科学通报 2013 年 第 58 卷 第 23 期：2306 ~ 2309
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时空范围：以华北陆块东南部为例

杨德彬[①*]，杨进辉[②]，许文良[①]，裴福萍[①]

① 吉林大学地球科学学院，长春 130061；
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
* 联系人，E-mail: yangdb@jlu.edu.cn

2013-05-16 收稿，2013-06-21 接受，2013-08-07 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825005)和国家自然科学基金(91014004, 41002018)资助

摘要 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时空范围是大陆动力学研究的核心问题之一，来源于大陆岩石圈地幔的火成岩为探索这一科学问题提供了重要资料. 我们对华北陆块东南部朝鲜-辽东半岛以及辽南-吉南地区晚三叠世花岗质-镁铁质火成岩进行了详细的岩石学、同位素年代学和地球化学研究，结果表明它们是由华南与华北陆块俯冲碰撞后伸展过程中多元岩浆混合形成；相对亏损和富集地幔组分的识别标志着晚三叠世期间华北陆块东南部表现为亏损与富集岩石圈地幔共存的属性. 鲁西-辽南-吉南地区早白垩世镁铁质火成岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成表现出与郯庐断裂距离有关的空间变化，结合吉南地区三叠纪变质锆石和新元古代岩浆锆石的发现，推测起源于深俯冲华南陆块部分熔融的熔体改造了靠近郯庐断裂带的鲁西一侧(如方城、费县、上峪)和辽南地区的岩石圈地幔，而起源于华北陆块加厚地壳部分熔融的熔体则主要改造远离郯庐断裂带的鲁西西北部(如济南、金岭)和吉南地区的岩石圈地幔. 因此，华南大陆深俯冲作用对邻区华北岩石圈地幔影响的时间为晚三叠世-早白垩世，影响的空间范围约为 200 km.

关键词
大陆深俯冲
岩石圈地幔
时空范围
岩浆作用
华北陆块

大洋地壳俯冲过程中会释放大量的流体，形成岛弧型的玄武岩和安山岩[1]. 相反，由于大陆地壳俯冲过程中相对缺乏流体，因此在大陆俯冲带边缘和超高压变质带内没有发现大洋弧或大陆弧以及同俯冲的火成岩[2,3]. 但近年来的研究发现，在超高压岩石中存在许多如多硅白云母、金云母等含羟基矿物，这表明超高压变质过程中同样存在流体活动，特别是在大陆深俯冲地壳的折返期间，流体活动表现得更为活跃[4~6]，这些流体交代上覆岩石圈地幔发生部分熔融可以形成大量的同折返和碰撞后火成岩[7~9]. 因此，研究造山带内部和相邻地区同折返和碰撞后火成岩的形成时代、地球化学属性和源区性质及其形成的地球动力学背景，对于探讨大陆深俯冲作用的深部过程以及深俯冲陆壳对相邻岩石圈地幔影响的时空范围具有重要意义[3].

早中生代时期华南陆块沿大别-苏鲁造山带俯冲碰撞进入华北陆块之下[3,10~13]，这为我们研究大陆深俯冲作用对相邻岩石圈地幔的影响提供了一个天然的实验室. 尽管对大陆碰撞造山带内部形成的碰撞后基性和酸性火成岩进行了年代学和地球化学的系统研究，确定了深俯冲大陆岩石圈物质的再循环[14,15]，但大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时间和空间范围仍不清楚. 本文概括了华北陆块东南部鲁西-辽南-吉南地区晚三叠世花岗质-镁铁质和早白垩世镁铁质-超镁铁质火成岩的岩石学、年代学、地球化学和同位素组成及其空间变化，探讨了大陆深俯冲

引用格式：杨德彬，杨进辉，许文良，等. 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时空范围：以华北陆块东南部为例. 科学通报, 2013, 58: 2306–2309
Yang D B, Yang J H, Xu W L, et al. Spatial and temporal extents of the influence of deep continental subduction on the adjacent lithospheric mantle: An example from the southeast North China Block. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2306–2309, doi: 10.1360/972013-582

作用对邻区岩石圈地幔影响的时间和空间范围.

1 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时间范围

前人详细的年代学研究表明华南与华北陆块之间的大陆深俯冲作用发生在早中生代[3,10~13], 因此, 我们通过苏鲁造山带及其邻区(华北陆块东南缘)三叠纪-白垩纪火成岩的综合研究, 探讨大陆深俯冲作用对华北陆块东南部岩石圈地幔影响的时间范围. 三叠纪侵入岩在苏鲁造山带、朝鲜和辽东半岛地区零星分布[8,9,16]. 在辽东半岛-吉南地区, 尽管前人认为该区侵入岩主要形成于三叠纪, 但近年来的研究工作表明, 该区侵入岩主体形成于晚中生代[17~20], 三叠纪岩体相对较少, 主要包括辽宁东部的赛马-柏林川霞石正长岩、岫岩花岗岩及其镁铁质包体、双牙山花岗岩、老尖顶子闪长岩、于家村正长岩、尹家村辉长岩、大和尚山辉长岩和吉林南部的龙头石英闪长岩-花岗闪长岩、小苇沙河二长花岗岩、岔信子花岗闪长岩和蚂蚁河辉石闪长岩-二长花岗岩等[8,16,21~23]. 通过原位微区 SIMS 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 除赛马-柏林川岩体相对较老(224~231 Ma), 其他岩体的形成时代主要集中在 210~221 Ma 之间, 明显晚于苏鲁造山带超高压变质时代(245~225 Ma)[3], 说明它们形成于华南与华北陆块俯冲碰撞后的伸展环境[16,21~23].

全岩地球化学和锆石原位微区 Hf-O 同位素研究表明(图 1), 辽东半岛晚三叠世镁铁质火成岩分别来源于富集岩石圈地幔和亏损岩石圈地幔, 明显区别于华北陆块古老岩石圈地幔的属性. 晚三叠世蚂蚁河辉石闪长岩富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf), 具有低的 Nb/U(0.8~8.4)和 Ce/Pb(3.8~7.9)比值与大陆地壳组成(Nb/U=6.2, Ce/Pb=3.9)相类似[24], 而不同于洋中脊和洋岛玄武岩(Nb/U=47, Ce/Pb=27)[25]. 此外, 它们具有可变的锆石 $\delta^{18}O$ 值(5.0‰~7.4‰)和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(+2.2~+7.4) 以及全岩初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(0.7048~0.7053), $\varepsilon_{Nd}(t)$ (−1.8~+3.8) 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(+2.7~+6.2)[16,23], 和典型的与俯冲有关的岩石特征相类似, 暗示蚂蚁河辉石闪长岩起源于受俯冲陆壳物质改造的亏损岩石圈地幔. 上述研究表明, 在晚三叠世该区岩石圈地幔已经受到了深俯冲陆壳的改造[16,23]. 同时北朝鲜晚三叠世(223 Ma)金伯利岩中尖晶石二辉橄榄岩包体的橄榄石 *Fo* 值为

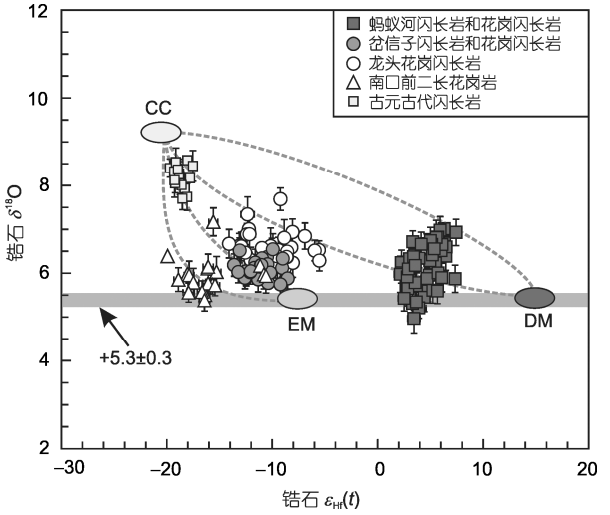

图 1 辽东半岛-吉南地区三叠纪侵入岩及镁铁质包体中锆石 Hf-O 同位素组成

据文献[16]修改

89~91、单斜辉石 Na_2O 含量为 0.46%~2.10%、尖晶石 Cr# 为 8.8~49; 全岩初始 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值介于 0.1245~0.1295 之间; 单斜辉石的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值介于 0.7026~0.7040 之间, $\varepsilon_{Nd}(t)$=+6.7~+13.2, $\varepsilon_{Hf}(t)$=+15.9~+24.8. 上述特征表明, 晚三叠世北朝鲜岩石圈地幔具有新生岩石圈地幔的属性(亏损型岩石圈地幔)[26], 而不同于古老的富集型岩石圈地幔. 这标志着晚三叠世华北克拉通东延至朝鲜的大陆岩石圈地幔性质已经发生了转变.

辽南-吉南早白垩世镁铁质-超镁铁质火成岩主要由橄榄辉石岩、辉长岩和辉长闪长岩组成, 它们的 Sr-Nd-Pb 同位素为($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$=0.70557~0.71119, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−5.4~−20.1, ($^{206}Pb/^{204}Pb)_i$=15.13~17.85[27]. 这些研究结果指示, 华北陆块东南部岩石圈地幔的性质存在明显的空间变异. 与辽南地区相比, 吉林南部镁铁质-超镁铁质岩石具有高 TiO_2 和 Al_2O_3 含量、高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值、低 $(La/Yb)_N$ 值和低的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值以及低的放射性 Pb 同位素组成, 指示辽南地区为富集型岩石圈地幔, 而吉南地区为相对亏损型岩石圈地幔, 且岩石圈地幔的厚度存在明显的差异[27]. 此外, 辽南地区幔源镁铁质岩石具有低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值, 吉南地区幔源镁铁质岩石具有低的 Pb 同位素组成, 这些排除了岩浆源区被俯冲大洋板片和/或沉积物交代的可能. 结合吉南地区镁铁质火成岩中新元古代 U-Pb 年龄岩浆锆石和三叠纪 U-Pb 年龄变质锆石的存在[27], 指示该

区受到了俯冲华南陆块地壳物质的影响. 因此, 华北陆块东南缘晚三叠世和早白垩世镁铁质火成岩与地幔橄榄岩包体的研究表明, 深俯冲陆壳改变了华北陆块东南缘岩石圈地幔的属性[8,16,21~23]. 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的时间范围主要为晚三叠世-早白垩世.

2 大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的空间范围

岩浆作用的空间范围和华南陆块基底物质的影响范围可以限定华北陆块东南部岩石圈地幔受大陆深俯冲作用改造的空间范围. 华北陆块东南部鲁西地区早白垩世幔源镁铁质火成岩具有相对低的 SiO_2 含量、Lu/Hf 比值和高的 Mg# 和 Ni、Cr 含量以及高的$(La/Yb)_N$, Fe/Mn 和 Th/U 比值, 排除了岩浆上升过程中陆壳物质的混染. 结合它们高的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(0.7047~0.7117) 和低的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(−3.92~−16.60), 可见早白垩世幔源镁铁质火成岩的岩浆源区受到了深俯冲大陆地壳物质的改造, 而非大洋板片的改造. 此外, 全岩 Sr-Nd-Pb 和锆石 Hf 同位素表现出规律的空间变化[28~30], 即从东南靠近郯庐断裂带一侧(如方城和费县玄武岩、上峪辉长闪长岩)向北西方向(如济南辉长岩、金岭高镁闪长岩), $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 初始比值逐渐降低, $\varepsilon_{Nd}(t)$值和锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值逐渐升高, 表明自南东-北西方向中生代岩石圈地幔遭受陆壳物质的改造程度与性质是不同的[28~30]. 结合辽南-吉南地区早白垩世镁铁质-超镁铁质火成岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成以及三叠纪 U-Pb 年龄变质锆石和新元古代 U-Pb 年龄岩浆锆石的存在[27], 可以推测[27~33]: (1) 起源于深俯冲华南板片部分熔融的熔体主要改造靠近郯庐断裂带的鲁西一侧(如方城和费县玄武岩、上峪辉长闪长岩)和辽南地区的岩石圈地幔; (2) 起源于华北陆块加厚地壳部分熔融的熔体改造的岩石圈地幔主要分布在远离郯庐断裂带的鲁西西北部(如济南辉长岩、金岭高镁闪长岩)和吉南地区. 因此, 我们认为大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地幔影响的空间范围约为 200 km (图 2).

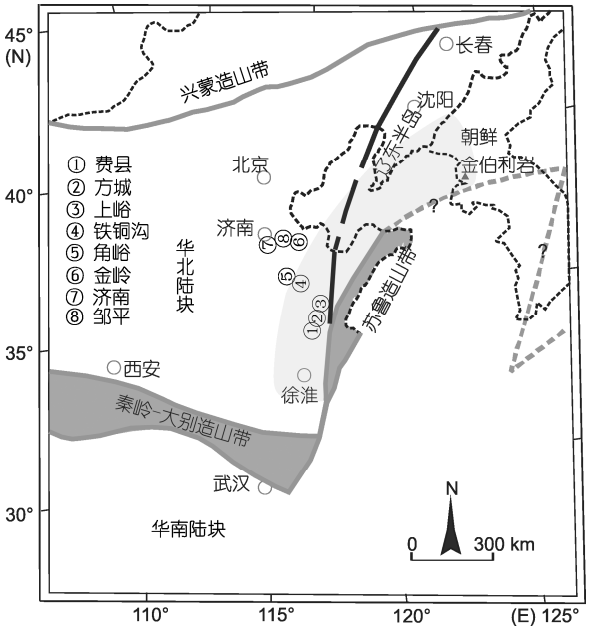

图 2 大陆深俯冲作用对华北陆块东南部岩石圈地幔影响的空间范围

据文献[28]修改

参考文献

1 Lallemand S, Funiciello F. Subduction Zone Geodynamics. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 1–272

2 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth Sci Rev, 2011, 107: 342–374

3 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 2012, 328: 5–48

4 Chen R X, Zheng Y F, Gong B, et al. Origin of retrograde fluid in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Constraints from mineral hydrogen isotope and water content changes in eclogite gneiss transitions in the Sulu orogen. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2299–2325

5 Sheng Y M, Xia Q K, Yang X Z, et al. H_2O contents and *D*/*H* ratios of nominally anhydrous minerals from ultrahigh-pressure eclogites of the Dabie orogen, eastern China. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2079–2103

6 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc London, 2009, 166: 763–782

7 Dilek Y, Altunkaynak S. Cenozoic crust evolution and mantle dynamics of post-collisional magmatism in Western Anatolia. Int Geol Rev, 2007, 49: 431–453

8 杨进辉, 吴福元. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 910–921
9 Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, et al. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. Chem Geol, 2012, 328: 70–88
10 Li S G, Jagoutz E, Lo C H, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: A retrospective view. Int Geol Rev, 1999, 41: 1114–1124
11 Zheng Y F, Wang Z R, Li S G, et al. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraint on mineral Sm-Nd chronometer. Geochim Cosmochim Acta, 2002, 66: 625–634
12 Liu D Y, Jian P, Kröner A, et al. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie-Sulu UHP complex, China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 250: 650–666
13 Hacker B R, Wallis S R, Ratschbacher L, et al. High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu orogen. Tectonics, 2006, 25: TC5006
14 Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope evidence for crust-mantle interaction during continental deep subduction. Earth Planet Sci Lett, 2011, 308: 224–244
15 Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Zircon Hf-O isotope and whole-rock geochemical constraints on origin of postcollisional mafic to felsic dykes in the Sulu orogen. Lithos, 2012, 136-139: 225–245
16 Yang J H, Sun J F, Zhang J H, et al. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence. Lithos, 2012, 153: 108–128
17 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Early Cretaceous giant igneous event in eastern China: Evidence from Liaodong Peninsula in NE China. Earth Planet Sci Lett, 2005, 233: 103–119
18 Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem Geol, 2005, 221: 127–156
19 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Mesozoic decratonization of the North China Block. Geology, 2008, 36: 467–470
20 Pei F P, Xu W L, Yang D B, et al. Petrogenesis of late Mesozoic granitoids in southern Jilin Province, northeastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic evidence. Lithos, 2011, 125: 27–39
21 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. Chem Geol, 2007, 242: 155–175
22 Yang J H, Sun J F, Chen F K, et al. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for postcollisional lithosphere thinning of Eastern North China Craton. J Petrol, 2007, 48: 1973–1997
23 裴福萍, 许文良, 于洋, 等. 吉林南部晚三叠世蚂蚁河岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38: 351–362
24 Rudnick R L, Gao S. The composition of the continental crust. In: Rudnick R L, ed. The Crust. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. 1–64
25 Hofmann A, Jochum K, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. Earth Planet Sci Lett, 1986, 33: 33–45
26 Yang J H, O'Reilly S, Walker R J, et al. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea. Geology, 2010, 38: 799–802
27 Pei F P, Xu W L, Yang D B, et al. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin provinces, NE China: Constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 2011, 40: 636–650
28 Yang D B, Xu W L, Pei F P, et al. Spatial extent of the influence of the deeply subducted Yangtze slab on the eastern North China Craton lithosphere: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Mesozoic mafic igneous rocks in western Shandong, China. Lithos, 2012, 136-139: 246–260
29 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. Lithos, 2012, 146-147: 164–182
30 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Slab-mantle interaction in continental subduction channel: Geochemical evidence from Mesozoic gabbroic intrusives in southeastern North China. Lithos, 2012, 155: 442–460
31 Xu Y G., Huang X L, Ma J L, et al. Crustal-mantle interaction during the thermo-tectonic reactivation of the North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb age, petrology and geochemistry of Mesozoic plutons in western Shandong. Contrib Mineral Petrol, 2004, 147: 750–767
32 Zhai M G, Fan Q C, Zhan H F, et al. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithsopheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. Lithos, 2007, 96: 36–54
33 Huang X L, Zhong J W, Xu Y G. Two tales of the continental lithospheric mantle prior to the destruction of the North China Craton: Insights from Early Cretaceous mafic intrusions in western Shandong, East China. Geochim Cosmochim Acta, 2012, 96: 193–214