科学通报 2009 年 第 54 卷 第 14 期: 1990 ~ 2007
专题: 华北克拉通破坏 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

# 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程

郑建平

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
E-mail: jpzheng@cug.edu.cn

2008-11-24 收稿, 2009-03-25 接受
国家自然科学基金资助项目(批准号: 90714002, 40673002, 40821061)

摘要 华北克拉通地幔破坏作用, 使之成为世界研究大陆形成演化的最理想地区之一. 但有关破坏机制、时限、范围及其动力学背景, 甚至破坏前岩石圈状况等相关联问题都存争议. 华北东部不同时代(如古生代、中生代和新生代)、位置(如地块内部与边缘、郯庐断裂带和重力梯度带)火山岩所携带捕虏体橄榄岩, 及其南侧苏鲁-大别造山带地质体橄榄岩等直接的岩石圈地幔物质对比表明: 华北古老岩石圈是不均一的、存在幔内薄弱带, 中生代、新生代岩石圈减薄作用包括地幔伸展、熔体-岩石作用、不均匀侵蚀减薄与小幅增生增厚, 从而实现难熔克拉通地幔被新生饱满岩石圈地幔置换作用等复杂过程. 早中生代时, 扬子大陆深俯冲碰撞引起华北岩石圈的完整性受影响甚至破坏、边缘受俯冲陆壳释放熔/流体交代改造、岩石圈地幔伸展和构造侵位以及受山根断离扰动软流圈物质上涌侵蚀等; 早白垩世-早第三纪时, 太平洋板块俯冲进一步扰动软流圈并强烈上涌侵蚀上覆岩石圈引起它的巨大减薄作用; 晚第三纪以来上涌软流圈的热沉降作用带来小幅度岩石圈增生增厚过程, 最终实现了已存岩石圈被新生地幔置换和岩石圈整体的减薄作用, 并由此构成了陆内造山和克拉通盆地形成耦合过程的深部驱动力. 郯庐等岩石圈深大断裂带是软流体物质上涌的良好通道, 同时由于在岩石圈内部起通道作用的幔内薄弱带是不规则的, 它们引导着软流圈物质侵蚀岩石圈和岩浆喷出地表的时间存在早、晚不一致现象. 喷发时代为 100 Ma 的玄武岩所捕获的橄榄岩主体是饱满的, 说明华北东部的一些地区在此之前(如 125~100 Ma)曾有过地幔置换作用发生.

关键词
克拉通破坏
华北
地幔橄榄岩
不同时空背景
不均匀性
增生置换

大陆岩石圈是如何聚结、增生和破坏并实现其演化, 是当前地球科学研究中的主题之一. 随着地球物理手段、地球化学理论和测试技术、高温高压实验以及计算机技术的迅猛发展, 以不均一性为先导的圈层相互作用研究所取得的丰硕成果[1], 促使人们对地球圈层结构、物质组成及其相互作用过程的认识不断深化, 加深了对地球内部动力学的了解[2,3]. 加之, 随着单一板块构造理论面临的挑战[4,5]和全球尺度岩石圈计划[6]的实施, 大量的科学事实迫使固体地球科学家再次将目光转向大陆, 特别是其深部. 三维地震层析提供了现今地球深部结构模型, 但在反演地质历史时期的岩石圈状态时遇到了困难; 相反, 开展大陆内部由不同时代深源岩浆(如金伯利岩/钾镁煌斑岩和玄武岩)所携带地幔物质(捕虏体/捕虏晶)的直接研究, 特别是与其周边造山带构造侵位地幔橄榄岩(如造山带橄榄岩)的对比, 可以更全面地获得不同历史时期岩石圈的地幔性质和块体间相互作用等重要信息[7]. 本文拟就最能反映岩石圈地幔的物质——橄榄岩的

**引用格式**: 郑建平. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程. 科学通报, 2009, 54: 1990~2007
Zheng J P. Comparison of mantle-derived matierals from different spatiotemporal settings: Implications for destructive and accretional processes of the North China Craton. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0308-y

属性对比，主要探讨华北克拉通深部破坏和岩石圈减薄的复杂机制.

## 1 华北克拉通破坏命题由来与学术争论焦点

通常情况下，大陆岩石圈地幔与其上覆地壳形成年龄应该是耦合一致的[8]. 然而，强烈的软流圈与岩石圈、地壳与地幔相互作用可以使这一耦合受到破坏[2,3]. 与大洋岩石圈相比，大陆岩石圈有密度低、演化历史复杂等特点，其中又以太古宙克拉通岩石圈密度最轻、地温低且能长期稳定存在为特征，并表现出克拉通化作用之后基本上无明显的构造-岩浆活动等，而成为地球表面最稳定的地区. 世界上包括西伯利亚、南非和澳大利亚等地的克拉通，均具有这样的性质. 我国的华北地块作为世界上最古老的(>36 亿年)[9,10]克拉通之一，则出现了与世界其他绝大多数地区克拉通明显不同的行为. 古生代时含金刚石金伯利岩(如蒙阴和复县)侵位，显示华北东部当时的岩石圈状态总体上是“稳定的”，~200 km厚的低密度克拉通根具低热流值的特点，并主要由难熔的方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩组成[11~13]；中生代、新生代时该区大量的含能源盆地形成、频繁的构造-岩浆活动，软流圈上涌、顶面最浅处至 60~80 km，玄武岩所捕获的橄榄岩总体上具类似“大洋型”的饱满地幔特征[14~19]，表明长期稳定存在的华北太古代克拉通(特别是其东部)发生了去根破坏(或减薄置换)作用[20~27]，被认为是世界上古老克拉通地幔被移离的最佳实例[28]. 但有关克拉通破坏发生的机制、时限、空间范围和动力学背景等彼此相关联的科学问题还存在激烈的学术争论[29~40].

仅克拉通破坏(或岩石圈减薄)机制，就有岩石圈拆沉[39~43]和软流圈侵蚀[44~52]两种完全不同的解释. “拆沉作用”强调岩石圈重物质“突发的”下沉是主因，着重物理过程，其中又有“整体的一次拆沉”与“局部的多次拆沉”、“下地壳拆沉”与“整个岩石圈拆沉”等不同认识. “侵蚀作用”则强调软流圈热物质“逐渐的”上涌为主导，强调化学过程，同样也有均匀侵蚀作用[23]、地幔置换[24,53,54]或熔体-岩石作用[45~47,50,51,55]等差别. 此外，还有裂谷作用和俯冲脱水等模型来解释这一破坏过程[56]. 就一般性而言，在造山带或陆块边缘“拆沉”也许是主因，但在克拉通内部软流圈物质上涌往往占主导，它们可能共同构成区域性的地幔物质对流. 同时，越来越多的研究还发现，岩石圈减薄作用可能与其周边不同时期板块俯冲和/或碰撞所引起的地幔伸展有关[57].

就克拉通破坏时限而言，由于岩石圈减薄与软流圈上涌总是相伴的，同时软流圈地幔上涌会引发上覆圈层(如地壳)一系列的构造-岩浆-成矿-成盆事件. 据此，多数学者认为华北东部的岩石圈减薄应该发生在中生代、新生代[24]，但就具体的起始时间也有三叠纪[58]、侏罗纪-早白垩世[22,59,60]和晚白垩世-新生代[61~64]等不同看法. 关于克拉通破坏的空间范围，是仅限于华北内部，还是包括了华南和东北地区在内的整个中国东部[16,26,65]；在纵深方面，是只发生在岩石圈上地幔，还是涉及到了下地壳[66,67]，也都存在争议. 有关华北克拉通破坏的动力学背景或影响因素，有来自北侧西伯利亚板块与华北板块增生拼合作用、南侧扬子板块向华北板块的俯冲碰撞作用[39,41,50,51,68]、东侧太平洋板块的俯冲扰动作用[7,22,33]、印度同欧亚大陆碰撞的远程影响[20]及板内软流圈物质上涌[69,70]等不同解释.

上述激烈争论，其实质是对显生宙以来华北岩石圈的精细结构和组成了解不够有关. 其中最关键的是：(1) 对克拉通破坏前的(如古生代)岩石圈地幔不均一性状况不清楚；(2) 中生代、新生代时，被破坏的克拉通岩石圈地幔到底那里去了？是“向下拆沉掩埋”、还是“侵蚀反应转变”，或是存在“侧向伸展”？如果是拆沉埋没，则不容易寻找，只能根据一些特殊深源火山岩的源区地球化学特征进行间接判断；如果是侵蚀反应转变，则在中生代、新生代火山岩的地幔捕虏体中可能较容易找到反应的残留，而且随被捕获时代越新转变程度将越彻底；如果存在侧向伸展，则可能在华北地块周边造山带(如苏鲁-大别造山带)中找到痕迹. 此外，中生代、新生代时华北地块内部不同性质地幔(如难熔、饱满以及它们的过渡类型)所表现的岩石圈组成结构关系，如分层、交叉或过渡等，也将记录着动力学演化机制等丰富信息.

## 2 直接的地幔物质对比是解决克拉通岩石圈地幔破坏问题的关键

由寄主火山岩所携带的深源岩石捕虏体/捕虏晶，及由构造侵位的超高压橄榄岩(如造山带橄榄岩)等作用所带来的直接地幔物质，是人们认识岩石圈深部过程的最直接的宝贵样品. 建立在这些资料基础上的解释性模型，应该最能说明问题. 克拉通地幔经

历着长期复杂熔融岩浆提取(亏损)作用和地幔交代(富集)过程, 因此, 如何建立岩石圈内壳-幔地质事件的联系已成为当今深部地质研究的前沿课题[71,72]. 以橄榄岩为主体的岩石圈地幔通常被认为是原始地幔经不同熔融程度抽取玄武岩浆之后的残留物[73], 并可能受后期熔/流体交代作用的影响或熔/岩相互作用的复杂改造[1,74]. 因此, 全岩和组成单矿物的化学成分, 包括主元素、微量元素、铂族元素和同位素等, 可从不同侧面反映岩石圈地幔属性及其所经历的深部作用过程. 受抽取程度高的橄榄岩, 玄武质组分含量低, 表现为贫Cpx、橄榄石高$Mg^{\#}$值的“难熔”(refractory)和漂浮地幔特点; 相反, 则表现为富Cpx、橄榄石低$Mg^{\#}$值的“饱满”(fertile)地幔特征. 此外, 在描述橄榄岩不相容微量元素及其所记录地幔交代作用程度时, 常会用到“亏损”(depletion)和“富集”(enrichment)两术语. 只经历部分熔融作用而未受交代改造的地幔, 不相容微量元素含量低(如亏损LREE); 相反, 受交代改造的地幔, 不相容元素含量高(如富集LREE)等. 因此, 由于地幔交代作用的改造, 橄榄岩中可能出现主元素仍表现难熔特征、而不相容微量元素则体现富集特点的不一致“解耦”现象, 如太古代克拉通地幔就通常具有这样的性质[7,8,61]. 相反, 大洋岩石圈地幔由于形成年龄新, 受交代改造的程度明显比克拉通地幔弱.

与火山岩容易受地壳物质混染影响而使地球化学数据存在多解性相比, 无疑橄榄岩的组成、年龄及在此基础上的岩石圈三维结构几何模型的精确确立[75], 是进行大陆岩石圈四维填图和动力学演化研究的最有效基础[3]. 深源岩石(包括上地幔和下地壳)捕虏体的岩石学、地球化学和岩石物性研究, 是岩石圈三维结构(速度和密度)解释的关键. 与定性相结合的定深、定年研究, 可以深刻揭示克拉通破坏物理、化学过程[2], 是深部地质研究的关键, 也是难点. 含石榴石的深源岩石(如橄榄岩、辉石岩、麻粒岩和榴辉岩等)在华北不断发现和积累, 使定深(及古地温)研究逐渐得到重视并取得成效[7,16,76,77]. 岩石圈地幔组成与年龄的确切关系尽管还有争议[8,78], 但太古代克拉通地幔高度难熔、显生宙地幔相对饱满的事实已被广泛认同[16~20,61,73]. 世界上其他著名的Kaapvaal克拉通和Siberia克拉通都不存在简单的垂直年代分布特征, 而表现为不同年龄并置的复杂结构图案[2], 这些都可能与克拉通内部存在复杂的多发地幔事件有关; 相反, 大洋岩石圈地幔结构图案则明显简单.

图 1 表示了华北不同时空背景直接地幔物质的取样情况, 体现着天然火山深钻与大陆钻探工程的紧密结合. 山东蒙阴、辽宁复县含矿金伯利岩侵位于古生代, 所含深源岩石捕虏体包括橄榄岩、麻粒岩、辉石岩和云母岩等, 可以很好地限定克拉通破坏前的岩石圈状态[7,11~13]. 河南信阳位于华北地块的南缘, 发育~160 Ma时喷发的玄武安山岩, 这些火山岩除有丰富的下地壳岩石捕虏体外, 也有橄榄岩捕虏体[10,52,58,75,79]. 橄榄岩除尖晶石(Sp)和透辉石(Di)新鲜外, 橄榄石(Ol)和斜方辉石(Opx)多被滑石取代. 这些橄榄岩所具低Di含量和高$Sp\text{-}Cr^{\#}$, 可知其属难熔地幔性质, 但强烈受早中生代俯冲碰撞作用的改造[58].

华北北缘的辽宁阜新玄武岩K-Ar年龄~100 Ma[80~82], 属于早白垩世火山作用产物. 其中的捕虏体主要为尖晶石二辉橄榄岩, 但有~5%的方辉橄榄岩. 除方辉橄榄岩粗粒结构外, 其他多为斑状结构、少量剪切结构和细粒结构. 产于南北重力梯度带以西的玄武岩, 包括河北汉诺坝(~22 Ma)、阳原(~30 Ma)和山西繁峙(~40 Ma), 它们都包含有丰富以二辉橄榄岩为主的捕虏体. 山东山旺和栖霞分别位于郯庐断裂带内和东侧, 喷发时代分别为16和12 Ma[83]. 尽管两地捕虏体主体均为尖晶石二辉橄榄岩, 但与栖霞橄榄岩相比: 郯庐断裂带内山旺没有方辉橄榄岩、没有粗粒结构, 剪切结构和细粒结构所占比例大且单斜辉石含量高[17]. 位于郯庐断裂带以西部约 400 km的南北重力梯度带东侧河南鹤壁玄武岩, 其岩浆喷发时代很新, 是 4 Ma[84]. 其中的捕虏体橄榄岩均为尖晶石相, 但多为方辉橄榄岩; 即使是二辉橄榄岩, 所含单斜辉石含量也很低. 岩石多为粗粒结构, 细粒、剪切结构少. 方辉橄榄岩所占比例与古生代金伯利岩中者相似, 不同在于: 古生代中者是石榴石相, 新生代中者为尖晶石相. 这些橄榄岩被认为是古老岩石圈地幔的浅部残留[61].

取自中国大陆超深钻探工程的先导孔(CCSD-PP1)芝麻坊(苏鲁带)和饶拔寨(大别带)地质体橄榄岩(或造山带橄榄岩)以断片形式与片麻岩接触[85~87], 并同片麻岩一起共同经历了超高压变质作用[68, 88,89].

## 3 华北古老岩石圈不均一性与幔内薄弱带存在

华北古生代金伯利岩中的捕虏体橄榄岩最丰富,

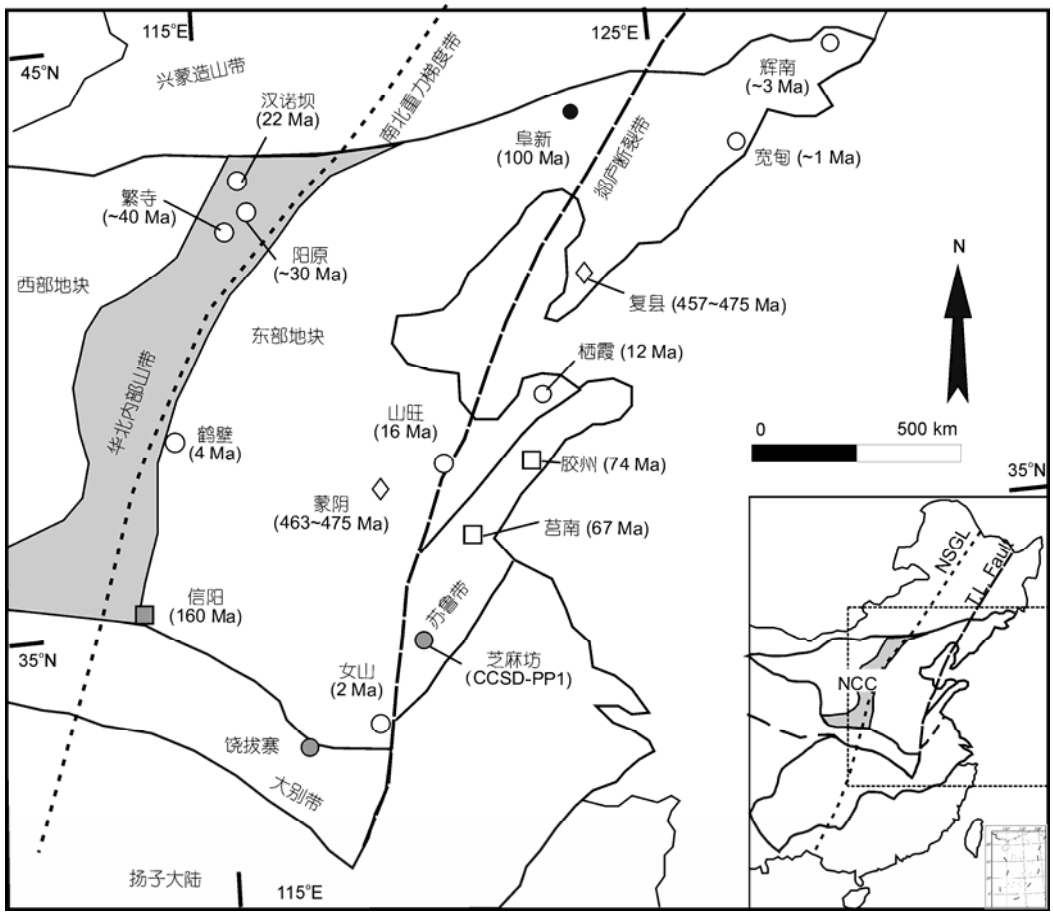


**图 1　华北东部具橄榄岩捕虏体火山岩及部分地质体橄榄岩的出露位置**

括号中数据为火山岩喷发年龄; NCC，华北克拉通; CCSD-PP1，中国大陆科学钻探工程先导孔; NSGL：南北重力梯度带; T. L. Fault，郯庐断裂带

占所发现深源岩石捕虏体的 85%以上. 这些橄榄岩捕虏体多遭受强烈蚀变，除石榴石、铬尖晶石类矿物有新鲜残余外，橄榄石(蒙阴有极少量新鲜残留)和辉石多被蛇纹石、绿泥石及碳酸盐矿物等取代，因此给准确的结构恢复、岩石定名和深入研究增加了难度. 但根据蚀变物蛇纹石等集合体的特点，包括颗粒的外形、残存解理的痕迹以及蛇纹石与碳酸盐矿物的分布和量比，可以区分橄榄石和辉石，有些情况下可以区分两种辉石[11~13]. 结合石榴石的成分特征，查明的橄榄岩捕虏体主要由石榴石方辉橄榄岩、石榴石/铬铁矿二辉橄榄岩、铬铁矿纯橄榄岩、异剥橄榄岩及具辉石岩脉的橄榄岩复合岩石组成. 其中复县的二辉橄榄岩约占 54%，方辉橄榄岩占 34%；蒙阴岩区的纯橄榄岩及方辉橄榄岩比例略高于复县岩区. 由人工重砂矿物石榴石成分所确定的$G_9$(二辉橄榄岩型)和$G_{10}$(方辉橄榄岩型)的比例[24]，也显示华北地台东部岩石圈地幔具有较高比例的二辉橄榄岩，表明华北克拉通化后的深部作用过程要比南非克拉通强且复杂，且存在不均一性，但都还具有太古代克拉通地幔的属性[11~13,24,29,53,90].

幔内薄弱带[17]是指地幔内与流体活动密切相关的地幔伟晶岩带[24]、幔内剪切带[91]及地幔富集带[1]. 华北古老岩石圈地幔中熔/流体活动形成的地幔伟晶岩，如粗粒的石榴石辉石岩，不但富含流体、LREE，也富含放射性生热元素，加上岩石粒度粗大，受碎解的稳定性较差，后续的流体传质作用容易渗透和平流，起到薄弱带的作用[92]；此外，广泛发育的反映岩石圈流变行为的残碎斑状结构和剪切变形结构等，而且这些结构的橄榄岩更富集不相容元素，是幔内剪切带变形的产物，变形的趋动力与流体的交代作用密切相关. 地幔剪切带中存在流体、热、化学及机械应力的耦合作用[93]. 流体作为一种传质介质，在构

造动力成岩中对变形岩石的化学成分起到了明显的带入或带出作用，体系是开放的[94]，在岩石从脆性向脆韧性变形转换过程中起着重要的影响作用，特别是流体所导致的弱化是应变软化的重要途径，可以增加润滑性，减少滑动阻力，加速压溶作用和组分的迁移. 大陆岩石圈结构、岩性的不均一性是造成应变易于集中的原因，应变往往在地质单元的薄弱处集中，结果岩石圈中的弱化岩石就成为应变集中的地带，而应变软化和应变局部化又增加或导致了大陆岩石圈结构的更加不均一性[24]. 剪切热效应导致剪切带内介质的弱化和软化，降低了岩石的强度、密度和黏度，同时由于均衡补偿效应可以使地幔上隆，并发生减压熔融岩浆作用，同时部分熔融物又引起矿物颗粒边界弱化，使上地幔的流变强度和有效黏度进一步降低，并使高温位错蠕变机制部分被熔融强化扩散蠕变和熔融动态重结晶作用代替. 岩石的不断细粒化和动态重结晶是应变软化形成的表现；剪切应力作用可以使矿物的晶格结构发生畸变，增加其内部和表面的缺陷，加速和促进压溶作用及固相之间反应的表面化学行为[13]. 这些幔内薄弱带是不规则的，并起着后续软流圈物质上涌甚至侧向流动的通道作用[17,44].

## 4 苏鲁-大别造山带中可能有来自华北的岩石圈地幔

大别-苏鲁超高压带有地质体橄榄岩，可分为壳源和幔源两种类型[95]. 前者被认为是大陆俯冲作用之前、侵位于地壳的超镁铁质-镁铁质杂岩(岩浆分离结晶)并随俯冲碰撞发生超高压变质作用产物，因此这类橄榄岩常与辉石岩(或榴辉岩)共生且发育堆晶结构、橄榄石低$Mg^{\#}$值等特征(如碧溪岭)[89,96]. 后者的来源很复杂，可以是消失的大洋岩石圈、或俯冲大陆岩石圈，也可以是俯冲带上盘岩石圈(或地幔楔)，甚至也可能有软流圈地幔物质[96~98]. 在大别造山带，饶拔寨超镁铁岩体被认为是岩石圈地幔并经历了麻粒岩相-角闪岩相的再平衡过程产物[99,100]，全岩Os同位素代理等时线年龄和$T_{RD}$模式年龄均为 1.8 Ga[101]，橄榄岩的主、微量元素(包括铂族元素)和锆石Hf同位素研究可能表明它们是受俯冲扬子大陆释放熔/流体交代的华北岩石圈地幔楔[89].

在苏鲁造山带，多数地质体橄榄岩(如许沟和芝麻纺)被认为是受交代了的岩石圈地幔碎块，有不同演化历史或不均一来源的认识[102]，但多经历了三叠纪超高压变质作用[68,89]. 基于早元古代的橄榄岩Re-Os模式年龄，许沟橄榄岩被认为来自扬子地块[103]；然而与之位置很近的芝麻坊CCSD-PP1 橄榄岩，则可能与华北有亲缘性[7,68,98,104]. 理由包括: (1) 岩石和矿物的主元素和单斜辉石的微量元素所记录着的地幔属性和交代介质信息与华北古老地幔非常相似，一些小的差别则与造山带橄榄岩所经历复杂超高压变质在平衡作用有关，因为捕虏体橄榄岩没有这样过程; (2) 假设CCSD-PP1 橄榄岩来自俯冲扬子大陆岩石圈地幔，一个很难解释的事实是: 为什么大别-苏鲁造山带中地质体橄榄岩所占比例非常小，这与大陆岩石圈中上地幔厚度多大于地壳厚度的比例明显不符; (3) CCSD-PP1 橄榄岩锆石Hf同位素表现出地质体橄榄岩与围岩片麻岩明显不一致，前者代表古老地幔、后者属年轻的地壳物质并明显属于扬子大陆，因此这些橄榄岩是来自华北岩石圈的构造“冷”侵入体的可能非常大[7,68].

苏鲁造山带CCSD-PP1 橄榄岩和大别造山带饶拔寨橄榄岩与华北克拉通地幔的亲缘关系表明，华北克拉通岩石圈主体至少保留到了早中生代扬子板块俯冲-碰撞之前. 深达 200 km的扬子大陆的深俯冲碰撞无疑会使华北岩石圈的完整性受损，同时其边缘受俯冲陆壳释放熔/流体交代的改造作用，受俯冲影响华北岩石圈地幔会出现伸展的构造体制，加之受山根断离扰动软流圈物质会进一步上涌侵蚀华北岩石圈. 由于造山带橄榄岩属性及其来源的研究尤其重要，这就要求人们对扬子大陆的地幔属性[105]也有相当程度的了解.

## 5 华北东部岩石圈地幔属性对比

### 5.1 岩石圈地幔的难熔或饱满性质

华北不同时代、位置地幔橄榄石$Mg^{\#}$值高低分布情况见图 2. 根据对华北地区的资料积累，橄榄石$Mg^{\#}$值大于 92，代表难熔地幔[61]；小于 90，反映饱满地幔[17]；因此，$Mg^{\#}$值在 92~90 间，为过渡类型[7,37,54,74]. 古生代蒙阴-复县金伯利岩中金刚石包裹体、捕虏体/捕虏晶橄榄石$Mg^{\#}$值主体在 92 以上，仅有极个别在92~90间，没有低于90者. 主体是难熔地幔特征的还包括鹤壁上新世玄武岩中的橄榄岩捕虏体. 所不同的是鹤壁橄榄岩中有少量饱满和过渡型的样品，同时古生代中者(蒙阴-复县)是石榴石相的、

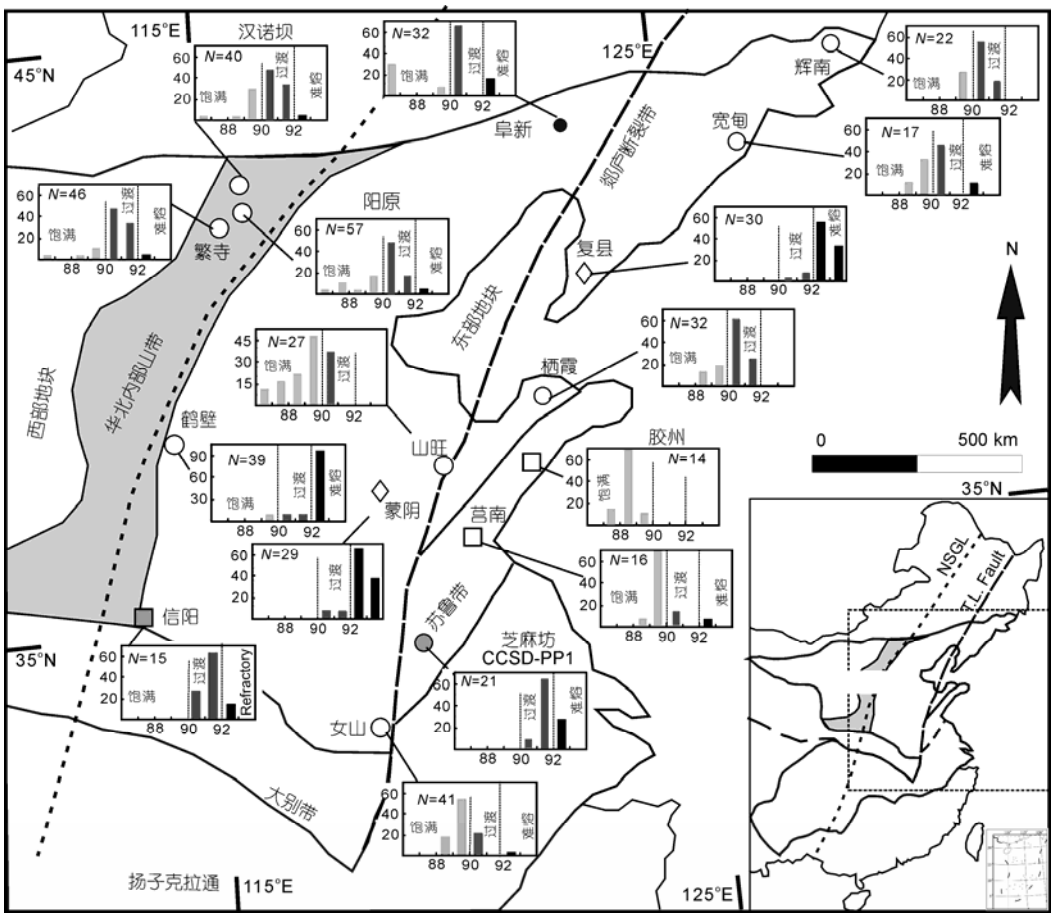


**图 2　华北东部不同时代地幔橄榄石 $Mg^{\#}$值分布特征**

资料来源：蒙阴和复县，文献[7, 24]；大陆科学钻先导孔地质体橄榄岩，文献[7, 68, 102]；阜新，文献[37, 60, 62]；胶州，文献[63]；莒南，文献[64]；阳原、繁峙，文献[106~108]；汉诺坝，文献[78, 109, 110]；山旺，文献[7, 17]；栖霞，文献[17, 78]；鹤壁，文献[61]；辉南和宽甸，文献[111~113]；女山，文献[16]

而新生代中者(鹤壁)是尖晶石相的(代表克拉通地幔的浅部残留). 苏鲁造山带芝麻坊(中国大陆科学钻先导孔CCSD-PP1)和大别造山带饶拔寨早中生代构造侵位地质体橄榄岩，及晚中生代阜新和莒南捕虏体橄榄岩以过渡类型为主含少量难熔者，其中捕虏体橄榄岩中还有部分样品的$Mg^{\#}$值低至 86~87. 以过渡类型为主的地区，还包括新生代阳原、繁峙、汉诺坝、栖霞、辉南和宽甸的捕虏体. 其中在汉诺坝和宽甸也有少量难熔样品. 以饱满型地幔为主的地区，包括晚中生代胶州，和郯庐断裂带上及其附件的新生代山旺和女山的捕虏体，其中女山有少量难熔样品. 信阳早中生代捕虏体橄榄岩由于强烈蚀变，没有新鲜的橄榄石和斜方辉石，但从残存的单斜辉石和尖晶石及其平衡计算可知其难熔特征[52]. 不难发现，华北东部中生代、新生代岩石圈地幔存在明显的时、空上的高度不均一性，并且整体上有早中生代以前的地幔比较难熔，但在早白垩世以来的样品中又不完全随被捕获时间变新而饱满的现象.

### 5.2　岩石圈地幔的交代作用

在无水“干”体系的四矿物相橄榄岩中，单斜辉石由于熔点较低记录着部分熔融作用和地幔交代作用的丰富信息. 在尖晶石相橄榄岩中，低的HREE丰度反映着高的部分熔融程度，高的LREE丰度则记录着强烈的地幔交代作用. 具低HREE丰度但又LREE强烈富集的样品，主要包括古生代-早中生代中的地幔单斜辉石，如蒙阴捕虏体/捕虏晶、复县金刚石包裹体、东海早中生代(~220 Ma)超高压地质体地幔单斜辉石、和信阳早中生代(160 Ma)滑石化橄榄岩捕虏体中的残留单斜辉石. 鹤壁新生代(4 Ma)橄榄岩捕虏体可以分为高$Mg^{\#}$和低$Mg^{\#}$两种类型[61]. 这些单斜辉石

多呈HREE丰度低、LREE强烈富集的正弦曲线形式，表现为亏损-富集-再亏损深部作用过程. 具明显富集LREE特征的单斜辉石还可以在晚中生代莒南，新生代汉诺坝、宽甸、女山等地区的捕虏体中找到[57]. 相反, HREE含量高、LREE表现亏损到弱富集的单斜辉石，主要发现于早白垩世(~100 Ma阜新)以来所有地区的捕虏体橄榄岩石中(鹤壁除外).

无水“干”体系橄榄岩中单斜辉石微量元素丰度及其关系通常是地幔“隐”交代作用发生与否，甚至是交代介质性质判别的有效指标[114,115]. 其中，$(La/Yb)_N$和Ti/Eu的关系图常被用来区分地幔交代作用中常见到的介质-碳酸岩与硅酸盐熔体[116]：高$(La/Yb)_N$、低Ti/Eu多与碳酸岩熔体交代作用有关，相反则体现硅酸盐熔体的交代作用(图 3). 体现碳酸岩熔体交代作用样品，包括古生代-早中生代岩石圈中的地幔单斜辉石，如蒙阴捕虏体/捕虏晶、复县金刚石包裹体、东海早中生代超高压地质体地幔单斜辉石、和信阳早中生代滑石化橄榄岩捕虏体中的残留单斜辉石. 鹤壁除个别低 $Mg^{\#}$橄榄岩受硅酸盐熔体交代作用外，多数样品记录着碳酸岩熔体的交代作用信息. 此外，如阜新、莒南、汉诺坝、栖霞、宽甸等地区样品中也有少量记录碳酸岩熔体的交代作用. 相反，早白垩世以来的地幔单斜辉石(除鹤壁外)则记录着硅酸盐熔体的交代作用. 不难发现，在难熔地幔中的单斜辉石均记录着大陆稳定地台区特有的碳酸岩熔体交代作用，而饱满地幔中的单斜辉石则记录着硅酸盐熔体交代的信息，只有少量过渡性地幔单斜辉石的投点处于两者的重叠区.

### 5.3 岩石圈地幔年龄

对辽南复县、辽北铁岭和山东蒙阴金伯利岩中的橄榄岩或铬铁矿所进行 Os 同位素测定获得的 Re 亏

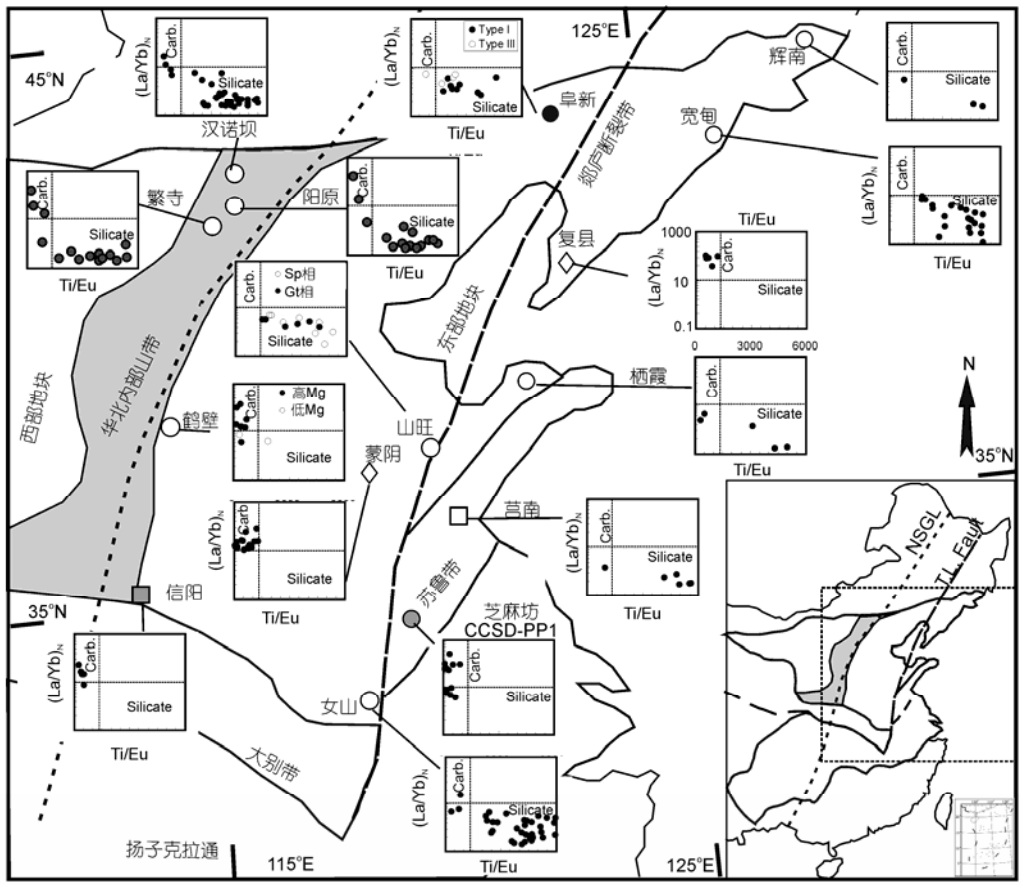


**图 3 华北东部不同时代地幔单斜辉石 Ti/Eu-$(La/Yb)_N$ 相关图**

硅酸盐(Silicate)熔体和碳酸岩(Carb.)熔体交代作用分区，文献[116]; LAM-ICPMS数据来源：蒙阴，文献[7]；复县，文献[57]；信阳，文献[52]；阜新，文献[37]；莒南，文献[64]；阳原、繁峙，文献[106~108]；汉诺坝，文献[78, 109, 110]；山旺，文献[7, 17]；栖霞，文献[17, 78]；鹤壁，文献[61]；辉南和宽甸，文献 [112, 113, 117]；女山，文献[16]

损年龄都是太古代的[29,53,90]，表明华北克拉通古生代时的岩石圈地幔与地壳在时代上总体是耦合的. 而山东栖霞、吉林龙岗、辽宁宽甸等东部地区新生代玄武岩中橄榄岩的Os同位素特点与现代大洋橄榄岩较为类似，即岩石圈地幔在整体上表现为新生特点[29,40,53]，但在宽甸也有不少古元古代Re亏损模式年龄[29]. 河北阳原和山西繁峙地区构造位置上在南北重力梯度带以西，新生代(30~40 Ma)玄武岩中橄榄岩包体的Os同位素特征与东部地区基本类似，有部分样品显示新太古宙-古元古宙的模式年龄[106].

对于汉诺坝新生代玄武岩中橄榄岩，已有较多的年代学积累，如Gao等人[53]和夏琼霞等人[118]分别得到了早元古代(~1.9 Ga)的等线和代理等时线年龄. 余淳梅等人[119]通过对不同产状的硫化物所进行的激光原位分析表明，橄榄石中包裹体硫化物的年龄明显老于以裂隙产出的硫化物，分别是 2.1 和 0.8 Ga. 我们也注意到一个重要事实是，在进行等时线年龄的拟合过程中，都考虑到了原始地幔. 如果不考虑原始地幔，则给出新太古代的年龄[119]. 实际上，华北岩石圈地幔大多经历了复杂的改造过程，已经不具备原始地幔的属性，原始地幔不参与拟合也许更好. 最近，Choi等人[120]得到汉诺坝橄榄岩单斜辉石Lu-Hf等时线年龄也是新太古代的((2587±86) Ma). 在东西部交界处的河南鹤壁地区，新生代 4 Ma时岩石圈总体表现为古老地幔的浅部残留[61]，其中包裹体硫化物激光Os同位素显示这一古老地幔形成于太古宙[37]. Xu等人[36]对华北已有的Re-Os年龄进行了对比，发现不管是全岩的还是硫化物的结果，都存在非常大的变化，从新太古代、早元古代、中元古代、新元古代到显生宙都有，而且全岩年龄的分区性不如硫化物的年龄分区明显. 如果这些年龄都是可靠的，那么，连续的年龄变化则可能意味着持续的熔体-橄榄岩相互作用[121~126]在地幔演化中具重要意义.

## 6 复杂的华北克拉通破坏/减薄过程

### 6.1 拆沉作用不好解释不同属性岩石圈地幔并存的事实

约 200 km 厚的华北古生代克拉通岩石圈，到中生代、新生代时被去根破坏(减薄置换)的事实已被普遍接受. 由于克拉通地幔的高难熔特征(因而漂浮)，在正常情况下不太可能发生大面积的拆沉作用. 只有当: (1) 岩石圈受构造强烈挤压使其密度超过软流圈; (2) 而且壳-幔过渡带所增加物质的重量足以抵消克拉通岩石圈地幔的浮力; 或(3) 岩石圈的流变学条件足够弱化时，拆沉作用才可能发生. 如果我们假设扬子大陆的深俯冲作用[127]把夹持于苏鲁-大别造山带和兴蒙造山带之间的华北岩石圈地幔密度增加到超过软流圈，则拆沉作用应该在早中生代就已发生. 但事实上，从苏鲁-大别造山带地质体橄榄岩[7,68,88,93,102,104]及信阳捕虏体橄榄岩[58,75]性质看，尽管它们都受早中生代俯冲碰撞作用的强烈影响，并未被拆沉而被构造伸展侵位(如东海)或捕获(信阳)出来; 同时，在信阳早中生代捕虏体中还有大量高密度的高压基性麻粒岩、榴辉岩和石榴石辉石岩[79]，看来早中生代的岩石圈拆沉作用在华北岩石圈特别是其内部的减薄中的贡献可能非常有限. 如果我们假设燕山陆内造山作用提供了华北克拉通岩石圈弱化的流变条件，并出现包括下地壳榴辉岩在内的岩石圈不断拆沉作用，那么为什么在鹤壁 4 Ma时还有大量的古老地幔残留[37,61]，同时在阜新、莒南、汉诺坝、女山和宽甸等地均有少量难熔地幔的残存(图 2). 重要的是，早白垩世基性岩浆底侵-变质作用更多的是形成高温(相对低压)麻粒岩的环境，而不太具备高压(相对低温)的榴辉岩背景. 此外，上述地区中难熔的或过渡型的橄榄岩与其主体饱满橄榄岩的平衡温度是重叠的(图 4)，说明具不同性质的岩石圈地幔是交叉并置的，不存在上老下新的分层分带现象. 甚至有些地区地幔橄榄石$Mg^{\#}$是连续变化的，同一样品中不同产状硫化物有明显不同的年龄[119]，显示着陆下岩石圈地幔存在持续的改造过程[27,35,37]. 总之，华北内部古老难熔与新生饱满地幔并存，或大量过渡类型地幔与新、老地幔交叉并存而不存在单纯上老下新的分带现象事实，不能用岩石圈拆沉来解释.

### 6.2 单纯的熔体-岩石作用不易解释岩石圈巨厚减薄和新生饱满地幔亏损 LREE 现象

华北地块内部较长的岩浆活动时限、减薄过程的时空高度不均一性、中生代缺乏大规模软流圈地幔成因玄武岩等，都更倾向于支持“逐渐的”热-化学-机械减薄的模型[23~25,45]. 橄榄岩-熔体的相互作用被认为是岩石圈地幔转变的重要方式[35,51,74]，特别是对于大量过渡型地幔的存在. 连续的年龄变化[36]，可能说明了持续熔体-岩石作用的重要性[121~126]. 反应的熔体来源途径主要有地壳来源和软流圈地幔来源，这些

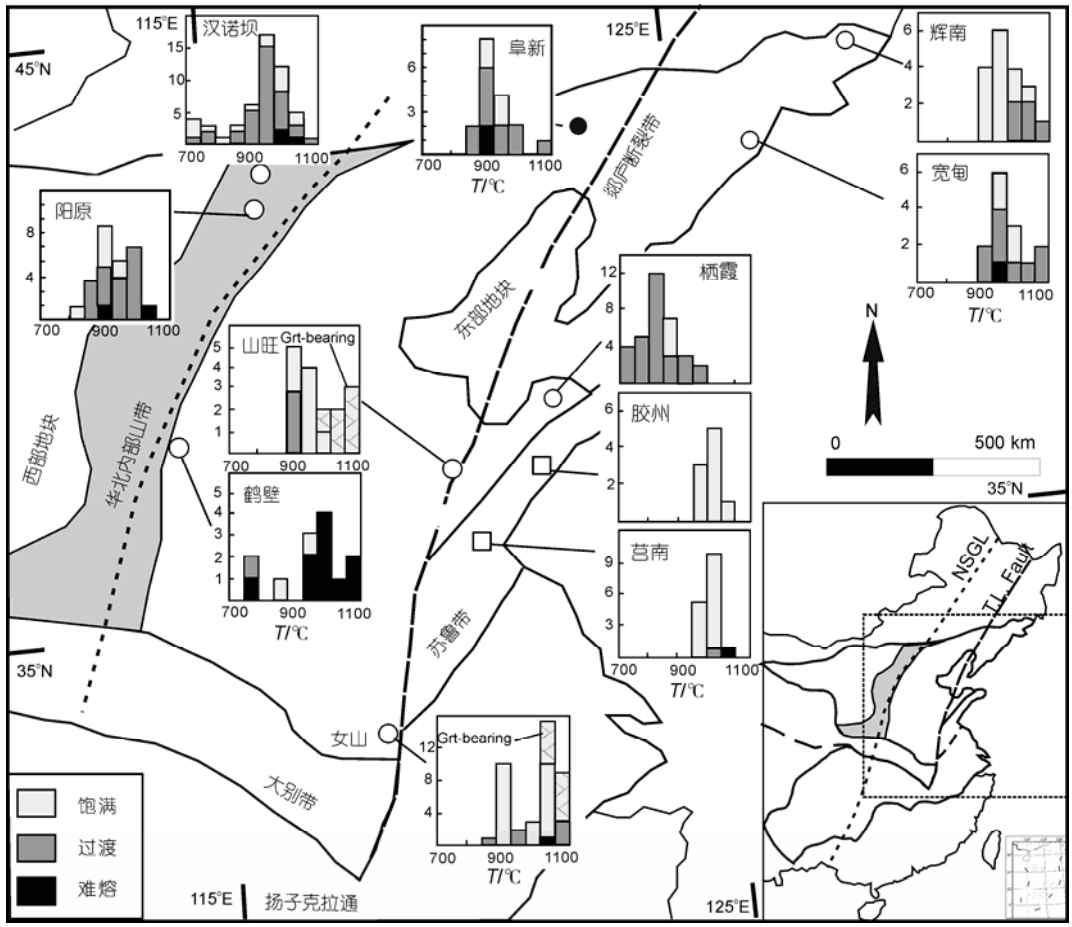


**图 4 华北不同位置中生代-新生代捕虏体橄榄岩的平衡温度对比**

该图在文献[37]基础上有增加. 除阜新的 2 个方辉橄榄岩是根据文献[128]的方法计算外, 其他平衡温度都是在 1.5 GPa条件下采用文献[129]的方法计算结果. Grt-bearing, 含石榴石的橄榄岩. 原始数据来源: 阜新, 文献[37, 60, 62]; 胶州, 文献[63]; 莒南, 文献[64]; 阳原、繁峙, 文献[106, 107]; 汉诺坝,文献[78,109,110]; 山旺, 文献[7, 17]; 栖霞, 文献[17, 78]; 鹤壁, 文献[61]; 辉南和宽甸, 文献[111~113]; 女山, 文献[16]

熔体与橄榄岩作用提供了岩石圈组成转变和快速富集的方式[35,90,121~124]. 但事实上, 与古生代-早中生代地幔单斜辉石相比, 早白垩世(如 100 Ma)以来捕虏体橄榄岩中的单斜辉石通常有较高含量的HREE丰度、特别是弱LREE富集甚至LREE强烈亏损, 因而有 低的$(La/Yb)_N$值(图 3). 其中单斜辉石中的高HREE丰度可以由熔体与橄榄岩相互作用来解释, 但该作用很难解释有的样品出现LREE亏损现象, 即具复杂演化历史的克拉通岩石圈(Cpx富集LREE)向“大洋型”岩石圈地幔[24,37](Cpx出现LREE亏损的现象)的转变[57]. 如果中生代、新生代岩石圈中的地幔橄 榄岩都来自于单纯的熔体-橄榄岩相互作用, 为什么在岩相学组构中很难找到反应的证据, 理论上应该是比较普遍的. 因此, 在地幔中到底有多高的熔/岩比, 将是值得进一步深入研究的课题. 此外, 熔体 与岩石圈橄榄岩相互作用的产物是岩石圈地幔, 而不是软流圈地幔; 再者, 随橄榄岩捕虏体被捕获的时间越新, 应该越饱满, 事实上并不是这样的, 如在 鹤壁 4 Ma时还有太古代地幔残留、而在阜新 100 Ma时已经基本上是饱满的了. 看来在中生代、新生代 岩石圈减薄过程中, 空间位置所扮演的角色比时间因素更重要. 即单纯的熔体-岩石作用无法解释岩石圈中生代、新生代的巨大减薄现象[15,20,21], 应该有另外的过程参与. 均匀的软流圈向上侵蚀模型[19]也不好解释如图 4 所示的难熔、饱满地幔不是分层分带而是交叉并存的现象, 在侵蚀过程中古老岩石圈的幔内薄弱带起着重要作用[13,17,24], 称之为不均匀侵蚀作用.

**6.3** 克拉通破坏包括地幔伸展、熔体-岩石作用、侵蚀置换等复杂过程

扬子大陆岩石圈的深俯冲碰撞作用[129,130]和华北东部岩石圈自古生代以来的岩石圈去根减薄作用[19~27]尽管已成为研究大陆岩石圈根形成与破坏过程以及块体间相互作用等大陆动力学问题研究的国际热点，但还很少有人把它们进行有机地联系起来. 传统上，在克拉通形成以后，通常无明显的构造-岩浆活动，其上覆沉积盖层也呈近水平产出，现今也没有明显地震活动，是地球上最稳定的地区. 世界上其他地区克拉通多有这样的性质. 华北克拉通却表现出与这些克拉通十分不同的特征. 这种独特性将迫使人们思考其破坏的动力根源，需要考虑多阶段的演化模型，甚至在机制上随时间和位置是不一样的.

与世界上其他克拉通相比，华北克拉通相对小. 因此，更容易受周边板块俯冲-碰撞的影响(图 5)，如三叠纪时扬子地块向北俯冲于华北岩石圈地幔之下，造成：(1) 南部边缘受俯冲岩石圈板块所释放流体组分的交代作用(如信阳)；(2) 形成早期深部挤压与后期浅部伸展的构造体制，部分地幔呈构造“冷”侵位形式卷入了苏鲁-大别超高压变质作用；(3) 受扰动软流圈物质进一步上涌并侵蚀被支解了的华北岩石圈. 在这一时期，除地幔伸展引起华北岩石圈减薄外，来自俯冲扬子大陆所释放熔/流体与橄榄岩相互作用可能引起地幔组成的转变[7,35,50,74]，并构成了广泛的中生代钙碱性火山作用的源区.

到了早白垩世及以后，华北属于欧亚大陆东部边缘的一部分，并受来自太平洋板块俯冲所引起的热扰动进一步影响[131]. 由于演化历史复杂的克拉通地幔(主元素呈难熔而微量元素强烈富集)向演化历史明显简单的具大洋型岩石圈(主元素饱满而微量元素亏损)地幔转变难以通过单纯的熔体与橄榄岩相互作用来实现. 因此，对于早白垩世以来的岩石圈破坏过程，除存在由于太平洋板块俯冲所引起地幔伸展外，软流圈物质上涌侵蚀引起岩石圈大幅减薄和软流圈上涌冷却造成的新岩石圈的小幅增厚在华北东部克拉通破坏和地幔置换过程中起着重要作用(图 6). 该模型比较容易解释为什么早白垩世以来的橄榄岩捕虏体主体是饱满的现象. 例如该时期地幔中存在较多LREE强烈亏损的地幔单斜辉石，是由于新生岩石圈地幔为来自冷却的软流圈地幔，其中有些又经历了部分熔融和地幔交代作用. 对于地幔置换的开始时间，由于在古老岩石圈中起通道作用的幔内薄弱带不规则特点[24]，使得来自软流圈地幔玄武岩的喷发时间存在早、晚不一致. 喷发时代在 100 Ma的阜

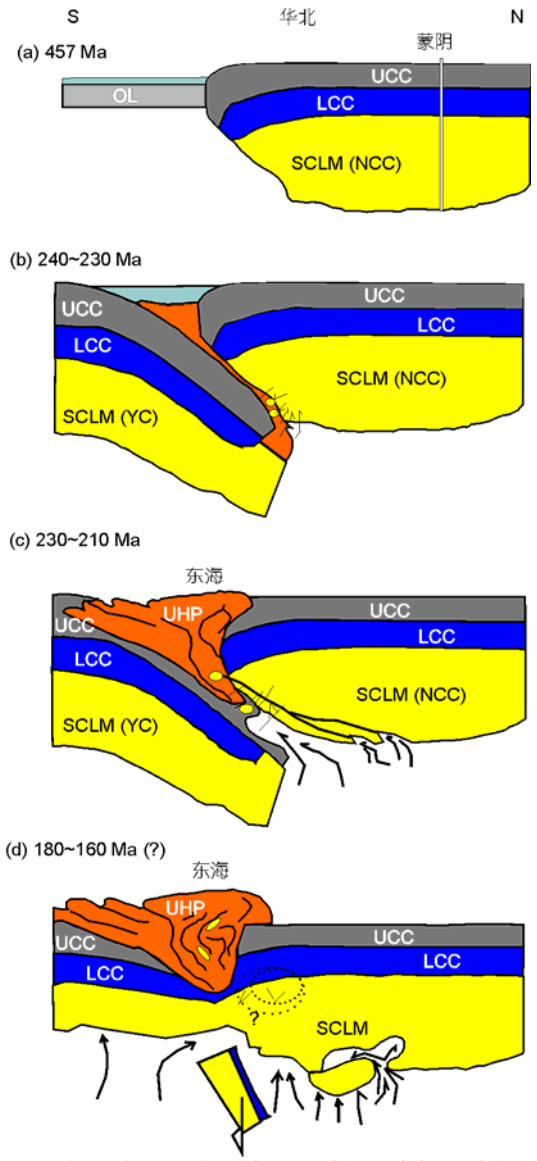


**图 5 扬子大陆俯冲碰撞作用对华北克拉通地幔的改造和破坏**[7]

(a) 早古生代(~460 Ma): 含矿的蒙阴和复县金伯利岩侵位于具低地温(~40 mW/m$^2$)的厚岩石圈(~200 km); (b) 240~230 Ma: 扬子大陆北缘的俯冲和碰撞作用导致华北克拉通地幔受俯冲释放熔流体的交代改造、完整性破坏和橄榄岩的固体侵位; (c) 230~210 Ma: 随着深部的进一步俯冲和碰撞挤压，上覆的华北地幔完整性进一步被破坏，其中有些被撕裂的地幔随伸展进入造山带，成为造山带橄榄岩; (d) 180~160 Ma: 俯冲板片断离进一步导致造山带橄榄岩随超高压岩石上升进入较浅部地壳. 图中代号: SCLM，陆下岩石圈地幔; UCC，大陆上部地壳; LCC，大陆下部地壳; OL，大洋岩石圈; UHP，超高压变质岩石; NCC，华北克拉通; YC，扬子克拉通

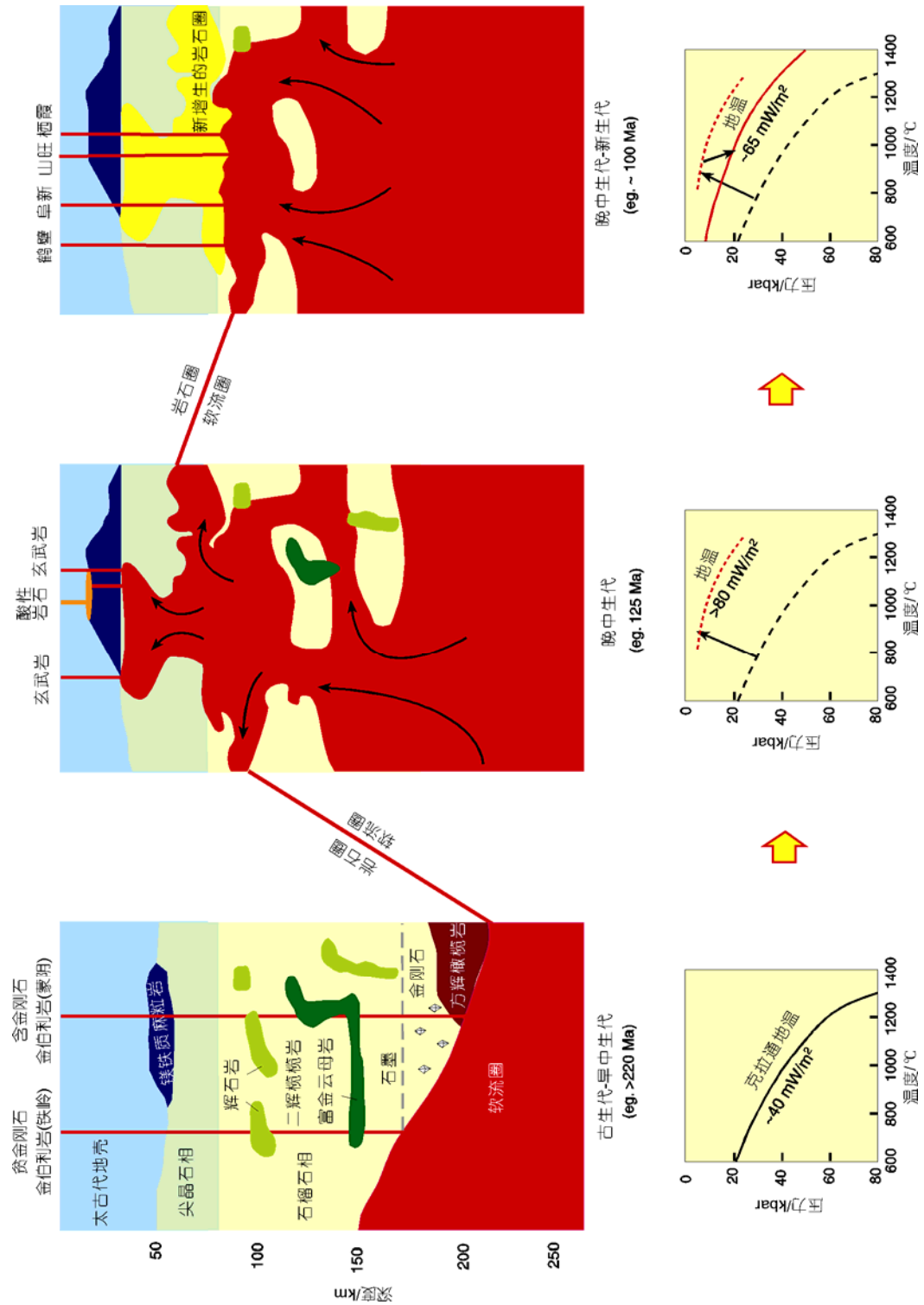


**图 6 华北早白垩世岩石圈不均匀地慢侵蚀减薄与增生增厚置换过程**[37]

(a) 古生代-早中生代(如≥220 Ma): 地块内部体现为厚、冷岩石圈, 边部受扬子大陆深俯冲影响有改造(见图 5), 如在~160 Ma 时华北边部(如南缘)还保留有受改造克拉通岩石地幔; (b) ~125 Ma: 晚侏罗世-早白垩世与 Kula 板块俯冲作用有关的软流圈物质上涌强烈侵蚀具古老年龄的岩石圈, 此时可能曾达到最大的减薄厚度, 即软流圈的位置达到最高(巨大减薄过程); (c) ~100 Ma: 上涌的软流圈物质至少在局部地区有过回落, 形成新的岩石圈地幔(增生增厚过程); 至第三纪时, 与太平洋板块俯冲有关的上涌软流圈进一步侵蚀岩石圈(包括古老残留的和新增生的), 新生代时又有回落. 软流圈物质上涌阶段, 地壳抬升和伸展, 形成凹陷; 回落阶段, 发育正断层, 形成断陷盆地

新玄武岩，其中的捕虏体橄榄岩主体是饱满的，说明至少有部分地区在此之前曾已实现了地幔置换过程.

新生软流圈地幔物质对古老岩石圈的侵蚀改造及其所引起的地幔混合和最终置换作用(先大幅度减薄、后小幅度增厚)实现了华北岩石圈中生代、新生代的总体减薄过程；同时由于软流圈与岩石圈的物质和能量交换，引起了华北东部中生代构造活动、沉积盆地大规模形成、强烈火山活动和成矿大爆发作用等壳-幔异常现象[24]. 这是由于：大陆岩石圈内部组成结构是极其不均一的，发育有包括与流体活动密切相关的地幔伟晶岩带、幔内剪切带及地幔富集带等幔内薄弱带. 加上岩石圈深大断裂带的深切作用(如郯庐断裂带)把古老岩石圈中业已存在的幔内薄弱带更好地连通起来，以及由此所共同构成幔内薄弱带的网络，提供新生软流圈地幔物质呈蘑菇云状或树枝状上涌和侧向侵蚀古老岩石圈地幔的通道. 由于这些薄弱带存在不规则性，导引着软流圈地幔物质的侵蚀与移动方向(不均匀侵蚀作用)，因而同一岩浆事件到达地表的时间不同. 构造活化是大陆板内变形的重要方式. 大陆岩石圈板块内部物质组成与结构的不均一性，以及由于流体活动、热作用(包括放射性元素积累等)、沉积覆盖、地壳减薄或加厚等，导致岩石圈强度热弱化，如大陆板内变形和应变局部化等[132]. 如燕山陆内早期造山过程，软流圈物质上涌(岩石圈减薄)引起地壳的强烈伸展变形、滑脱构造、变质核杂岩出露和坳陷盆地形成等[133,134]；上涌的软流圈物质，在~125 Ma时有明显的冷却回落过程(软流圈转化成岩石圈并实现地幔置换作用)造成克拉通(如断陷)盆地的形成等，实现陆内造山过程与克拉通盆地形成的耦合[135].

## 7 克拉通破坏的大陆形成演化意义

众所周知，中国大陆是由众多小陆块自显生宙以来逐步拼合形成，并依次处于古亚洲洋、特提斯-古太平洋和印度洋-太平洋三大动力学体系的影响范围. 组成中国大陆的主要块体(如华北、扬子陆块)长期位于南、北半球(或者冈瓦纳大陆与劳亚大陆)交接的过渡带，岩石圈壳-幔结构具有不同的化学组成特征与演化历史. 因此，深入研究这些陆块的原始归属与演化历史，本身对理解中国大地构造发展及全球大陆运动历史就具有重要意义. 此外，中国大陆各陆块间的拼接、焊合经历了漫长的复杂过程，也显示出一定的特色. 除受普遍关注的苏鲁-大别-秦岭地区，已成为研究大陆深俯冲-超高压变质带形成-折返[136~138]的天然实验室外，还在该造山带中发现了复杂的深部作用证据[139,140]，如：陆块多次的裂解和拼接迹象、强烈的陆内隆升造山、下地壳拆沉和幔源岩浆底侵等[141~144]. 此外，也发现了造山带岩石圈结构具有陆块之间穿插楔入、俯冲叠置[145~147]等现象. 这些都丰富了中国大陆地质的研究内涵. 早中生代扬子大陆向华北大陆的深俯冲碰撞作用，如何在华北克拉通破坏过程中产生重要的影响[58,75]，甚至伸展的华北克拉通地幔是如何进入苏鲁-大别造山带的[7,68]，这些过程本身都蕴涵着丰富的地球动力学信息.

事实上，华北克拉通早白垩世破坏的方式和过程，目前无论哪一种模式[17~26,36,37]，都涉及地球深部圈层(如地壳与地幔、岩石圈与软流圈)间的相互作用过程，它们不可能脱离动力学背景和它的边界条件. 如早白垩世，目前多被认为是华北克拉通破坏的关键时期，也是全球深部地幔的剧烈活动时期，表现为超级地幔柱活动及全球性的海底玄武岩喷发高峰、大规模缺氧事件等[148,149]，可能与全球古地磁极性频繁倒转时期同步耦合[150,151]. 华北这一时段强烈的深部层圈相互作用(克拉通破坏)是否可以理解为冈瓦那古陆解体与亚洲大陆增生在中国东部的一种区域性响应[152]，而且这一响应是否与全球性事件的地幔深部物质、能量的巨大传输[153,154]有关，均值得深入研究. 从现有资料看，克拉通破坏并不一定是华北所独有，如北美的Wyoming克拉通在元古代也发生过类似破坏作用[155]. 看来华北克拉通破坏具有地球内在演化规律的意义，无疑加强与世界其他典型克拉通的对比，有助于对大陆形成演化机制的理解，如岩石圈与软流圈边界是变迁的.

总之，中国大陆在岩石圈结构、演化方面，具有与赖以建立现代全球构造理论的北美和欧洲大陆所不同的特征. 在一定程度上可以说，缺少对中国大陆的深入了解就不可能建立起全面和完善的有关全球大陆形成、演化模式. 因此，深入开展中国大陆(如华北)岩石圈精细结构和演化的系统研究，不仅为深入了解中国大陆本身乃至东亚大地构造所必需，而且对于创立新的全球大陆动力学理论也有重要意义. 而且，初步的研究发现[7,37,75]，岩石圈的深部演化复杂程度远超出人们以往的想象. 这也是为什么“华北克拉通破坏”适时实施的重要原因之一.

## 8 结语

与世界典型克拉通相比，华北克拉通体积小，容易受周边俯冲碰撞作用的影响. 华北东部克拉通破坏和岩石圈减薄至少包括地幔伸展、熔体-岩石作用、不均匀侵蚀减薄和增生增厚(地幔置换)等复杂过程. 早中生代时，扬子地块向北俯冲碰撞所引起华北岩石圈的完整性受影响、地块边缘的熔/流体交代富集作用、岩石圈地幔伸展，和苏鲁-大别造山带山根拆沉并进一步扰动软流圈物质并侵蚀被改造了的岩石圈; 早白垩世-早第三纪时，因太平洋俯冲的热扰动致使软流圈物质进一步的强烈侵蚀作用引起岩石圈的巨大减薄; 晚第三纪以来的软流圈热沉降作用所带来的小幅度岩石圈增厚和增生阶段，并实现了最终的地幔置换和岩石圈整体的减薄过程. 对于地幔置换的开始时间，由于在古老岩石圈中起通道作用的幔内薄弱带是不规则的，它们引导着来自软流圈物质组分侵蚀岩石圈和岩浆喷发时间存在明显的早晚不一致现象. 喷发时代为 100 Ma 的玄武岩(如阜新)所捕获的橄榄岩主体是饱满的，说明华北东部部分地区在此之前(如 125~100 Ma 间)曾有过地幔置换作用. 上涌软流圈物质的热沉降作用不仅带来岩石圈增生和小幅度增厚，而且引起了上覆地壳的大规模沉降和断陷盆地形成.

致谢 感谢路凤香, O'Reilly, Griffin 和孙敏等教授的长期支持，郑永飞教授的约稿和审稿专家的建议.

## 参考文献


1 Menzies M A. Continental Mantle. London: Oxford Science Publications, 1990. 1—184
2 Pearson D G. The age of continental roots. Lithos, 1999, 48: 171—194[doi]
3 O'Reilly S Y, Griffin W L, Poudjom Y H, et al. Are lithospheres forever? Tracking changes in subcontinental lithospheric mantle through time. GSA Today, 2001, 11: 4—10[doi]～
4 Arndt N. Hot heads and cold tails. Nature, 2000, 407: 458—459[doi]
5 Ernst R E, Buchan K L. Recognizing mantle plumes in the geological record. Annu Rev Earth Planet Sci, 2003, 31: 469—523[doi]
6 Fuchs K. The international lithosphere program. Episodes, 1990, 13: 239—246
7 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China. J Petrol, 2006, 47: 2233—2256[doi]
8 Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. In: Fei Y, Berka C M, Mysen B O, eds. Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation: A Tribute to Boyd F R J. Geochem Soc Spec Publ, 1999, 6: 13—45
9 Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥3800 Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean craton. Geology, 1992, 20: 339—342[doi]
10 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—232[doi]
11 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 等. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 1991, 10(增刊): 2—20
12 路凤香, 郑建平. 华北古生代岩石圈地幔特征. 见: 池际尚, 路凤香, 主编. 华北金伯利岩与古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1996. 215—274
13 郑建平, 路凤香. 胶辽半岛金伯利岩中的地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性. 岩石学报, 1999, 15: 65—74
14 Fan Q C, Hooper P R. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. J Petrol, 1989, 30: 1117—1158
15 Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. Geotect Metal, 1992, 16: 171—179
16 Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, Eastern China. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington D C: American Geophysical Union, 1998. 167—196
17 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino-Korean craton. Int Geol Rev, 1998, 40: 471—499

18 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[doi]
19 Fan W M, Zhang H F, Baker J. On and off the North China Craton: Where is the Archean keel? J Petrol, 2001, 41: 933—950[doi]
20 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, ed. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geol Soc Spec Publ, 1993. 76: 71—81[doi]
21 Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington D C: American Geophysical Union, 1998. 107—126
22 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 1—110
23 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18: 1—5
24 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 1—126
25 郑建平, 路凤香, O'Reilly S Y. 华北地台东部古生代、新生代岩石圈地幔特征对比及演化探讨. 地质学报, 1999, 73: 47—56
26 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 1999, 29: 313—318
27 郑建平, 路凤香, O'Reilly S Y. 华北东部地幔改造作用和置换作用: 透辉石激光探针研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30: 373—382
28 Carlson R W. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. Lithos, 2005, 82: 249—272[doi]
29 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2006, 70: 5013—5034[doi]
30 Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 246: 336—352[doi]
31 Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'. Earth Sci Rev, 2004, 65: 223—275[doi]
32 Menzies M, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 2007, 96: 1—21
33 Xu Y G. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. Lithos, 2007, 96: 281—298[doi]
34 Zhai M G, Fan Q C, Zhang H F, et al. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. Lithos, 2007, 96: 36—54[doi]
35 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[doi]
36 Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Re-Os isotopes in mantle xenoliths from eastern China: Age constraints and evolution of the lithospheric mantle. Lithos, 2008, 102: 43—64[doi]
37 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5203—5225[doi]
38 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 2008, 24: 1145—1174
39 邓晋福, 苏尚国, 刘翠. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘, 2006, 13: 105—119
40 Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. Chem Geol, 2003, 196: 107—129[doi]
41 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892—897[doi]
42 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[doi]
43 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[doi]
44 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: '蘑菇云'模型. 地学前缘, 2000, 7: 97—107
45 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 2006, 13: 50—64
46 周新华, 张宏福. 中生代华北岩石圈地幔高度化学不均一与大陆岩石圈转型. 地球科学, 2006, 31: 8—13
47 Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. Lithos, 2008, 101: 435—452[doi]
48 Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: A LAM-ICPMS trace element

study. J Petrol, 2000, 41: 111—148[doi]
49 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 2001, 26: 747—757[doi]
50 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
51 Zhang H F, Sun M, Zhou X H et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochim Cosmochim Acta, 2003, 67: 4373—4387[doi]
52 Zheng J P, Sun M, Zhou M F, et al. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2005, 69: 3401—3418[doi]
53 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2002, 198: 307—322[doi]
54 张宏福, 英基丰, 徐平. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示. 科学通报, 2004, 49: 784—789
55 张宏福. 橄榄岩-熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 2006, 13: 65—75
56 牛耀龄. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中国东部中-新生代基性火山岩成因的新思路. 高校地质学报, 2005, 11: 9—46
57 郑建平, 路凤香, Griffin, 等. 华北橄榄岩与岩石圈减薄的地幔伸展和侵蚀置换作用. 地学前缘, 2006, 13: 76—85
58 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Zircons in mantle xenoliths record the Triassic Yangtze-North China continental collision. Earth Planet Sci Lett, 2006, 247: 130—142[doi]
59 吴福元, 葛文春, 孙德有. 中国东部岩石圈减薄研究的几个问题. 地学前缘, 2003, 10: 51—60
60 许文良, 王清海, 王冬艳. 华北克拉通东部早中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火山岩和捕虏体证据. 地学前缘, 2004, 11: 309—317
61 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern part of the North China block: Its significance in lithosphere evolution. Lithos, 2001, 57: 43—66[doi]
62 王冬艳, 许文良, 冯宏. 辽西中生代晚期岩石圈地幔的性质: 来自玄武岩和地幔捕虏体的证据. 吉林大学学报, 2002, 32: 319—324
63 闫俊, 陈江峰, 谢智. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. 科学通报, 2003, 48: 1570—1574
64 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Junan, Shandong Province, China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 244: 622—638[doi]
65 Yu J H, O'Reilly S Y, Zhang M, et al. Roles of melting and metasomatism in the formation of the lithospheric mantle beneath Leizhou Peninsula, South China. J Petrol, 2005, 47: 355—383[doi]
66 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中的高温麻粒岩捕虏体. 科学通报, 1996, 41: 235—238
67 翟明国, 朱日祥, 刘建明. 华北东部构造体制转折的关键时限. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 913—920
68 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: Age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite. Geology, 2006, 34: 705—708[doi]
69 袁学诚. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996. 59—62
70 邵济安, 何国崎, 张履桥. 燕山陆内造山作用的深部制约因素. 地学前缘, 2005, 12: 137—148
71 Kelemen P B, Hart S R, Bernstin S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. Earth Planet Sci Lett, 1998, 164: 387—406[doi]
72 Klemme S, Laan S R, Foley S F, et al. Experimentally determined trace and minor element partitioning between clinopyroxene and carbonatite melt under upper mantle conditions. Earth Planet Sci Lett, 1995, 133: 439—448[doi]
73 Boyd F R. Composition and distinction between oceanic and cratonic lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 1989, 96: 15—26[doi]
74 Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 768—780[doi]
75 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: 496—506
76 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[doi]
77 Xu Y G, Lin C Y, Menzies M A. Mineral chemistry of minerals in spinel peridotite xenoliths from Wangqing of Jilin Province: Thermal history and metasomatism of upper mantle. J Geochem, 1996, 125: 481—493

78 Rudnick R L, Gao S, Ling W, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. Lithos, 2004, 77: 609—637[doi]
79 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[doi]
80 许文良, 郑常青, 王东艳. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及意义. 地质论评, 1999, 45(增刊): 444—449
81 张宏福; 郑建平. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因: 以辽宁阜新为例. 科学通报, 2003, 48: 603—609
82 郑建平, 张瑞生, 余淳梅, 等. 冀东-辽西玄武岩二长岩包体锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和微量元素: 示踪燕辽地区 169 Ma 和 107 Ma 的热事件. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I ): 32—44
83 金隆裕. 郯庐断裂带新生代玄武岩中的捕虏体. 长春地质学院院报, 1985, 3: 21—32
84 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1990. 1—93
85 Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, et al. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. Lithos, 2001, 59: 199—215[doi]
86 李天福, 杨经绥, 张儒媛. 中国大陆科学深钻工程先导孔的橄榄岩及其上地幔亏损和交代作用意义. 地质学报, 2003, 77: 492—509
87 Zheng Y F, Yang J J, Gong B, et al. Partial equilibrium of radiogenic and stable systems in garnet peridotite during ultrahigh-pressure metamorphism. Amer Mineral, 2003, 88: 1633—1643
88 Zhang R Y, Yang J S, Wooden J L, et al. U-Pb SHRIMP geochronology of zircon in garnet peridotite from the Sulu UHP terrane, China: Implications for mantle metasomatism and subduction-zone UHP metamorphism. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 729—743[doi]
89 Zheng J P, Sun M, Griffin W L, et al. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: Petrogenetic and geodynamic implications. Chem Geol, 2008, 247: 282—304[doi]
90 Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. Contrib Miner Petrol, 2008, 155: 271—293[doi]
91 Xu Y G, Ross J V, Mercier J C. The upper mantle beneath the continental rift of Tanlu, eastern China: Evidence for the intra-lithospheric shear zones. Tectonophysics, 1993, 225: 337—360[doi]
92 郑建平, 路凤香, 成中梅. 金伯利岩中石榴石辉石岩捕虏体的特征及其成因意义. 地球科学, 1998, 23: 49—54
93 郑建平, 路凤香. 古地幔流体及其在克拉通地幔演化中的意义: 以华北地台为例. 地学前缘, 1996, 3: 187—194
94 Yang X Z, Xia Q K, Deloule E, et al. Water in minerals of the continental lithospheric mantle and overlying lower crust: A comparative study of peridotite and granulite xenoliths from the North China Craton. Chem Geol, 2008, 256: 33—45[doi]
95 Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, et al. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China. J Metamorph Geol, 2000, 18: 149—166[doi]
96 Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. Talc-, magnesite- and Ti-clinohumite-bearing ultrahigh-pressure meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China. J Petrol, 1995, 36: 1011—1037
97 Brueckner H K. Sinking intrusion model for the emplacement of garnet-bearing peridotites into continent collision orogens. Geology, 1998, 26: 631—634[doi]
98 Ye K, Song Y R, Chen Y, et al. Multistage metamorphism of orogenic garnet-lherzolite from Zhimafang, Sulu UHP terrane, E. China: Implications for mantle wedge convection during progressive oceanic and continental subduction. Lithos, 2009, 109: 155—175,[doi]
99 Xiao Y L, Hoefs J, Kerkhof A M, et al. Fluid history of UHP metamorphism in Dabie Shan, China: A fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. Contrib Miner Petrol, 2000, 139: 1—16[doi]
100 Xie Z, Zheng Y F, Jahn B M, et al. Sm-Nd and Rb-Sr dating of pyroxene-garnetite from north Dabie in east-central China: Problem of isotope disequilibrium due to retrograde metamorphism. Chem Geol, 2004, 206: 137—158[doi]
101 靳永斌, 支霞臣, 孟庆, 等. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体的形成时代: Re-Os 同位素法定年. 科学通报, 2003, 48: 2560—2565
102 Zheng J P, Zhang R Y, Griffin W L, et al. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China. Chem Geol, 2005, 221: 243—259[doi]
103 Yuan H L, Gao S, Rudnick R L, et al. Re-Os evidence for the age and origin of peridotites from the Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. Chem Geol, 2007, 236: 323—338[doi]
104 Zhang R Y, Pan Y M, Yang Y H, et al. Chemical composition and ultrahigh-*P* metamorphism of garnet peridotites from the Sulu UHP terrane, China: Investigation of major, trace elements and Hf isotopes of minerals. Chem Geol, 2008, 255: 250—264[doi]
105 Zhang H F, Sun M, Lu F X, et al. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China. Geochem J, 2001, 35: 315—331
106 Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, et al. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. Lithos, 2008, 102: 25—42[doi]

107 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 太行山中段新生代玄武岩中高镁橄榄石捕虏晶: 残留古老岩石圈地幔样品. 岩石学报, 2004, 20: 1243—1252
108 陈曦, 郑建平. 河北阳原新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体矿物化学: 华北岩石圈地幔演化意义. 地球科学, 2009, 34: 203—219
109 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[doi]
110 余淳梅, 郑建平, Griffin W. 汉诺坝橄榄岩捕虏体的单斜辉石 LAM-ICPMS 分析及其岩石圈地幔演化意义. 地球科学, 2006, 31: 93—100
111 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987. 1—490
112 徐义刚, 林传勇, Menzies M A. 吉林汪清尖晶石橄榄岩包体的矿物化学成分指示意义——上地幔温度史和交代作用. 地球化学, 1996, 25: 481—493
113 徐义刚, 黄小龙, Thirlwall M F. 吉林辉南"反应"成因方辉橄榄岩包体及其深部动力学意义. 岩石学报, 2003, 19: 19—26
114 Meen J K. Mantle metasomatism and carbonates: An experimental study of a complex relationship. Geol Soc Am Spec Pap, 1987, 215: 91—100
115 Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. J Petrol, 1998, 39: 1917—1930[doi]
116 Coltori M, Bonadiman C, Hinton R W, et al. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: Evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. J Petrol, 1999, 40: 133—165[doi]
117 张志海, 郑建平, 马鸿文. 吉林汪清-辉南地幔透辉石微量元素及其记录的地幔熔融与交代作用. 地质科技情报, 2007, 25: 9—16
118 夏琼霞, 支霞臣, 孟庆, 等. 汉诺坝幔源橄榄岩包体的微量元素和Re-Os同位素地球化学: SCLM的性质和形成时代. 岩石学报, 2004, 20: 1215—1224[doi]
119 余淳梅, 郑建平, Griffin W L. 汉诺坝橄榄岩捕虏体原位 Re-Os 同位素年龄与多发地幔事件. 科学通报, 2007, 52: 1814—1819
120 Choi S H, Mukasa S B, Zhou X H, et al. Mantle dynamics beneath East Asia constrained by Sr, Nd, Pb and Hf isotopic systematics of ultramafic xenoliths and their host basalts from Hannuoba, North China. Chem Geol, 2008, 248: 40—61
121 张宏福, 英基丰, 汤艳杰, 等. 华北东部中、新生代岩石圈地幔的不均一性: 来自橄榄石的组成填图结果. 岩石学报, 2006, 22: 2279—2288
122 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 2005, 21: 1271—1280
123 Zhang H F, Nakamura, Kobayashi K, et al. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: Evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China Craton. Int Geol Rev, 2007, 49: 658—679[doi]
124 Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, et al. Lithium isotopic systematics of peridotite xenoliths from Hannuoba, North China Craton: Implications for melt-rock interaction in the considerably thinned lithospheric mantle. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 4327—4341[doi]
125 Liu Y S, Gao S, Lee C T A, et al. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-$Mg^{\#}$ signature of continental crust. Earth Planet Sci Lett, 2005, 234: 39—57[doi]
126 Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, et al. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2008, 72: 2349—2376[doi]
127 Ye K, Cong B L, Ye D N. The possible subduction of continental materials to depths greater than 200 km. Nature, 2000, 407: 334—336
128 Brey G, Kohler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites Ⅱ: New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. J Petrol, 1990, 31: 1353—1378
129 Witt-Eickschen G, Seck H A. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: An improved version of an empirical geothermometer. Contrib Mineral Petrol, 1991, 106: 431—439[doi]
130 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,[doi]
131 徐义刚. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈地幔演化. 地学前缘, 2006, 13: 93—104
132 张长厚. 大陆板内构造变形及其动力学机制. 地学前缘, 2008, 15: 140—150
133 Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 2002, 344: 175—205[doi]
134 李忠, 董仁国, 郑建平. 华北克拉通东部南北缘中生代火山-沉积格局及其构造转折过程. 古地理学报, 2007, 9: 227—242
135 郑建平, 余淳梅, 苏玉平, 等. 华北克拉通不均匀破坏和地幔置换作用与陆内山-盆耦合驱动. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(增刊): 31

136 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 1—855
137 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 东秦岭复合链的形成-变形、演化及板块动力学. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 1—193
138 Li S G, Xiao T L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. Chem Geol, 1993, 109: 89—111[doi]
139 Liou J G, Hacker B R, Zhang R Y. Into the forbidden zone. Science, 2000, 287: 1215—1216
140 袁学诚. 秦岭造山带的深部构造与演化. 见: 叶连俊, 主编. 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 174—184
141 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth Sci Rev, 2003, 62: 105—161[doi]
142 杨经绥, 许志琴, 吴才来. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 2002, 76: 484—495
143 Yang W C. Layered mantle reflectors in the Dabie-Sulu areas and their interpretation. Chin J Geophys, 2003, 46: 191—196
144 Wang Y J, Fan W M, Peng T P, et al. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. Chem Geol, 2005, 220: 165—189[doi]
145 Wang C Y, Zeng R S, Mooney W D, et al. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling. J Geophys Res B-Solid Earth, 2000, 105: 10857—10869[doi]
146 李曙光, 黄方, 李晖. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. 科学通报, 2001, 46: 1487—1491
147 徐佩芬, 孙若味, 刘福田. 扬子板块俯冲、断离的地震层析成像证据. 科学通报, 1999, 44: 1658—1661
148 Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. Geology, 1991, 19: 547—550[doi]
149 Frey F A, Coffin M F, Wallace P J, et al. Origin and evolution of a submarine large igneous province: The Kerguelen Plateau and Broken Ridge, southern Indian Ocean. Earth Planet Sci Lett, 2000, 176: 73—89[doi]
150 李兆鼐. 火山岩和火山作用与资源环境的若干问题. 见: 欧阳自远, 主编. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望. 北京: 原子能出版社, 1998. 64—67
151 朱日祥, 潘永信, 史瑞萍. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动. 科学通报, 2002, 17: 1175—1186
152 Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. Geology, 2003, 31: 817—820[doi]
153 Stein M, Hofmann A W. Mantle plumes and episodic crustal growth. Nature, 2002, 372: 63—68[doi]
154 Zhao D P. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 251—265[doi]
155 Sleep N H. Evolution of the continental lithosphere. Annu Rev Earth Planet Sci, 2005, 33: 369—393[doi]