究结果揭示华北陆块地壳东薄、西厚(图4), 整体变化为33~48 km, 且缺乏典型基性的高速(>6.8 km/s)下地壳, 平均地壳密度为<2.8 g/cm³, 速度及密度结构在一定程度上反映了地壳整体呈长英质-中性的特征。新生代火成岩携带的深部地壳捕虏体化学特征揭示深部地壳SiO₂含量约为55wt%~60wt%, 整体呈中性甚至偏酸性, 与依据波速、密度推测深部地壳性质一致。地表采样地球化学研究结果表明, 华北地区中上地壳呈中酸性^[83]。此外, 华北地壳的化学成分不存在明显的横向变化, 即东部、中部和西部地区具有相似的化学组成(SiO₂为61.2wt%~62.8wt%^[84])。

尽管华北陆块新生代不同位置火成岩携带的深部地壳捕虏体约束的地壳厚度与地震学结果总体相吻合, 但也有一些差别。例如, 深部地壳岩石捕虏体给出了非

常精细的深部地壳结构和物质组成以及形成过程的细节^[27,34],但地震学还难以有这样的约束.再如,信阳、徐淮地区深部地壳捕虏体产出有榴辉岩类,揭示中生代时期,这些地区地壳可能厚达45 km,且捕虏体记录年龄与苏鲁-大别造山带中榴辉岩年龄一致^[85],这两个区域地壳在中生代时期可能受华北与扬子陆块碰撞影响而导致地壳增厚.这两个地区岩石学限定的中生代地壳厚度比现代地震学给出的现代地壳厚约10~15 km.这种差异产生的可能原因是:(1)以高密度榴辉岩为主的巨厚下地壳在中生代后被移除(如拆沉);(2)榴辉岩波速与地幔橄榄岩相近,导致地震学识别Moho面位于榴辉岩层上方而不是榴辉岩与橄榄岩界面^[23].此外,尽管汉诺坝、女山等地新生代火山岩中的深部地壳捕虏体所约束的地壳厚度与地震学结果相似,但是捕虏体有较明显的基性岩浆底侵事件^[37,53],而地震速度结构无法表达这些过程的发生,同时由于基性岩浆底侵作用往往造成地震速度结构上的高速下地壳层^[86]存在.这可能与如下原因有关:(1)底侵范围及规模均较小,未达到地震学分辨率;女山地区,虽然捕虏体证据揭示了中生代岩浆底侵事件,且这一地区有地震剖面穿过,但地震剖面工作开展较早或剖面长度较短,较低的分辨率难以精确约束下地壳波速;(2)底侵基性岩经历变质作用后含石榴石,导致波速与橄榄岩相似;例如汉诺坝部分石榴石辉石岩、石榴石麻粒岩捕虏体实测P波波速高达7.6 km/s(图1),与橄榄岩的波速7.8~8.2 km/s较为接近;(3)底侵岩浆多来自辉石岩/角闪岩等地幔交代岩的部分熔融,具有相对较高的SiO₂含量.

总之,地震探测、岩石探针结果既有一致性也存在差别,它们是认识深部地壳物理、化学结构的重要互补手段.其中地震探测方法可以获取大范围地壳整

体及内部速度与厚度等信息,但对某一地区地壳结构细节难以有效约束.岩石探针方法在某一地区具有较高的分辨率并且得到深部地壳直接样品,可以给出地震探测无法得到的物质实体(例如榴辉岩等高速地壳信息).此外,深部地壳捕虏体对特定区域地壳岩石结构及演化历史有更好的约束,特别是通过不同时代火山活动所捕获的深部地壳物质,对于地质历史时期演化动力学具有重要意义.把岩石探针和地震探测有机结合的多学科综合研究,特别是把岩石圈地幔的研究结果^[87]结合起来,可以在一定程度上,对整个区域的深部地壳结构甚至整个岩石圈结构及地质演化过程提供更好的约束.

5 主要认识

(1) 华北陆块地壳厚度整体变化位于33~48 km,且无论地壳还是内部各层均具有东薄、西厚的特征.地块内部整体速度与密度偏低,深部地壳岩石捕虏体以角闪岩相与麻粒岩相为主体,地球化学和地球物理学均揭示华北整体地壳呈中性-长英质的组成特征,与全球大陆地壳特别是深部地壳的特征也偏中性有一致性.

(2) 受华北陆块外围俯冲碰撞作用及深部过程影响,华北南缘部分地区中生代可能存在榴辉岩以及新生代多地捕虏体记载着基性岩浆底侵作用,但地震探测结果未能有效揭示这一现象,可能与地震探测的分辨率和/或下地壳的复杂演化过程相关.

(3) 地震学与岩石学方法之间的互补研究是认识深部地壳物理、化学结构的重要手段,但各具优缺点.把它们有机结合起来的多学科综合研究,优势互补,可以在一定程度上,获得整个区域更全面的深部地壳结构及地质演化过程信息.

致谢 感谢中国地震局地球物理勘探中心林吉焱工程师在折射剖面数据处理中的帮助及中国地质大学(武汉)刘庆生教授和两位评审专家的宝贵修改建议.

参考文献

- 1 Kern H, Richter A. Temperature derivatives of compressional and shear wave velocities in crustal and mantle rocks at 6 kbar confining pressure. *J Geophys*, 1981, 49: 47–56
- 2 Kern H, Schenk V. A model of velocity structure beneath Calabria, southern Italy, based on laboratory data. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 325–337
- 3 Kern H, Schenk V. Elastic wave velocities in rocks from a lower crustal section in southern Calabria (Italy). *Phys Earth Planet Inter*, 1985, 40: 147–160
- 4 Kern H, Walther C, Flüh E R, et al. Seismic properties of rocks exposed in the POLAR profile region—Constraints on the interpretation of the

- refraction data. [Precambrian Res](#), 1993, 64: 169–187
- 5 Kern H, Tubia J M. Pressure and temperature dependence of P- and S-wave velocities, seismic anisotropy and density of sheared rocks from the Sierra Alpujata massif (Ronda peridotites, Southern Spain). [Earth Planet Sci Lett](#), 1993, 119: 191–205
- 6 Kern H, Gao S, Jin Z M, et al. 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](#), 1999, 301: 191–215
- 7 Kern H, Popp T, Gorbatshevich F, et al. Pressure and temperature dependence of V_P and V_S in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy. [Tectonophysics](#), 2001, 338: 113–134
- 8 Fountain D M, Salisbury M H. Seismic properties of rock samples from the Pikwitonei granulite belt—God’s Lake domain crustal cross section, Manitoba. [Can J Earth Sci](#), 1996, 33: 757–768
- 9 Fountain D M, Salisbury M H, Percival J. Seismic structure of the continental crust based on rock velocity measurements from the Kapuskasing Uplift. [J Geophys Res](#), 1990, 95: 1167–1186
- 10 Burke M M, Fountain D M. Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust—New laboratory measurements from the Ivrea Zone. [Tectonophysics](#), 1990, 182: 119–146
- 11 Ji S C, Shao T B, Michibayashi K, et al. A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics, and elastic moduli of amphibole-rich rocks. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2013, 118: 4699–4728
- 12 Ji S C, Wang Q, Marcotte D, et al. P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure. [J Geophys Res](#), 2007, 112: B09204
- 13 Ji S C, Wang Q, Salisbury M H, et al. P-wave velocities and anisotropy of typical rocks from the Yunkai Mts. (Guangdong and Guangxi, China) and constraints on the composition of the crust beneath the South China Sea. [J Asian Earth Sci](#), 2016, 131: 40–61
- 14 Ji S C, Wang Q, Shao T B, et al. S-wave velocities and anisotropy of typical rocks from Yunkai metamorphic complex and constraints on the composition of the crust beneath Southern China. [Tectonophysics](#), 2016, 686: 27–50
- 15 Wang Q, Ji S C, Salisbury M H, et al. 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](#), 2005, 398: 67–99
- 16 Wang Q, Ji S C, Salisbury M H, et al. Shear wave properties and Poisson’s ratios of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt, China: Implications for crustal composition. [J Geophys Res](#), 2005, 110: B08208
- 17 Sun S S, Ji S C, Wang Q, et al. Seismic properties of the Longmen Shan complex: Implications for the moment magnitude of the great 2008 Wenchuan earthquake in China. [Tectonophysics](#), 2012, 564-565: 68–82
- 18 Sun S S, Ji S C, Wang Q, et al. Seismic velocities and anisotropy of core samples from the Chinese Continental Scientific Drilling borehole in the Sulu UHP terrane, eastern China. [J Geophys Res-Solid Earth](#), 2012, 117: B01206
- 19 Miller D J, Christensen N I. Seismic signature and geochemistry of an island arc: A multidisciplinary study of the Kohistan accreted terrane, northern Pakistan. [J Geophys Res](#), 1994, 99: 11623–11642
- 20 Mooney W D, Christensen N I. Composition of the crust beneath the Kenya rift. [Tectonophysics](#), 1994, 236: 391–408
- 21 Kern H, Gao S, Liu Q S. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China Geoscience Transect. [Earth Planet Sci Lett](#), 1996, 139: 439–455
- 22 Gao S, Kern H, Liu Y S, et al. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulites from xenolith occurrences and adjacent exposed lower crustal sections: A comparative study from the North China Craton. [J Geophys Res](#), 2000, 105: 18965–18976
- 23 Xia B, Thybo H, Artemieva I M. Seismic crustal structure of the North China Craton and surrounding area: Synthesis and analysis. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2017, 122: 5181–5207
- 24 Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, et al. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. [Science](#), 2012, 335: 1334–1336
- 25 Keller C B, Schoene B. Statistical geochemistry reveals disruption in secular lithospheric evolution about 2.5 Gyr ago. [Nature](#), 2012, 485: 490–493
- 26 Yuan H. Secular change in Archaean crust formation recorded in Western Australia. [Nat Geosci](#), 2015, 8: 808–813
- 27 Tang M, Chen K, Rudnick R L. Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics. [Science](#), 2016, 351: 372–375
- 28 Youssof M, Thybo H, Artemieva I M, et al. Moho depth and crustal composition in Southern Africa. [Tectonophysics](#), 2013, 609: 267–287
- 29 Das R, Saikia U, Rai S S. The deep geology of South India inferred from Moho depth and V_P/V_S ratio. [Geophys J Int](#), 2015, 203: 910–926
- 30 Shen W S, Ritzwoller M H, Schulte-Pelkum V. A 3-D model of the crust and uppermost mantle beneath the Central and Western US by joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2013, 118: 262–276
- 31 Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. [J Geophys Res](#), 1995, 100: 9761–9788
- 32 Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. [Rev Geophys](#), 1995, 33: 267–310

- 33 Rudnick R L. Xenoliths: Samples of the lower continental crust. In: Fountain D, Arculus R, Kay R, eds. *The Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 1992. 269–316
- 34 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Continental collision and accretion recorded in the deep lithosphere of central China. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 269: 497–507
- 35 Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 2005, 79: 1–24
- 36 Weber M B I, Tarney J, Kempton P D, et al. Crustal make-up of the northern Andes: Evidence based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia. *Tectonophysics*, 2002, 345: 49–82
- 37 Zheng J P, Griffin W L, Ma Q, et al. Accretion and reworking beneath the North China Craton. *Lithos*, 2012, 149: 61–78
- 38 Duan Y H, Wang F Y, Zhang X K, et al. Three-dimensional crustal velocity structure model of the middle-eastern North China Craton (HBCrust1.0). *Sci China Earth Sci*, 2016, 59: 1477–1488
- 39 Wei W B, Ye G F, Jin S, et al. Three-dimensional P-wave velocity structure of the crust of North China. *J China Univ Geosci*, 2007, 18: 257–268 [魏文博, 叶高峰, 金胜, 等. 华北地区地壳P波三维速度结构. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32: 441–452]
- 40 Jia S X, Zhang X K. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China. *Chin J Geophys*, 2005, 48: 672–683 [嘉世旭, 张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. 地球物理学报, 2005, 48: 611–620]
- 41 Li S L, Zhang X K, Song Z L, et al. Three-dimensional crustal structure of the capital area obtained by a joint inversion of dss data from multiple profiles. *Chin J Geophys*, 2001, 44: 357–365 [李松林, 张先康, 宋占隆, 等. 多条人工地震测深剖面资料联合反演首都圈三维地壳结构. 地球物理学报, 2001, 44: 360–368]
- 42 Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust? *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 101–117
- 43 Li S L, Mooney W D, Fan J. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 2006, 420: 239–252
- 44 Li S L, Mooney W D. Crustal structure of China from deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 1998, 288: 105–113
- 45 Teng J W, Zhang Z J, Zhang X K, et al. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 2013, 609: 202–216
- 46 He R Z, Shang X F, Yu C Q J, et al. A unified map of Moho depth and V_p/V_s ratio of continental China by receiver function analysis. *Geophys J Int*, 2014, 199: 1910–1918
- 47 Li Y H, Gao M T, Wu Q. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 2014, 611: 51–60
- 48 Wei Z G, Chen L, Li Z W, et al. Regional variation in Moho depth and Poisson's ratio beneath eastern China and its tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 2016, 115: 308–320
- 49 Jia S X, Qi C, Wang F Y, et al. Three-dimensional crustal gridded structure of the capital area. *Chin J Geophys*, 2005, 48: 1397–1407 [嘉世旭, 齐诚, 王夫运, 等. 首都圈地壳网格化三维结构. 地球物理学报, 2005, 48: 1316–1324]
- 50 Zhang Z J, Yang L Q, Teng J W, et al. An overview of the earth crust under China. *Earth-Sci Rev*, 2011, 104: 143–166
- 51 Artemieva I M, Thybo H. EUNAseis: A seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the north Atlantic region. *Tectonophysics*, 2013, 609: 97–153
- 52 Brocher T M. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bull Seismol Soc Am*, 2005, 95: 2081–2092
- 53 Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X H, et al. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenoliths. *Lithos*, 2001, 56: 267–301
- 54 Zhang H F. Destruction of ancient lower crust through magma underplating beneath Jiaodong Peninsula, North China Craton: U-Pb and Hf isotopic evidence from granulite xenoliths. *Gondwana Res*, 2012, 21: 281–292
- 55 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China Craton. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 148: 79–103
- 56 Ma Q, Xu Y G, Zheng J P, et al. Phanerozoic magma underplating and crustal growth beneath the North China Craton. *Terra Nova*, 2017, 29: 211–217
- 57 Ma Q, Xu Y G, Huang X L, et al. Eoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution in the North China Craton: Evidence from U-Pb and Hf-O isotopes of zircons from deep-crustal xenoliths. *GeoChim CosmoChim Acta*, 2020, 278: 94–109
- 58 Zheng J P, Sun M, Lu F X, et al. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korean Craton. *Tectonophysics*, 2003, 361: 37–60
- 59 Liu Y C, Wang A D, Li S G, et al. Composition and geochronology of the deep-seated xenoliths from the southeastern margin of the North China Craton. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1021–1039
- 60 Xu W L, Gao S, Wang Q H, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China Craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 2006, 34: 721
- 61 Zhang J, Zhang H F. Compositional features and P-T conditions of granulite xenoliths from Late Cretaceous mafic dike, Qingdao region (in

- Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 23: 1133–1140 [张瑾, 张宏福. 青岛地区晚白垩世基性脉岩中麻粒岩捕虏体的成分特征及其温压条件. *岩石学报*, 2007, 23: 1133–1140]
- 62 Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. Lower crustal xenoliths from Junan, Shandong Province and their bearing on the nature of the lower crust beneath the North China Craton. *Lithos*, 2010, 119: 363–376
- 63 Liu Y S, Gao S, Yuan H L, et al. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights on evolution of lower continental crust. *Chem Geol*, 2004, 211: 87–109
- 64 Liu Y S, Gao S, Jin S Y, et al. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China Craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *GeoChim CosmoChim Acta*, 2001, 65: 2589–2604
- 65 Wei Y, Zheng J P, Su Y P, et al. Lithological and age structure of the lower crust beneath the northern edge of the North China Craton: Xenolith evidence. *Lithos*, 2015, 216–217: 211–223
- 66 Huang X L, Xu Y G, Liu D Y. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China. *GeoChim CosmoChim Acta*, 2004, 68: 127–149
- 67 Ping X Q, Zheng J P, Xiong Q, et al. Downward rejuvenation of the continental lower crust beneath the southeastern North China Craton. *Tectonophysics*, 2019, 750: 213–228
- 68 Zhang H F, Yang Y H. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 23: 285–294 [张宏福, 杨岳衡. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和Sr-Nd-Hf同位素地球化学特征. *岩石学报*, 2007, 23: 285–294]
- 69 Li Q L, Wu F Y, Li X H, et al. Precisely dating Paleozoic kimberlites in the North China Craton and Hf isotopic constraints on the evolution of the subcontinental lithospheric mantle. *Lithos*, 2011, 126: 127–134
- 70 Shao J A, Han Q J, Li H M. Discovery of the Early Mesozoic granulite xenoliths in North China Craton. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2000, 43: 245–252 [邵济安, 韩庆军, 李惠民. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. *中国科学D辑: 地球科学*, 2000, 30: 148–153]
- 71 Zheng C Q, Xu W L, Wang D Y. The petrology and mineral chemistry of the deep-seated xenoliths in Mesozoic in Fuxin district from western Liaoning (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1999, 15: 616–622 [郑常青, 许文良, 王冬艳. 辽西阜新中生代玄武岩中深源捕虏体的岩石学和矿物化学研究. *岩石学报*, 1999, 15: 616–622]
- 72 Xu X, Wu T R, Zhang S T, et al. Significances of deep-seated Xenolith in cretaceous basalt of Inner Mongolia (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 2005, 41: 563–569 [许绚, 吴泰然, 张双涛, 等. 内蒙古四子王旗早白垩世深源捕虏体的发现及意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41: 563–569]
- 73 Xu W L, Wang D Y, Liu X C, et al. Discovery of eclogite inclusions and its geological significance in early Jurassic intrusive complex in Xuzhou-northern Anhui, eastern China. *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 1212–1216 [许文良, 王冬艳, 刘晓春, 等. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩体中榴辉岩类包体的发现及其地质意义. *科学通报*, 2002, 47: 618–622]
- 74 Tang H Y, Zheng J P, Griffin W L, et al. Complex evolution of the lower crust beneath the southeastern North China Craton: The Junan xenoliths and xenocrysts. *Lithos*, 2014, 206–207: 113–126
- 75 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. *Geology*, 2004, 32: 229
- 76 Wang F Z, Lu F X, Sun P, et al. The petrology model of the Geoscience transection for continental lithosphere beneath Luoyang-Yichuan-Shiyan-Zigui, Qinling, China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1995, 11: 227–241 [王方正, 路凤香, 孙平, 等. 秦岭洛阳-伊川-十堰-秭归地质断面大陆岩石圈的岩石学模型. *岩石学报*, 1995, 11: 227–241]
- 77 Ying J F, Zhang H F, Tang Y J, et al. Diverse crustal components in pyroxenite xenoliths from Junan, Sulu orogenic belt: Implications for lithospheric modification invoked by continental subduction. *Chem Geol*, 2013, 356: 181–192
- 78 Jiang N, Carlson R W, Guo J H. Source of Mesozoic intermediate-felsic igneous rocks in the North China Craton: Granulite xenolith evidence. *Lithos*, 2011, 125: 335–346
- 79 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Neoproterozoic (2.7–2.8 Ga) accretion beneath the North China Craton: U-Pb age, trace elements and Hf isotopes of zircons in diamondiferous kimberlites. *Lithos*, 2009, 112: 188–202
- 80 Zheng J P, Lu F X, Yu C M, et al. An *in situ* zircon Hf isotopic, U-Pb age and trace element study of banded granulite xenolith from Hannuoba basalt: Tracking the early evolution of the lower crust in the North China Craton. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 277–285 [郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体锆石Hf同位素、U-Pb定年和微量元素研究: 华北下地壳早期演化的记录. *科学通报*, 2004, 49: 375–383]
- 81 Jiang N, Guo J H, Zhai M G, et al. ~2.7 Ga crust growth in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2010, 179: 37–49
- 82 Lu F X, Hou Q Y. The feature of lower crust of North China Craton (NCC) constrained by xenoliths (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2012, 19: 177–187 [路凤香, 侯青叶. 由深源捕虏体限定的华北克拉通下地壳特征. *地学前缘*, 2012, 19: 177–187]
- 83 Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *GeoChim CosmoChim Acta*, 1998, 62: 1959–1975

- 84 Ma Q, Xu Y G, Deng Y F, et al. Similar crust beneath disrupted and intact cratons: Arguments against lower-crust delamination as a decratonization trigger. [Tectonophysics](#), 2019, 750: 1–8
- 85 Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtse blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. [Chem Geol](#), 1993, 109: 89–111
- 86 Thybo H, Artemieva I M. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere. [Tectonophysics](#), 2013, 609: 605–619
- 87 Zheng J P, Xia B, Dai H K, et al. Lithospheric structure and evolution of the North China Craton: An integrated study of geophysical and xenolith data. *Sci China Earth Sci*, 2020, 64: 205–219 [郑建平, 夏冰, 戴宏坤, 等. 地球物理观察和岩石包体约束华北岩石圈地幔结构、性质及过程. *中国科学: 地球科学*, 2020, 51: 201–217]

Summary for “岩石探针和地震探测手段约束华北深部地壳结构组成及演化”

Rock probes and seismic methods to constrain the structure, composition and evolution of the deep crust beneath North China Block

Jianping Zheng^{1*}, Bing Xia^{1,2}, Xianquan Ping¹, Ying Wei^{1,3}, Huayun Tang¹, Yuping Su¹ & Qiang Ma¹

¹ State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

² State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

* Corresponding author, E-mail: [jpzheng@cug.edu.cn](mailto:jpzhang@cug.edu.cn)

Deep continental crust archives critical information on the bulk crustal composition as well as its formation. It is commonly the inherent zone for complex crust-mantle interaction. Unlike the shallow crust, the deep crust is generally inaccessible for direct geological sampling. Instead, knowledge of the deep crust can be obtained from a combination study of geophysical techniques and “lithoprobe” (deep crustal fragments entrained in magmatic outcrops). Wide-angle reflection/refraction seismic profiles have the highest resolution on crustal velocity structure and provide information on the averaged present-day nature of large deep crust domains; “lithoprobe”, instead, give detailed information of locality-specific deep crustal sections through determining the physical and chemical properties, dating the formation and alteration ages and constraining the melting and equilibration depths of the xenoliths. Here, the two methodologies are integrated to constrain the crustal structure on the North China Block. The seismic crustal structure model of the block is compiled from all available seismic wide-angle reflection/refraction profiles and receiver function results. The model parameters include Moho depth, V_p velocity and thicknesses for four crustal layers (sedimentary cover, and the upper, middle and lower crust). The crust as a whole is thin (< 36 km) in the eastern part relative to the western part (38–44 km). In addition, the crust is shown to have a thick upper and middle crust and a relatively thin (typically <5 km) lower mafic crust; no spatial variations in average crustal V_p velocity and densities are observed. The average crustal V_p and density for the whole North China Block are 6.33–6.37 km/s and 2.72–2.78 g/cm³, respectively. The overall absence of high P-wave velocity layer and the relatively low average V_p and density indicate that the block has an intermediate to felsic bulk crustal composition. In contrast, regional crustal xenoliths include mafic to felsic granulites and amphibolites and rare eclogite xenoliths (e.g., Xinyang and Xuhuai), indicating the presence of thick lower crust (e.g., >45 km) at that time. Meanwhile, mafic xenoliths in Hannuoba and Nüshan show strong mafic underplating at the lower crust in the Meso-Cenozoic while no high-velocity layer is shown in the seismic crustal model. These inconsistencies can be explained by the fact that the two methodologies tap the crustal information at different timeslices and dimensions and be complementary to understand the chemical and physical structure of the deep crust. Therefore, the combination study of petrological and geochemical of the crustal xenoliths and geophysical observations can provide essential information on making and destroying the deep continental crust through time.

crustal structure, seismology, deep crust, xenoliths, rock probes, North China Block

doi: [10.1360/TB-2020-1204](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1204)