

华北晚中生代变质核杂岩构造及其对 岩石圈减薄机制的约束*

刘俊来 关会梅 纪沫 胡玲

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,
岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 变质核杂岩是华北地区晚中生代岩石圈伸展与减薄的重要产物, 以辽南、瓦子峪(医巫间山)、云蒙山等为代表的变质核杂岩具有各自的特性与共性: 运动学极性、几何学不对称性、形成时间的跨越性、不分布均匀性和规模的级序性。变质核杂岩所具有的众多特点, 直接为讨论区域岩石圈伸展与减薄过程提供重要约束, 揭示出许多与现有盛行的地幔柱、拆沉作用、加厚造山带地壳伸展垮塌等成因模式相驳的证据。文中提出建立完善的区域岩石圈伸展与减薄模型, 必须考虑到岩石圈深部的极性运动(或单向剪切)、岩石圈板块破坏的渐进性发展、伸展作用-岩浆作用关系, 以及变质核杂岩发育与郯庐断裂的同时活动性。

关键词 华北 晚中生代 变质核杂岩 岩石圈伸展与减薄

华北板块的中-新生代演化处于非常独特的环境中, 受复杂的边界条件制约, 尤其晚中生代以来, 其演化更具有特殊性。古元古宙(大约在 1800 Ma 左右)强烈的构造-岩浆-变质事件使得华北固结成为稳定的克拉通后, 印支期由于北部古亚洲洋闭合和南部扬子板块与华北板块的对接使得它与西伯利亚板块、扬子板块拼合并焊接成一个统一的古陆^[1, 2](图 1(a))。自中生代中晚期以来, 华北板块又受到来自古太平洋板块的俯冲作用^[2, 3]以及印度板块与欧亚板块碰撞的重要影响^[4]。在晚中生代至新生代华北地区出现以典型的板内变形与调整为特点的区域伸展作用, 并导致东部某些地区出现大于 100 km 的岩石圈减薄^[5-7]。在这种错综复杂的背景下发生的区域岩石圈伸展作用, 形成了众多既具差异性又具统一性的变质核杂岩, 它们的出现为深入探讨岩石圈板块的板内演化、岩石圈减薄的动力学过程提供了良好的天然实验室。

1 岩石圈减薄及成因讨论

华北东部晚中生代时期发生了大规模岩石圈减薄已成为无可争议的事实^[7-11]。应用古生代和新生代金伯利岩、玄武岩和其他火山岩及其中所含地幔岩包体所提供的信息表明古生代和新生代大陆岩石圈地幔之间存在着巨大差异, 结合现今地球物理与大地热流测量证明现今华北板块下有着一个薄而热的岩石圈, 同时证明古生代时期厚(>180 km)而冷的岩石圈和新生代时期薄(<100 km)而热的岩石圈^[5, 12]之间存在的巨大差异。

对于华北地区岩石圈板内过程与减薄机制的分析长期以来存在着争议, 多年来有几种盛行的认识占据着主导地位^[13-15]: 地幔热柱、拆沉作用以及太平洋板块俯冲有关的机制。邓晋福等^[16]提出存在华北岩石圈根及去根作用, 并认为岩石圈去根作用可能包括了地幔热柱和拆沉作用两种不同机制。由于去

2005-03-23 收稿, 2005-08-05 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40272084, 40472105)

E-mail: jliu@cugb.edu.cn

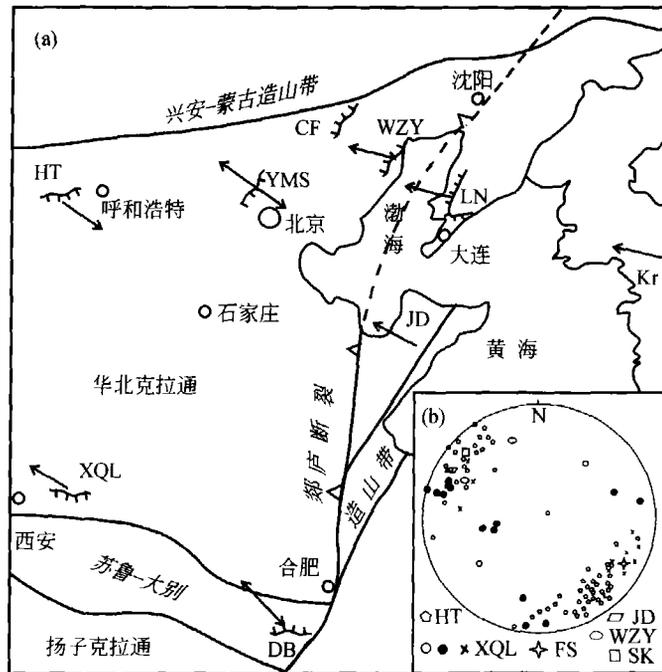


图1 华北地区变质核杂岩的分布

(a) 区域大地构造格架与变质核杂岩分布 (HT-呼和浩特; YMS-云蒙山; CF-赤峰; WZY-瓦子峪; LN-辽南; JD-胶东; Kr-朝鲜半岛; XQL-小秦岭; DB-大别); (b) 变质核杂岩拉伸线理投影图(乌尔夫网, 下半球)

根作用过程中岩石圈-软流圈系统的大灾变, 而导致中生代时期众多事件的响应. 基于造山相关过程的模式更多地强调了中生代深成岩和火山岩提供的地球化学信息, 并认为是造山加厚形成岩石圈根, 发生拆沉和断离作用致使其减薄^[14, 17, 18]. 太平洋板块俯冲类模式强调西太平洋板块或 Izanagi 板块的回退(rollback)或更加斜向(向北的左行滑移)的俯冲过程的出现^[15, 19]. Wu 等^[9]认为中国东北早白垩世 A 型花岗岩明显具有非造山属性, 其形成可能与古太平洋板块俯冲引起的岩石圈拆沉作用之后出现的中国东部伸展-裂谷作用密切相关. 张旗等^[20, 21]在中国东部识别出大量燕山期埃达克质岩, 提出产生大规模埃达克质岩岩浆的热源与拆沉作用有着直接关系, 拆沉作用导致地壳拉张环境下的岩石圈减薄, 并引起软流圈地幔上涌与玄武岩浆底侵作用. 他们同时引用^[21]对于 Izanagi 板块的古地磁研究结果, 认为太平洋板块向东亚大陆边缘的俯冲作用最早也在晚白垩世之后, 并据此排除了中国东部燕山期岩浆活动与太平洋板块俯冲之间的成因关系.

注意到大陆岩石圈与软流圈的密度差异及由此

造成的力学不协和性问题, 徐义刚^[22]对于流行的折沉机制提出质疑. 同时, 他提出了岩石圈热-机械侵蚀和化学侵蚀的耦合模式, 认为由软流圈抬升引起岩石圈的热传导加热, 并伴随有软流圈熔体渗透岩石圈底部的作用过程; 并提出, 华北克拉通的破坏与华北克拉通-扬子克拉通在三叠纪时期的板块拼贴与碰撞有着直接的联系^[11, 12].

从盆地演化与盆地沉积分析角度出发, Ren 等^[19]提出中国东部及相邻地区在晚中生代和新生代时期经历了数次伸展作用的改造, 裂谷作用是伸展作用的主要表现形式. 他们认为, 太平洋板块、欧亚板块和印度板块之间的相互作用是大陆伸展作用的主要动因, 而其直接原因在于板块相互作用背景下地幔微循环(mantle-cell)的存在.

结合应用对于东北亚地区开展的古地磁资料的分析与研究成果, Liu 等^[23]系统开展了辽南变质核杂岩的构造分析与剥露机制分析, 同时考虑到郯庐断裂的早期演化及其两侧伸展构造的发育(包括辽南与瓦子峪变质核杂岩^[24]), 提出区域岩石圈板块的旋转作用是导致华北东部和东北地区岩石圈板块

伸展的重要动力来源。

上述是对于华北东部晚中生代-新生代岩石圈结构与演化研究的几种典型认识,上述认识的取得,更多地是基于岩石学、岩石地球化学分析、盆地分析和热模拟等完成的。对于岩石圈减薄相应产生的板内伸展构造-变质核杂岩的研究工作仍然是一个薄弱环节,对其深入研究将对于华北地区中生代-新生代岩石圈演化的研究工作,从岩石圈演化几何学、动力学和运动学等方面提供最为直接和有说服力的证据。

2 岩石圈减薄的构造证据——变质核杂岩

广义的伸展构造包括了伸展断层构造、变质核杂岩、伸展盆地以及相关的岩浆岩(火山岩和深成岩),它们是区域伸展环境与减薄过程最直接的证据。作为伸展构造的典型构造型式,变质核杂岩遍布华北克拉通的不同构造域(图1(a)),包括:呼和浩特、云蒙山、松辽、赤峰、小秦岭^[25]、瓦子峪(医巫闾山)、辽南等变质核杂岩,相伴出现具有类似特点的伸展构造包括胶东^[26]、朝鲜半岛和大别伸展构造系^[27]。目前,对于这些伸展构造开展的研究:(1)厘定了变质核杂岩与伸展构造体系的存在;(2)确定了某些伸展构造形成的时间;(3)阐明了伸展构造的几何学结构及其运动学特点;(4)同时部分探讨了伸展构造的成因机制。

在华北板块北部,亚干变质核杂岩^[28-30]的主要伸展与运动方向为 165° (SSE)^[31]。下盘花岗质侵入岩锆石 U-Pb 年龄为 (145 ± 5) Ma, (135 ± 1.7) Ma^[32, 33],而糜棱岩内黑云母的 Ar/Ar 年龄在 $129-126$ Ma 之间^[31]。它们代表了核杂岩隆升过程中岩体结晶、就位年龄与伸展隆升年龄。呼和浩特变质核杂岩上盘沿拆离带运动主要集中在 $126-140^{\circ}$,就位于核部的花岗质岩石侵位于 $137-119$ Ma^[34]。该核杂岩的形成归咎于早白垩世加厚地壳的后期重力垮塌作用^[34]。应用深层地震资料和大量钻孔资料确定的松辽盆地北部徐家围子变质核杂岩^[35],初步确定形成始于晚侏罗世(145 Ma),到早白垩世成型。对于变质核杂岩的形成,张晓东等^[35]认为与伊泽奈奇-欧亚板块的碰撞及其所致的岩石圈拆沉作用、岩浆底侵作用以及伸展垮塌作用密切相关。

华北板块的东部,瓦子峪(医巫闾山)变质核杂

岩的剥露与阜新上叠盆地的发育密切相关^[24, 36],同构造侵入岩体锆石 U-Pb 及主拆离断层带糜棱岩黑云母 Ar/Ar 年龄揭示出核杂岩在 127 至 116 Ma 时期的演化^[36, 37]。辽南变质核杂岩是迄今为止在华北发现的最东部的变质核杂岩,它具有 Cordillera 变质核杂岩的典型结构,并且具有 $130-310^{\circ}$ 方向的运动学,其伸展隆升发生在 $130-114$ Ma^[38, 39]。胶东地区伸展构造系统中,不同构造单元岩石内普遍发育一组 $130-160^{\circ}$ 的拉伸线理构造,这些线状构造及其产状关系与具有 $150-160$ Ma 年龄的玲珑岩体具有统一性。但是,Ar/Ar 测年资料揭示出其中最晚期的变形事件发生在 $90-110$ Ma^[24]。

华北板块南缘的小秦岭变质核杂岩群^[25, 40]总体上呈东西向展布,但是其内部结构,尤其是核杂岩上盘的运动学与区域伸展构造具有统一的方向。核杂岩内糜棱状岩石及同生深成侵入岩的记年表明伸展主期发育于 $120-130$ Ma 之间。造山后的伸展作用是由于早期南北向收缩变形引起的造山与地壳加厚所致的垮塌型伸展变形作用。

另外,华北板块南部的大别伸展构造、板内云蒙山变质核杂岩、太行与赞皇^[41]伸展构造等也具有相似的特点。综合起来,这些变质核杂岩与伸展构造具有以下共同特点:

(1) 运动学极性:虽然也有例外(呼和浩特),但多数变质核杂岩都具有统一运动学规律。核杂岩与主拆离断层的延伸方向可以有很大变化(EW 向、NNE 向为主),但伸展构造上盘的运动方向则以 NWW-SEE 为主,拉伸线理的统计平均方向以 $130-310^{\circ}$ 为主(图1(b)),充分说明伸展构造的形成是在同一应力场中完成的。

(2) 几何学上的不对称性:变质核杂岩的上叠盆地常常为箕状盆地,边缘断裂或拆离断层表现出铲状特点。它们普遍具有不对称结构型式,充分反映单剪作用的重要性。

(3) 形成时间的跨越性:华北地区中生代变质核杂岩构造的形成时间跨度很大,从 140 Ma 左右或更早到 90 Ma 左右。不同地区、不同构造部位其发育时间有所差别(图2)。依据现有伸展拆离断层糜棱岩、伴生侵入岩与伸展早期变质岩的测年资料分析,表明变质核杂岩主体形成与剥露时间介于 $130-120$ Ma 之间。它们的出现与中国东部大规模

岩浆活动^[9]、大规模成矿爆发^[42, 43]及岩石圈减薄时间对应。

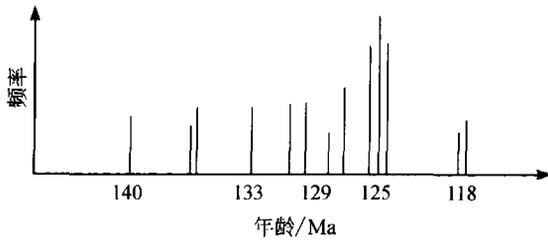


图2 华北地区变质核杂岩发育时间统计规律
(数据来自文献[9, 23—37, 39—41])

(4) 分布普遍但具有不均匀性: 晚中生代变质核杂岩等伸展构造型式, 零散分布于华北板块不同构造部位, 不具有宏观分带性. 考虑到伸展构造的型式、形成时间等基本因素, 又表现出不同地区的差异性特点.

(5) 规模具有分级序(具有级次与次序)特点: 区域性的大规模伸展构造, 往往为一系列次级规模的伸展构造的组合. 以白垩纪松辽盆地群为例, 大型盆地的发育往往是许多次级盆地的集成. 盆地发育是一个渐变过程, 即由拆离断层扩展、联合形成较大规模盆地.

3 变质核杂岩对岩石圈减薄作用的约束

对于华北东部中生代岩石圈伸展与减薄作用的研究, 早期地幔对流、地幔柱、拆沉作用等动力学模型的建立主要依赖于岩石学和岩石地球化学分析, 对于深部过程的动力学、运动学、几何学等方面考虑尚欠深入. 同时, 鉴于晚中生代时期岩石圈尺度上地质作用的统一性与复杂性, 仅以此为基础建立的各种模型和模式, 很难合理地解释所有浅、表层响应. 尤其伸展构造所具有的一些共性特点, 由目前建立的地球化学模型和岩石学模型很难解释. 或者说, 不考虑伸展与减薄的直接效应——伸展构造发育建立的模型, 总是不完全的或片面的. 归纳起来, 下述问题的解决, 对于探讨华北克拉通岩石圈演化的动力学过程及建立完善的岩石学-地球化学-力学(流变学)模型是非常关键的.

变质核杂岩的几何学与运动学为建立区域岩石圈减薄模型提供了基本的约束. 以变质核杂岩为代

表的伸展构造的出现是岩石圈伸展与减薄作用在中浅部层次的重要表现. 华北地区晚中生代变质核杂岩构造具有统一的几何不对称性与运动学极性, 无论主拆离断层面延伸、产状如何, 在整个华北地区表现出WNW-ESE向的运动学指向, 充分表明整个华北板块区岩石圈深部物质具有WNW-ESE单向运动的表现. 由此显示了与地幔柱、拆沉等岩石圈深部过程相驳的事实依据.

伸展构造与变质核杂岩发育的年龄记载了岩石圈软化历史, 记录了岩石圈从受应力作用到失稳、软化与劳损的全过程. 尽管在120—130 Ma华北东部地区经历了一次突发事件的影响, 岩石圈减薄作用最为显著. 但是120—130 Ma突发事件的发生, 具有一个较长时间间隔的前奏阶段(最早始于140 Ma左右), 也就是在大规模爆发伸展、岩浆和成矿之前不均匀发育着局部性的类似事件. 实验岩石变形声发射记录的岩石破裂过程、地震事件的前震、主震和余震与变质核杂岩主拆离断层的扩展与联合(如松辽盆地徐家围子变质核杂岩的徐西断裂与宋西断裂的发展)可以认为是华北岩石圈演化在不同尺度上的表现. 因此, 华北岩石圈在晚中生代时期的破坏, 是一个渐进过程, 是由很多微小过程的发生、发展到最终积累并使得岩石圈整体在短时间内突然性破坏.

构造-岩浆关系一直是困扰构造地质学家的一个重要问题, 但却为探讨岩石圈减薄的动力学因素提供了佐证. 后者是长期以来制约华北地区岩石圈动力学研究的一个关键问题. 几种可能的动力学因素包括区域差应力作用、岩浆底垫与上隆作用、收缩加厚岩石圈的调整与垮塌. 结合岩石地球化学与同位素测年开展的岩浆岩体构造分析工作, 似乎是解决这一问题的基础. 对于与伸展构造有关的岩浆活动性的测年资料都显示出早于主拆离断层的岩体冷却年龄, 但是由于目前尚缺乏对于深部构造过程(如深层次糜棱岩化作用)起始时间精确定年的有效方法, 因而不少学者得出结论认为岩浆作用是诱发区域性伸展作用的主导因素. 实际上, 伸展构造相关岩浆岩体的构造分析, 在某种意义上对此提供了重要的约束. 对辽南变质核杂岩下盘侵入的饮马湾山花岗质杂岩的分析表明, 一方面岩石化学揭示出花岗岩属于A型花岗岩, 具有伸展环境就位的属

性;另一方面对岩体构造分析揭示出岩体就位具有晚期同运动特点,从而证实了伸展作用实际上从岩浆生成、初始上侵与最终就位的不同阶段一直起着积极的作用。

在讨论华北晚中生代岩石圈伸展与减薄作用时,无法避免的一个重要问题在于变质核杂岩的区域极性运动性与郟庐断裂走滑运动之间的关系,它们是华北晚中生代构造演化的两个重要方面。目前所提出的几乎所有的动力学模型,都未能合理地解释两者之间的耦合关系。尤其是尚未获得合理的动力学环境以解释区域构造运动学上的变化,这一点还需要开展充分的区域构造分析与研究工作,是未来一个时期有待进一步深入研究的重要科学问题之一。

4 结论

华北板块在晚中生代时期经历的强烈区域伸展与岩石圈减薄过程,伸展与减薄过程诱发了众多区域性地质事件的发生,包括大规模岩浆活动、成矿作用、火山爆发、生物灭绝等事件。其中很重要的一方面在于很多地区发生了区域性或局部性的伸展作用,并进而形成伸展构造(变质核杂岩与伸展盆地)。华北地区的变质核杂岩具有许多共性,如运动学极性、几何不对称性、形成时间跨越性、分布不均匀性和规模的级序性。

变质核杂岩的广泛出现为讨论区域岩石圈伸展与减薄作用提供了重要的约束,揭示出许多与现有地幔柱、拆沉作用等成因模式相驳的证据。建立完善的区域岩石圈伸展与减薄作用模型,必须考虑到岩石圈深部的极性运动(或单向剪切)、岩石圈板块破坏的渐进性、伸展作用-岩浆作用关系,以及变质核杂岩发育与郟庐断裂同时活动性。

对变质核杂岩构造为华北岩石圈过程提供的约束的考虑将进一步深化对中国东部大陆岩石圈结构的认识,加深对于大陆岩石圈动力学演化与板内造山过程与机理的认识,从而建立合理而全面的华北型岩石圈动力学演化模型。

参 考 文 献

1 万天丰.中国大地构造学纲要.北京:地质出版社,2004,1—387

2 车自成,刘良,刘洪福,等.中国及邻区区域大地构造学.北京:科学出版社,2002,1—519

3 Takahashi M. Space-time distribution of Late Mesozoic to Early Cenozoic magmatism in East Asia and its tectonic implications. In: Hashimoto M, Uyeda S, eds. Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions. Tokyo: Terra, 1983, 69—88

4 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. Science, 1975, 189: 419—426

5 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of > 120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard H M, et al, eds. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geol Society Special Publication, 1993, 76: 71—78

6 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, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. AGU Geodynamic Series, 1998, 27: 107—126

7 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 Reviews, 2004, 65 (3): 223—275

8 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithospheric 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 (2): 241—253

9 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granite in North China: Age and geochemical constrains on their petrogenesis. Chem Geol, 2002, 187 (1—2): 143—173

10 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 (3—4): 307—322

11 徐义刚.华北岩石圈减薄的时空不均一特征.高校地质学报, 2004, 10(3): 324—331

12 Xu Y G. Thermal-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 2001, 26 (9—10): 747—757

13 Schott B, Schmeling H. Delamination and detachment of a lithospheric root. Tectonophysics, 1998, 296 (3—4): 225—247

14 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892—897

15 Davis G A. The Yanshan belt of North China: Tectonics, adakitic magmatism and crustal evolution. 地学前缘, 2002, 10 (4): 373—384

16 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等.中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”-东亚型大陆动力学模式研究.现代地质, 1994, 8(3): 349—356

17 Fan W, Menzies M. Sr and Nd isotopic composition of the Ultramafic Xenoliths from eastern China: Inferences about the struc-

- ture of the subcontinental lithosphere mantle and the origin of basaltic magmas. *Geotectonica et Metallogenia*, 1994, 18 (1-2): 39-50
- 18 Bryant D L, Ayers J C, Gao S, et al. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze suture and evolution of the Northern Dabie complex, east central China. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116 (5-6): 698-717
- 19 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, 171 (3-4): 139-152
- 20 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题. *岩石矿物学杂志*, 2001a, 20(3): 273-280
- 21 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 2001b, 17(2): 236-244
- 22 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): 1-5
- 23 Liu J L, Davis, G, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning province, North China: A likely contributor to cretaceous rotation of eastern liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 2005, 407 (1-2): 65-86
- 24 Darby B J, Davis G, Zhang X H, et al. 辽西医巫闾山地区瓦子峪变质核杂岩的厘定. *地学前缘*, 2004, 11(3): 145-155
- 25 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造体制、形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社, 1998, 1-120
- 26 Faure M, Lin W, Le Breton N. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 2001, 29 (2): 119-122
- 27 江来利, 吴维平, 刘贻灿. 东大别超高压变质带构造研究进展. *自然科学进展*, 2003, 13(12): 1238-1246
- 28 郑亚东, 王涛. 中蒙边界区中生代推覆构造与伸展垮塌作用的运动学和动力学分析. *中国科学, D辑*, 2005, 35(4): 291-303
- 29 Zheng Y, Zhang Q. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 7 (2): 125-135
- 30 郑亚东, 张青. 内蒙亚干变质核杂岩核内递进伸展作用. 伸展构造研究, 北京: 地质出版社, 1994, 4-11
- 31 Zheng Y, Wang S, Wang Y. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino-Mongolian boundary area. *Science in China (B)*, 1991, 34 (9): 1146-1152
- 32 Wang T, Zheng Y D, Li T B, et al. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23 (5): 715-729
- 33 Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. Thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high-and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling-Dabie Orogen, Eastern China. *Tectonics*, 1999, 18(4): 621-638
- 34 Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, et al. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 2002, 30(11): 1003-1006
- 35 张晓东, 余青, 陈发景, 等. 松辽盆地变质核杂岩和伸展断陷的构造特征及成因. *地学前缘*, 2000, 7(4): 411-419
- 36 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 医巫闾山变质核杂岩构造特征. *地球学报*, 1999, 20(4): 385-391
- 37 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. *科学通报*, 2000, 47(9): 697-701
- 38 杨中柱, 孟庆成, 江江. 辽南变质核杂岩构造. *辽宁地质*, 1996, 4: 241-250
- 39 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等. 中国东部早白垩世岩浆作用的伸展构造背景-以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例. *岩石学报*, 2004, 20 (5), 1193-2004
- 40 刘树文, 张进江, 郑亚东. 小秦岭变质核杂岩同变形期的 P-T 路径. *科学通报*, 1998, 43(3): 312-318
- 41 牛树银. 太行山阜平、赞皇隆起是中新世变质核杂岩. *地质科技情报*, 1994, 13(2): 15-16
- 42 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精确得到的启示. *中国科学, D辑*, 2003, 33(4): 289-299
- 43 Yang J H, Wu F Y, Wilde S. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton; An association with lithospheric thinning. *Ore Geology Review*, 2003, 23 (3-4): 125-152