大陆深俯冲对邻区陆壳结构的影响与调整方式

姜能^{①*}, 杨德彬^②, 许文良^②

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

* 联系人, E-mail: jiangneng@mail.iggcas.ac.cn

2013-05-20 收稿, 2013-07-15 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(90914008)资助

摘要 华北克拉通东南缘胶北地体和蚌埠地区的中生代花岗岩具有相似的岩浆锆石和继承锆石 U-Pb 年龄分布. 继承锆石主要为三叠纪和新元古代 U-Pb 年龄, 它们不仅在 U-Pb 年龄上而且在 Hf-O 同位素组成上与苏鲁造山带变质岩的锆石相同, 说明它们来源于俯冲的扬子陆块陆壳. 一些花岗岩的岩浆锆石具有低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和相对较高且变化大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 落在三叠纪和新元古代继承锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 组成范围内, 说明它们主要来源于俯冲扬子陆块陆壳的部分熔融. 由此可以判定, 在华北克拉通东南缘深部陆壳中存在俯冲的扬子陆块陆壳, 这些俯冲的扬子陆块陆壳参与到了中生代花岗岩的形成作用中. 徐淮地区早白垩世高 Mg# 埃达克质岩石中发现的榴辉岩包体的形成条件为 760~1060°C 和 >1.50 GPa, 指示了加厚陆壳的存在. 这些榴辉岩捕虏体中变质锆石的 U-Pb 年龄介于 219~227 Ma, 表明榴辉岩相变质作用(即陆壳加厚的时间)发生在中晚三叠世, 这与苏鲁-大别超高压变质的时代相吻合, 暗示华北克拉通东南缘陆壳加厚过程应是扬子陆块俯冲于华北克拉通之下的结果. 早白垩世高 Mg# 埃达克质岩石本身则是来源于拆沉陆壳物质的部分熔融随后与岩石圈地幔相互作用的产物.

关键词

大陆深俯冲
下地壳改造
陆壳加厚
榴辉岩包体
中生代花岗岩

大别-苏鲁造山带是三叠纪华南陆块俯冲进入华北陆块之下形成的大陆碰撞造山带^[1]. 深俯冲大陆板片对上覆大陆岩石圈的影响, 不仅表现在俯冲断离板片的部分熔融及其对上覆岩石圈地幔的改造^[2~4]而且表现在深俯冲陆壳对上覆陆块深部陆壳物质的改造与加厚作用^[5~7]. 那么, 深俯冲陆壳对上覆板块深部陆壳是如何改造的? 影响的方式与改造的过程如何? 这些问题可以从深俯冲陆壳上盘起源于深部陆壳的火成岩及其中深部陆壳岩石包体的研究中得到回答. 在深俯冲扬子陆块的上盘——即华北克拉通东南缘, 分布有大量中生代火山岩和侵入岩^[8], 尤其是侵入岩, 类型极为丰富. 在一些岩浆岩中还含有榴辉岩类和地幔橄榄岩类等包体, 这些岩石包体来自受到大陆深俯冲强烈影响的下地壳和岩石圈地幔的

不同层次. 通过对这些岩石进行深入的研究, 可以阐明深俯冲的大陆地壳对上覆岩石圈地幔造成影响的范围和程度, 分析这种影响发生的机理, 揭示同碰撞和碰撞后阶段下地壳和壳幔过渡带性质的演变规律, 探讨其可能的构造作用过程.

在华北克拉通东南缘分布有较多中生代镁铁质岩石. 研究显示这些镁铁质岩石具有弧型微量元素分布特征(例如富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损高场强元素)和富集的 Sr-Nd 同位素组成^[4,9~13], 显示其来源于富集的岩石圈地幔. Gao 等人^[12]和 Yang 等人^[4]认为该富集岩石圈地幔是由来源于拆沉的华北克拉通下地壳熔体的交代而形成, 但更多的学者倾向于该富集岩石圈地幔是由来源于三叠纪俯冲的华南陆块熔体的交代而形成^[10,11,13,14]. 相比于俯

引用格式: 姜能, 杨德彬, 许文良. 大陆深俯冲对邻区陆壳结构的影响与调整方式. 科学通报, 2013, 58: 2290-2293

Jiang N, Yang D B, Xu W L. The influence of continental deep subduction on crustal structure in adjacent area and its adjusting way. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2290-2293, doi: 10.1360/972013-604

冲的华南陆块对华北克拉通岩石圈地幔交代作用的研究而言,俯冲的华南陆块对华北克拉通下地壳影响的研究还较少,本文主要从华北克拉通东南缘分布的中生代侵入岩及其中包体的角度探讨大陆深俯冲作用对上覆岩石圈下地壳造成的影响。

1 深俯冲扬子陆壳对华北克拉通东南缘下地壳的改造

在华北克拉通东南缘的胶北地体和蚌埠地区,分布有很多中生代花岗岩,在这些花岗岩中除了岩浆锆石外,还存在较丰富的继承锆石^[7,15~17]。这些继承锆石与岩浆锆石之间有无成因联系?继承锆石是来源于花岗岩源区还是在上升过程中捕获的?如果是来源于花岗岩源区,其反映的是华北下地壳还是俯冲的扬子地壳?对这些问题的回答,将有助于了解深俯冲扬子陆壳对华北克拉通东南缘下地壳的

影响。

通过对胶北地体和蚌埠地区中生代花岗岩中的继承锆石 U-Pb 年龄的测定,发现除少量太古代和古元古代 U-Pb 年龄外,主要为三叠纪和新元古代 U-Pb 年龄(图 1, 2),与苏鲁造山带超高压变质岩中的锆石 U-Pb 年龄^[18]一致。进一步的分析表明,这些三叠纪和新元古代继承锆石具有与苏鲁造山带胶东地体内锆石非常相似的 Hf 同位素组成(图 3),一些三叠纪继承锆石具有负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 4),这一特征与胶东地体变质岩中的锆石相似^[19,20],说明它们来源于俯冲的扬子陆壳。一些样品中的岩浆锆石具有低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和相对较高且变化大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,落在三叠纪和新元古代继承锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 组成范围内,说明它们主要来源于俯冲扬子陆壳的部分熔融。这些结果表明华北克拉通东南缘深部陆壳中不仅存在古老的华北下地壳物质,还存在俯冲的扬子陆壳物质,而且这些

图 1 蚌埠地区荆山正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄^[6]

图 2 胶北地体玲珑花岗岩锆石 U-Pb 年龄^[7]

图3 胶北地体玲珑花岗岩锆石 Hf 同位素组成^[7]和胶东地体片麻岩锆石 Hf 同位素组成(据李向辉等人^[21])

图4 胶北地体玲珑花岗岩锆石 O 同位素组成^[7]

俯冲的扬子陆壳进一步参与到了中生代花岗岩的形成中^[6,7].

2 陆壳深俯冲对邻区深部陆壳的影响: 陆壳加厚过程的确定

针对徐淮地区早白垩世高 Mg#埃达克质岩石中发现的榴辉岩包体, 通过详细的变质岩石学和锆石微区 U-Pb 年代学以及地球化学研究揭示出: (1) 榴辉岩类捕虏体中变质矿物组合的温压计算结果为 $T=760\sim 1060^{\circ}\text{C}$ 和 $P>1.5\text{ GPa}$, 指示了加厚陆壳的存在^[22]; (2) 这些榴辉岩捕虏体中变质锆石的 U-Pb 年龄介于 219~227 Ma, 表明榴辉岩相变质作用(即陆壳加厚的时间)发生在中晚三叠世, 这与苏鲁-大别超高压变质的时代^[18]相吻合, 暗示华北克拉通东南缘陆壳加厚过程应是扬子陆块俯冲于华北克拉通之下的结果^[5]; (3) 榴辉岩类捕虏体的 Pb 同位素地球化学组成以及

锆石 U-Pb 定年结果(具有 2.5, 1.8, 0.7~0.8 Ga 和 220 Ma 四个峰值, 图 5), 结合扬子陆块与华北克拉通基底的判别标准^[23], 表明徐淮地区早白垩世埃达克质岩石中发现的榴辉岩包体的构造属性是既有华北克拉通的基底物质, 又有扬子陆块基底物质, 其中新元古代锆石具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 特征^[8]也证明了这一认识. 徐淮地区榴辉岩类捕虏体指示三叠纪华北克拉通东南缘陆壳加厚过程的存在.

3 邻区地壳结构的调整方式: 加厚陆壳的拆沉

徐淮地区中生代高 Mg#埃达克质岩石具有高的 Mg#, Cr, Ni 组成, 反映了幔源特征. 然而其高 Sr, Ba, LREE 等特征又反映了壳源的地球化学属性, 其中的榴辉岩类捕虏体具有 2.5, 1.8, 0.7~0.8 Ga 和 220 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 与华北和扬子陆块的基底物质年龄相似. 因此, 可以认为大别-苏鲁造山带三叠纪的大陆深俯冲和碰撞造山作用导致了华北克拉通东南缘陆壳加厚过程的发生. 加厚陆壳的不稳定, 必将发生拆沉作用(时间为晚三叠世-早侏罗世), 拆沉物质的部分熔融以及与岩石圈地幔的相互作用形成了徐淮地区中生代埃达克质岩浆活动. 这一过程完整显示了大陆深俯冲作用对相邻的华北克拉通东南缘下地壳的强烈影响和改造.

图5 徐淮地区早白垩世高 Mg#埃达克质岩石中榴辉岩包体锆石 U-Pb 年龄^[8]

致谢 感谢郑永飞院士、郭峰研究员以及匿名审稿人提出的建设性修改意见.

参考文献

- 1 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53: 2129–2152
- 2 Xu W L, Hergt J M, Gao S, et al. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 265: 123–137
- 3 Xu W L, Zhou Q J, Pei F P, et al. Destruction of the North China Craton: Delamination or thermal/chemical erosion? Mineral chemistry and oxygen isotope insights from websterite xenoliths. *Gondwana Res*, 2013, 23: 119–129
- 4 Yang D B, Xu W L, Pei F P, et al. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. *Lithos*, 2012, 136–139: 246–260
- 5 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: 721–724
- 6 Yang D B, Xu W L, Wang Q H, et al. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern North China Craton. *Lithos*, 2010, 114: 200–216
- 7 Jiang N, Chen J Z, Guo J H, et al. *In situ* zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China Craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion. *Lithos*, 2012, 142–143: 84–94
- 8 Xu W L, Gao S, Yang D B, et al. Geochemistry of eclogite xenoliths in Mesozoic adakitic rocks from Xuzhou-Suzhou area in central China and their tectonic implications. *Lithos*, 2009, 107: 269–280
- 9 Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Phys Chem Earth A*, 2001, 26: 759–771
- 10 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 144: 241–253
- 11 Xu Y G, Ma J L, Huang X L, et al. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci*, 2004, 93: 1025–1041
- 12 Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 270: 41–53
- 13 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
- 14 Zhang H F, Ying J F, Shimoda G, et al. Importance of melt circulation and crust-mantle interaction in the lithospheric evolution beneath the North China Craton: Evidence from Mesozoic basalt-borne clinopyroxene xenocrysts and pyroxenite xenoliths. *Lithos*, 2007, 96: 67–89
- 15 Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geol Rev*, 1998, 13: 275–291
- 16 Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China. *Lithos*, 2010, 119: 512–536
- 17 Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*, 2012, 146–147: 112–127
- 18 Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 2009, 475: 327–358
- 19 Tang J, Zheng Y F, Gong B, et al. Extreme oxygen isotope signature of meteoric water in magmatic zircon from metagranite in the Sulu orogen, China: Implications for Neoproterozoic rift magmatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 3139–3169
- 20 Chen Y X, Zheng Y F, Chen R X, et al. Metamorphic growth and recrystallization of zircons in extremely ^{18}O -depleted rocks during eclogite-facies metamorphism: Evidence from U-Pb ages, trace elements, and O-Hf isotopes. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75: 4877–4898
- 21 李向辉, 陈福坤, 李潮峰, 等. 苏鲁造山带荣成超高压地体片麻岩锆石年龄和铪同位素组成特征. 岩石学报, 2007, 23: 351–368
- 22 Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, et al. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *J Asian Earth Sci*, 2006, 27: 230–240
- 23 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48