

大陆岩石圈地幔的组成与交代作用

茹艳娇

(长安大学 地球科学与资源学院 陕西 西安 710054 西安地质矿产研究所 陕西 西安 710054)

摘 要 结合前人研究成果,总结了大陆岩石圈地幔的研究方法和研究对象,并对研究方法及研究对象作了评述。Griffin 等将岩石圈地幔分为 Archon、Proton、Tecton 三类。Archon 大陆岩石圈地幔相对原始地幔来说是强烈亏损的,大多数 Tecton 相对于原始地幔是适度亏损的,而 Proton 的组成在 Archon 和 Tecton 大陆岩石圈地幔 2 个端元之间。总体上看,古老岩石圈地幔亏损程度最大,而年轻岩石圈地幔相对古老岩石圈富集。富集过程主要与地幔交代作用有关。从交代作用的表现形式、交代剂的性质与来源方面,通过研究地幔捕虏体/捕虏晶,可以很好地认识岩石圈地幔的富集过程。

关键词 大陆岩石圈地幔;富集过程;地幔交代

大陆岩石圈地幔(SCLM)是地幔的组成部分,它以莫霍面为界,下伏于地壳,上覆于软流圈,为上地幔的顶部。通常认为在力学、热学和化学性质上,大陆岩石圈地幔是地壳—地幔的过渡层,它在对流地幔—岩石圈地幔—地壳相互作用和演化中起重要作用。大陆岩石圈地幔的成分、结构、形成和演化是近年来固体地球科学的热点问题之一。

1 研究方法对象

随着科技的发展,现在人们可以利用地震层析成像技术和岩石—地球化学技术等来研究大陆岩石圈地幔的组成与演化。因地球物理资料往往只能反映近期的边界条件,所以对于地质历史上的大陆岩石圈地幔的研究,主要是通过地幔岩石学及地球化学。研究对象主要为构造侵位的地幔橄榄岩块、幔源火山岩中的捕虏晶及地幔岩捕虏体,它们记录了源区物质的组成与温度等信息。利用微量元素与同位素地球化学可示踪深部物质与深部过程^[1]。

Griffin 等^[2]指出利用构造侵位的地幔橄榄岩块、幔源火山岩中的地幔捕虏体和捕虏晶来研究大陆岩石圈地幔的组成,各自都有其优点与缺点。地幔橄榄岩块可以确定不同岩石类型之间的关系,但它们多来自相对较浅的大陆岩石圈地幔,并在构造侵位到地壳的过程中,多已被变形和交代改造。地幔橄榄岩块在克拉通大陆岩石圈地幔区很少发现,目前仅在一些超高压变质带有发现,如挪威西部^[3-4]和中国秦岭—大别—

苏鲁一带及西藏的柴达木北部^[5-6]等。金伯利岩、玄武岩和其他火山岩中的捕虏体,来自大陆岩石圈地幔的不同位置,垂向深度变化很大,但它们与岩石之间的关系一般不明确。大陆岩石圈地幔的样品,最多的是橄榄岩、金伯利岩和幔源火山岩中的捕虏晶。捕虏晶空间分布广泛,而且石榴石捕虏晶提供了丰富的源区信息。根据橄榄岩中的石榴石捕虏晶的主微量元素组成,可以用来估算温度、压力、寄主岩石的主量元素组成以及共存的橄榄石和斜方辉石的 $Mg^\#$ 。

2 岩石圈地幔的分类与组成

从地球化学角度考虑,地球在演化过程中发生分异时主要表现为地幔发生部分熔融。除硅以外,地幔主要由铁和镁组成,在部分熔融过程中,由于铁具有相对镁较低的熔融温度而优先熔出,剩下富镁的残留。但由于镁的密度相对铁较小,因而残留漂浮在早期形成的地壳之下,即岩石圈地幔。古老的岩石圈地幔有可能发生较高和/或多次熔体抽取而使其残留具有较高的镁含量,或所组成的橄榄石矿物具有较高的镁橄榄石牌号,单斜辉石和铬尖晶石中的 $Cr^\#$ 较高。这与地球早期的太古宙由于具有较高的地热梯度而发生较高程度部分熔融,从而使所形成的岩石圈地幔具有较高的镁含量相吻合。而在显生宙期间,地球的地热梯度明显降低,所产生的年轻岩石圈地幔的镁含量明显降低,且由于其较年轻,相对经历的熔融次数要少,从而显示出与古老克拉通地幔不同的特点^[7]。

Boyd^[8]首先将岩石圈地幔分为大洋型与克拉通型两类,大洋型岩石圈地幔以深成橄榄岩、蛇绿岩和阿尔卑斯型橄榄岩为代表,大陆型岩石圈地幔以 Kaapvaal 克拉通低温橄榄岩为代表. Griffin^[2,9]等根据上覆地壳经历最后一次主要的区域构造热事件的时间,将地壳分为 Archon(古老的)、Proton(较老的)、Tecton(年轻的)三类. Archons 是指经历最后一次主要构造热事件的时间在 2.5 Ga 之前,而 Proton、Tecton 分别是指经历最后一次主要的构造热事件的时期在 2.5~1.0 Ga 和小于 1 Ga. 考虑到主要的构造热事件是与岩石圈地幔演化相联系的,则这三类地区的岩石圈的地幔具有各自的特点.

根据石榴石捕虏体和捕虏体的估算,Archon 大陆岩石圈地幔相对原始地幔来说是强烈亏损的,橄榄石中 $Mg^{\#}$ 的平均值为 92.7, FeO 平均含量约为 8%, CaO 为 0.6%~1%, Al_2O_3 为 1%~1.5%. 因为全球及区域地震资料表明大多数克拉通区的捕虏体所代表的成分来自岩石圈低速带边缘,所以这样的组成应该反映的是交代的物质. 太古宙大陆岩石圈地幔应该与挪威西部的太古宙造山带地块特征相似,由更亏损的纯橄榄岩/方辉橄榄岩组成^[2]. 澳大利亚 Pilbara 克拉通的古老金伯利岩(1.8 Ga)获取了最亏损的样品,由方辉橄榄岩组成,橄榄石中的 $Mg^{\#}$ 为 93.3^[10].

按照石榴石橄榄岩捕虏体和含石榴石的岩石圈地幔的估算,大多数 Tecton 大陆岩石圈地幔相对于原始地幔是适度亏损的, CaO 为 3.1%~3.2%, Al_2O_3 为 3.5%~3.9%. 而来自尖晶石橄榄岩捕虏体显示这种 Tecton 大陆岩石圈地幔更亏损一些 ($CaO \approx 2.5\%$ 、 $Al_2O_3 \approx 2.5\%$).

Alard^[11]、Xu^[12]等指出元古宙地幔存在于较浅的深度, Proton 大陆岩石圈地幔的组成在 Archon 和 Tecton 大陆岩石圈地幔的 2 个端元之间, CaO 约为 2.0%, Al_2O_3 约为 2.0%. Griffin^[2] 研究发现,典型的 Proton SCLM 可能是由更亏损的太古宙大陆岩石圈地幔经交代富集而成. 如挪威的石榴石橄榄岩的组成与估算的 Proton 大陆岩石圈地幔的组成相似;在金伯利岩中发现了高温剪切变形的橄榄岩,变形橄榄岩的显微结构及组成反映了熔体渗滤到亏损的岩石中,加入了 Ca 、 Al 、 Fe 、 Na 和 Ti ^[13-14].

3 大陆岩石圈地幔的交代作用

在现阶段,地幔交代作用的研究主要集中在岩石圈地幔的交代作用. 主要研究区域为南非的 Kapvall

省、西伯利亚地区、加拿大的 Slave 省. 已有资料表明:交代作用是导致大陆岩石圈地幔富集的最基本因素,并且,由于岩石圈地幔不参与地幔对流,这就使交代作用导致的富集得到积累,而且随着时间的积累会逐渐增强.

Bailev^[15]最早明确提出的地幔交代作用是指在不发生部分熔融的情况下,通过流体(富 H_2O 或富 CO_2)与地幔中的岩石或矿物相互作用而发生的物质的带入、带出现象. Hart^[16]认为地幔交代作用是指外来新物质(包括熔体和流体)的加入造成地幔岩石成分富集变化的过程,并将地幔交代作用分成 2 种方式:一种是富 H_2O 或富 CO_2 流体引起的地幔交代作用,化学成分富钾,常见于金伯利岩浆携带的地幔包体中,称金伯利岩型;另一种是与碧玄岩岩浆类似的熔浆引起的地幔交代作用,化学成分富铁钛,常见于碱性玄武岩携带的地幔包体中,称碧玄岩型. 此外, Dawson^[16]、Hart^[17]等根据幔源捕虏体的化学成分和岩相学特点将地幔交代作用分为显性交代(cryptic metasomatism)和隐性交代(modal metasomatism). 显性交代有含挥发份的矿物,如角闪石、单斜辉石、金云母、磷灰石、碳酸盐及钛铁氧化物等的出现,而隐性交代仅在地球化学特征上有表现,显示出主微量及同位素地球化学方面的富集,而不改变矿物组成. 地幔交代作用使地幔橄榄岩中 Si 、 Fe 、 Ca 、 Al 等的含量增加、不相容元素(LREE 和 LILE)高度富集^[9,16,18]. 周新华等^[19-20]研究,建议将显性交代作用称为地幔交代作用,而将隐性交代作用称为地幔富集作用.

除了流体之外,地幔中的熔体同样可以引起地幔交代作用,实验岩石学研究表明,当富橄榄石的熔浆聚集量达到 1%时,就可在地幔岩石中发生渗滤流动,碳酸岩岩浆发生渗滤流动所需的量更小. 因此,在地幔高温条件下,由熔体引起的地幔交代作用是非常重要的. 地幔熔体主要有硅酸盐熔体、碳酸岩熔体、硫化物熔体等,其中硅酸盐熔体最常见^[21-23],如鲁西中生代地幔纯橄榄岩包体中,晚期发育的交代作用,即由斜方辉石或斜方辉石和金云母组成的交代脉体以及在橄榄石与铬铁矿之间形成的网络状斜方辉石表明,交代介质是一种硅酸盐熔体. 在地幔条件下, CO_2 、 H_2O 与熔体之间、熔体与熔体之间可以形成流(熔)体混溶相,在其上升过程中与上覆固体岩石圈地幔发生广泛的交代作用. 所以,目前大多数学者所谈的地幔交代作用,是指由于熔体或流体的介入,使地幔岩化学组分发生富集,并最终导致地幔化学不均一的过程.

目前,已经发现的交代剂有相对富碱的硅酸盐熔体或流体和碳酸岩熔体^[24-25]。富碱硅酸盐熔体/流体与橄榄石之间的作用得到了广泛的研究。碳酸岩熔体的黏度远远低于硅酸盐熔体,而且密度低,极易流动和活动,富含不相容元素,其扩散速度很快,所以能够与地幔橄榄岩保持化学平衡。在其上升过程中,可以与地幔二辉橄榄岩等进行反应,导致单斜辉石向斜方辉石转变,不仅改变地幔的矿物组成和化学成分,同时也释放出富含CO₂的流体。一般认为,不相容元素与La相关性较好,说明介质是硅酸盐质的,Ti、V与La相关性好,表明是碳酸岩岩浆交代。被碳酸岩岩浆交代的橄榄岩的Ti/Eu比值应随着(La/Yb)_N比值的增加而降低,被交代的透辉石应当具有很高的Na₂O和低的TiO₂。

岩石学、岩石地球化学及同位素地球化学的研究表明,交代剂有3种来源:软流圈深部、地幔柱和消减板片(俯冲带再循环物质)^[26-27]。有学者研究华北中新代岩石圈地幔的交代作用时指出,含金云母的尖晶石二辉橄榄岩中单斜辉石的重稀土元素,如Lu含量高,说明交代熔流体来源于石榴石相。而岩石圈地幔为尖晶石相,其下的软流圈为石榴石相,进一步说明交代熔/流体主要来源于软流圈。

4 岩石圈地幔的再富集过程

捕虏体和石榴石捕虏晶特征可以识别大陆岩石圈地幔的交代过程^[28-30]。Cox等^[31]认为在石榴石二辉橄榄岩捕虏体中石榴石和单斜辉石常常伴生在一起,它们都是由高温富铝斜方辉石固溶体分解而成的,而这种关系也反映了交代作用使石榴石和单斜辉石进入亏损的方辉橄榄岩,使得亏损的地幔残余物质重新富集。Kaaresvåg 克拉通西南部的橄榄岩捕虏体具有高的斜方辉石和橄榄石比例,可能反映了与下插板片相关的富硅流体的交代作用^[32]。捕虏体中环状石榴石^[9,33]、含金刚石捕虏体的边缘矿物与内部矿物相的差异^[34-35]等的研究表明,在交代过程以及伴随着的氧化过程中,方辉橄榄岩转变为二辉橄榄岩。金伯利岩-碳酸岩中含单斜辉石、二辉橄榄岩中的石榴石和金云母等矿物,也反映了流体的交代作用。如金刚石和它相关的亚钙石榴石可能反映了来自软流圈的富CH₄含Si的流体交代亏损的方辉橄榄岩^[36]。

在北部湾涠洲岛地幔橄榄岩中,发现有低硅熔体分布于解体的橄榄石矿物中,它们将橄榄石分隔成不同的块体,熔体围绕块体隙间分布,提供了低硅熔体是由富硅熔体与橄榄石发生交代作用生成的证据^[37]。

上述富集过程可以用下面的反应解释:(1)富SiO₂熔体+Ol(橄榄石)→贫SiO₂熔体+Opx(斜方辉石),其结果可以产生贫硅的熔体,消耗橄榄石生成斜方辉石,可以使斜方辉石与橄榄石的比例增加。(2)富Al斜方辉石熔体→石榴石+单斜辉石,其结果使单斜辉石数量增加,方辉橄榄岩转变为二辉橄榄岩。(3)Fe₂O₃(铬铁矿中的)+CH₄→C+H₂O+FeO(铬铁矿中的),铬铁矿±橄榄石±斜方辉石+(含Si、Ca)流体→低钙高铬石榴石^[36]。

5 结语

岩石圈地幔是当前固体地球科学研究的重要课题之一,对地幔交代作用及岩石圈地幔组成与演化的认识,将有助于地幔动力学的发展。Griffin等将岩石圈地幔分为Archon、Proton、Tecton三类。总体上看,古老岩石圈地幔亏损程度最大,而年轻岩石圈地幔相对古老岩石圈富集。富集过程主要与地幔交代作用有关。当前地幔交代作用分为显交代作用和隐交代作用2种类型。前者表现为在地幔包体中出现含挥发份矿物,如角闪石、金云母、磷灰石和碳酸盐及钛铁氧化物等。后者表现为不形成交代矿物,而在主元素、微量元素和同位素组成的富集。已发现的交代剂主要为相对富碱的硅酸盐熔体或流体和碳酸岩熔体,其来源有3种:软流圈深部、地幔柱和消减板片(俯冲带再循环物质)。

目前,我国东部大陆岩石圈地幔的研究取得了许多进展,而西部,特别是新疆地区的岩石圈地幔的研究程度较浅,有待进一步的研究。

参考文献:

- [1]邓晋福,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2004:130—139.
- [2]Griffin W L, et al. The composition and evolution of lithospheric mantle: a re-evaluation and its tectonic implications [J]. Journal of Petrology, 2009, 50: 1185—1204.
- [3]Brueckner H K, Medaris L G. A tale of two orogens: the contrasting T-P-t history and geochemical evolution of mantle in high- and ultrahigh-pressure metamorphic terranes of the Norwegian Caledonides and the Czech Variscides [J]. Schweizerische Mineralogische and Petrographische Mitteilungen, 1998, 78: 293—307.
- [4]Brueckner H K, Carswell D A, Griffin W L. Paleozoic diamonds within a Precambrian peridotites lens in UHP genesis of the Norwegian Caledonides [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203: 805—816.
- [5]Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km [J]. Nature, 2000, 407: 734—736.

- [6] Song S, Zhang L, Niu Y. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, northern Tibetan Plateau, NW China [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1330—1336.
- [7] 吴福元 等. 大陆岩石圈地幔定年[J]. *地质前缘*, 2007, 14(2): 76—86.
- [8] Boyd F R. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 96: 15—26.
- [9] Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. The composition and origin of subcontinental lithospheric mantle [A]//Fei Y, Bertka C M, Mysen B O, eds. *Mantle petrology: field observations and high pressure experimentation: a tribute to Francis F. Boyd*. The Geochemical Society, 1999: 13—45.
- [10] Wyatt B A, et al. The Brockman Creek kimberlite, east Pilbara, Australia [A]//Extended Abstracts of 4th International Archean Symposium. AGSO-Geoscience Australia Record, 2001, 37: 208—211.
- [11] Alard O, et al. New insight into the Re-Os systematics of subcontinental lithospheric mantle from in-situ analysis of sulfides [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 651—663.
- [12] Xu X, et al. Re-Os isotopes in mantle xenoliths from eastern China: age constrains and evolution of lithospheric mantle [J]. *Lithos*, 2008, 102: 43—64.
- [13] Smith D, Boyd F R. Compositional heterogeneities in a high-temperature lherzolite nodule and implications for mantle processes [A]//Nixon P H, ed. *Mantle Xenoliths*. New York: John Wiley, 1987: 551—562.
- [14] Smith D, et al. Compositional evolution of high-temperature sheared lherzolite PHN1611 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 605—613.
- [15] Bailey D K. Volatile flux, heat focusing and the generation of magma [J]. *Geo J Spec*, 1970, 2: 177—186.
- [16] Dawson J B. Kimberlites and their xenoliths [M]. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [17] Hart B. Metasomatic and enrichment phenomena in garnet peridotite facies mantle xenoliths from the Matosoku kimberlite pipe, Lesotho [A]//Menzies M A, Hawesworth C J, eds. *Mantle Metasomatism*. Academic Press, 1987: 125—153.
- [18] Menzies M A, Murthy V R. Nd and Sr isotope geochemistry of hydrous mantle nodules and their host alkali basalts: implications for local heterogeneities in metasomatically veined mantle [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 46: 323—334.
- [19] 周新华. 初论中国东部大陆地幔地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1987, 2: 52—52.
- [20] 周新华 等. 中国东部新生代玄武岩同位素体系和地幔化学区划 [A]//刘若新 编. *中国新生代火山岩年代和地球化学*. 北京: 地震出版社, 1992: 366—391.
- [21] Andersen T, et al. Primary sulphide melt inclusions in mantle-derived megacrysts and pyroxenites [J]. *Lithos*, 1987, 20: 279—294.
- [22] Fan C Q, et al. Mid-acidic silicate melt found in continental mantle of eastern China [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1997, 40(10): 879—880.
- [23] 樊祺诚 等. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1529—1537.
- [24] Mattielli N, et al. Evaluation of heterogeneous lithospheric mantle in a plume environment beneath the Kerguelen Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40: 1721—1740.
- [25] Le Roex A P, Lanyon R. Isotope and trace element geochemistry of Cretaceous Damara Land lamprophyres and carbonatites, North western Namibia: Evidence for plume-lithosphere interactions [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 1117—1146.
- [26] Stevenson R, et al. Crust-mantle interaction in the evolution of the Ilimaussaq Complex, South Greenland: Nd isotope studies [J]. *Lithos*, 1997, 40: 189—202.
- [27] MacDonald R, et al. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 877—900.
- [28] Griffin W L, et al. The evolution of lithospheric mantle beneath the Kalahari Craton and its margins [J]. *Lithos*, 2003, 71: 215—242.
- [29] Hoal K O. Samples of Proterozoic iron-enriched mantle from the Premier kimberlite [J]. *Lithos*, 2004, 71: 259—272.
- [30] Simon N S C, et al. The origin and evolution of the Kaapvaal cratonic lithospheric mantle [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48: 589—565.
- [31] Cox K G, et al. Textural studies of garnet lherzolites: evidences of exsolution origin from high-temperature harzburgites [A]//Nixon P H, ed. *Mantle Xenoliths*. New York: John Wiley, 1987: 537—550.
- [32] Bell D R, et al. Silica and volatile-element metasomatism of Archean mantle: a xenoliths-scale example from the Kaapvaal Craton [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 150: 25—267.
- [33] McCammon C A, et al. Oxidation during metasomatism in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, South Africa [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141: 287—296.
- [34] Stachel T, et al. Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 159: 1—12.
- [35] Creighton S, et al. Diamondiferous peridotitic microxenoliths from the Diavik diamond mine, NT [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007.
- [36] Malkovets T, et al. Diamond, subcalcic garnet and mantle metasomatism: kimberlite sampling patterns define the link [J]. *Geology*, 2007, 35: 339—342.
- [37] 樊祺诚 等. 北部湾涠洲岛橄榄岩中熔体包裹体——大陆岩石圈地幔交代作用的新证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2495—2500.

ASSESSMENT FOR THE HEAVY METAL POLLUTION IN THE SEDIMENTS OF WULIANGSHUHAI LAKE, INNER MONGOLIA

LIU Jun-ting^{1,2}, PAN Hong-jie², ZHAO Suo-zhi^{1,2}, ZHONG Ren², LIU Yin-biao^{1,2}, ZHAO Jin-zhong², FANG Yong-gang²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China)

Abstract : Based on survey data of the sediments (0 – 20 cm) collected from Wuliangshu Lake, the risk of heavy metal pollution is assessed by ecological risk index method. According to the national standard of ocean sediment quality (first level), threshold effective level and national standard of soil quality (first level), the lake presents a combined pollution, mainly with pollutants of Cu, Cd, Ni and Zn. There are a remarkable correlation among the total contents of Pb, Cd, As, Cu, Cr, Hg and Zn, suggesting the same origin of pollutants. The ecological risk index method shows that most part of the lake is of slight pollution risk. The extreme pollution areas are distributed only near the mouth of three drainage-irrigation channels. The other areas are heavily polluted.

Key words : sediment; heavy metal; pollution risk; Inner Mongolia

作者简介: 刘俊廷(1968—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,高级工程师,1992年7月毕业于长春地质学院水工系,现从事水文地质、工程地质、环境地质研究工作,通信地址 呼和浩特市金桥开发区世纪五路 内蒙古自治区地质调查院,邮政编码 010020, E-mail// 549620056@qq.com

(上接第 314 页 / continued from Page 314)

COMPOSITION AND METASOMATISM OF SUB-CONTINENTAL LITHOSPHERIC MANTLE

RU Yan-jiao

(College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract : Based on previous researches, the methods and objects for the sub-continental lithospheric mantle are reviewed and summarized. The lithospheric mantle is classified into three types by Griffin, i.e. Archon, Proton and Tecton. The composition of the Archon continental lithospheric mantle is a strong loss relatively to the primitive mantle; that of most of the Tecton is modest loss; while that of the Proton continental lithospheric mantle is between the former two. Generally speaking, ancient lithospheric mantle is the most depleted; while young lithospheric mantle is relatively richer than the ancient one. The enriching process is mainly concerned with mantle metasomatism. From the aspects of metasomatic patterns and the nature and source of media, with study on the xenoliths/xenocrysts of mantle, the enriching processes of lithospheric mantle can be well recognized.

Key words : sub-continental lithospheric mantle; enriching process, mantle metasomatism

作者简介: 茹艳娇(1986—),女,在读硕士研究生,2009年毕业于长安大学地质学专业,现主要从事于矿物学、岩石学、矿床学专业学习研究,通信地址 陕西省西安市雁塔路126号 长安大学资源学院,邮政编码 710054, E-mail// lanzixing160@163.com