

# 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离

李曙光 黄方 李晖

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026. E-mail: lsg@ustc.edu.cn)

**摘要** 应用地质、地球化学及地球物理 3 个方面已有的研究结果, 探讨大别-苏鲁造山带碰撞后岩石圈拆离发生的可能性及发生时代. 大别山超高压变质(UHPM)岩第 1 次快速冷却时代(226~219 Ma)与秦岭-苏鲁地区同碰撞花岗岩年龄(220~205 Ma)的一致性, 说明 UHPM 岩石第 1 次快速抬升与俯冲板块断离有关. 因此它们的第 2 次快速抬升(180~170 Ma)需要碰撞后的岩石圈拆离, 同时导致大别山 170 Ma 左右的岩浆事件. 此外, 早白垩世(130~110 Ma)大别山穹隆的迅速隆升及相对应的大规模岩浆事件也需要另外一次岩石圈拆离. 碰撞后幔源镁铁-超镁铁岩侵入体的同位素年代学及相互关系的研究表明, 大别-苏鲁造山带碰撞后的早白垩世大规模岩浆事件源于深部软流圈地幔上涌. 辉石-辉长岩随 MgO 降低, SiO<sub>2</sub> 也下降的分离结晶演化趋势, 及典型的下地壳地球化学特征表明, 这一幔源岩浆在侵入地壳之前曾经历过岩浆的板底垫托(underplating)过程及与下地壳相互作用. 岩石圈拆离可能是引发造山带碰撞后地幔上涌及岩浆板底垫托事件的原因. 大别-苏鲁造山带的地震层析结果显示, 大别山南北两侧岩石圈均已显著减薄. 除合肥盆地靠近庐断裂部分的岩石圈减薄可能与新生代玄武岩事件有关系外, 因为大别山缺乏新生代玄武岩事件, 大别山区的岩石圈减薄可能主要是岩石圈拆离造成的. 此外, 在 40 km 处该带普遍存在一薄的低速层, 以及该带白垩纪存在盆地+穹隆+盆地的耦合关系, 均暗示了该造山带两侧曾发生了岩石圈拆离和岩浆板底垫托作用.

**关键词** 岩石圈拆离 碰撞后岩浆作用 地震层析成像 大别-苏鲁造山带 地幔上涌及板底垫托

近年来岩石圈拆离(delamination)已被广泛用来解释区域的迅速抬升、引张及相伴随的岩石圈减薄和大规模岩浆作用<sup>[1]</sup>. 识别大别-苏鲁造山带是否发生过碰撞后的岩石圈拆离, 对认识该带超高压岩石的快速抬升与出露、早白垩世大规模岩浆作用以及中国东部镁铁质下地壳缺失和岩石圈减薄有重要意义. 已有作者提出在大别-苏鲁造山带及中国东部可能存在榴辉岩或岩石圈的拆离来解释中国东部镁铁质下地壳的缺失<sup>[2]</sup>和岩石圈减薄现象<sup>[3]</sup>, 然而, 他们均未探讨拆离发生的时代问题. 此外, 作为一种深部过程, 岩石圈拆离尚缺乏直接证据. 它需要我们从地质、地球化学及地球物理各个方面去综合验证这一过程是否存在. 造山带的快速抬升和大规模岩浆作用是发生岩石圈拆离的最好记录与信号<sup>[1]</sup>, 而地震层析成像又可提供岩石圈拆离发生后的壳-幔结构图像. 本文拟从这 3 个方面来探讨大别-苏鲁带碰撞后岩石圈拆离发生的可能性及发生时代.

## 1 岩石圈拆离的超高压变质岩及山体快速抬升证据

秦岭-大别造山带大量与陆壳俯冲有关的高压

(蓝片岩)和超高压岩石的年代学研究证明, 华北与扬子两大陆块的碰撞发生在早三叠世(距今约 230 Ma)<sup>[4~10]</sup>. 通过对大别山双河地区超高压变质岩及其围岩的详细年代学研究, Li 等人<sup>[4]</sup>揭示了大别山超高压岩石及其围岩经历了两次快速冷却, 它们分别对应两次快速抬升过程. 第 1 次发生在 226~219 Ma; 第 2 次发生在 180~170 Ma. 对于这两次快速抬升的动力学机制, Li 等人<sup>[4]</sup>给出了两种可能解释: (1) 第 1 次快速抬升与陆壳俯冲过程中的逆冲构造有关, 第 2 次与俯冲板块的断离有关; (2) 第 1 次快速抬升有可能是前述两种构造机制的共同作用结果, 第 2 次快速抬升需要另外一次岩石圈拆离构造. 近年来, 秦岭及苏鲁地区印支期同碰撞花岗岩年代学研究的进展可以帮助我们在这两种可能解释作出选择. 所谓的同碰撞花岗岩事件主要发育在商县以西的南秦岭地区<sup>[11,12]</sup>, 少量发现于苏鲁地体的东端<sup>1)</sup>. 详细的 U-Pb 年代学研究表明它们的形成时代集中在 220~205 Ma 之间<sup>[12,13]</sup><sup>1)</sup>, 比俯冲陆壳岩石的峰期变质时代晚 10~20 Ma, 与大别山超高压岩石的第 1 次快速冷却与抬升时代一致<sup>[4,9]</sup>. 这种紧随陆壳俯冲之后的岩浆事件通常被解

1) 谢智. 中国科学技术大学博士学位论文. 1998

释为与俯冲板块的断离有关<sup>[14]</sup>。因此,大别山超高压岩石的第2次快速抬升需要另外一次碰撞后岩石圈拆离构造。此外,许多研究表明,大别山杂岩的碰撞后构造格架为一燕山期(130~110 Ma)穹隆<sup>[15~18]</sup>。北大别带为穹隆的核心,普遍南倾的面理表明南大别及宿松超高压和高压带是这一穹隆的南翼。年代学研究表明,穹隆形成的早期(130~110 Ma)有一次快速抬升过程<sup>[16~20]</sup>。它可能是对深部又一次岩石圈拆离构造发生的响应。

## 2 岩石圈拆离的岩浆岩年代学与地球化学证据

上述大别山超高压变质岩与山体的后两次快速抬升,分别与大别山两次碰撞后岩浆事件相对应。已识别出大别山在170 Ma左右存在一期岩浆作用,它表现为中酸性的( $\text{SiO}_2$  约为 60%)角闪石英二长岩侵入<sup>[21,22]</sup>。这一期岩浆作用时代恰与超高压岩石的第2次快速抬升时代一致,因而很可能指示了一次岩石圈拆离事件。除了170 Ma 花岗岩质岩浆事件外,最大规模的碰撞后岩浆事件发生在早白垩纪(130~120 Ma)。在这一地区除了大量早白垩世花岗岩基出露及同时代混合岩化作用外<sup>[23,24]</sup>,造山带南北两侧的下扬子和合肥盆地地区也喷发了大量的早白垩世偏碱性的橄榄安粗岩系<sup>[25]</sup>。此外,最近的年代学研究表明,在大别山北部相当一部分被称为 TTG 片麻岩的中性侵入

体也是在早白垩世侵入的<sup>[10]</sup>。大别-苏鲁造山带在早白垩世这一短暂时期,突然爆发了这样大规模的岩浆事件需要一次巨大的幕式热“脉冲”。考虑到该岩浆事件与大别山穹隆快速抬升事件在发生时代上的一致性,这一早白垩世大规模岩浆事件,可能是深部又一次发生岩石圈拆离并导致软流圈地幔上涌的重要信号。除了早白垩世中酸性岩浆事件的巨大规模以外,下列同时代幔源基性-超基性岩浆侵入体的年代学及地球化学数据也同样支持大别造山带深部曾发生了碰撞后岩石圈拆离事件。

(i) 锆石 U-Pb 年代学研究表明,发育在大别山北部的辉石-辉长岩侵入体的形成时代为 130~120 Ma<sup>[10,26,27]</sup>,与该区花岗岩及中性岩侵入体的年龄没有区别。然而花岗岩及闪长岩脉切割辉石-辉长岩的野外地质关系说明,这一岩浆事件是从深部地幔发生部分熔融开始的,而后迅速扩散到下、中地壳。表明在早白垩世有一次地幔上涌过程<sup>[25]</sup>,很可能是岩石圈拆离的结果。

(ii) 由于辉石岩是岩浆分离结晶作用的堆晶岩,而岩体内部的辉长-闪长岩脉代表结晶分异演化的岩浆。我们可利用李曙光等人<sup>[28]</sup>发表的祝家铺辉石岩及其辉长岩脉的主要元素数据作  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  对  $\text{MgO}$  的图,以观察该岩浆的分离结晶特征(见图1)。图1显示出,尽管随分离结晶作用的进行(岩浆的  $\text{MgO}$  含量减小),残余岩浆的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,

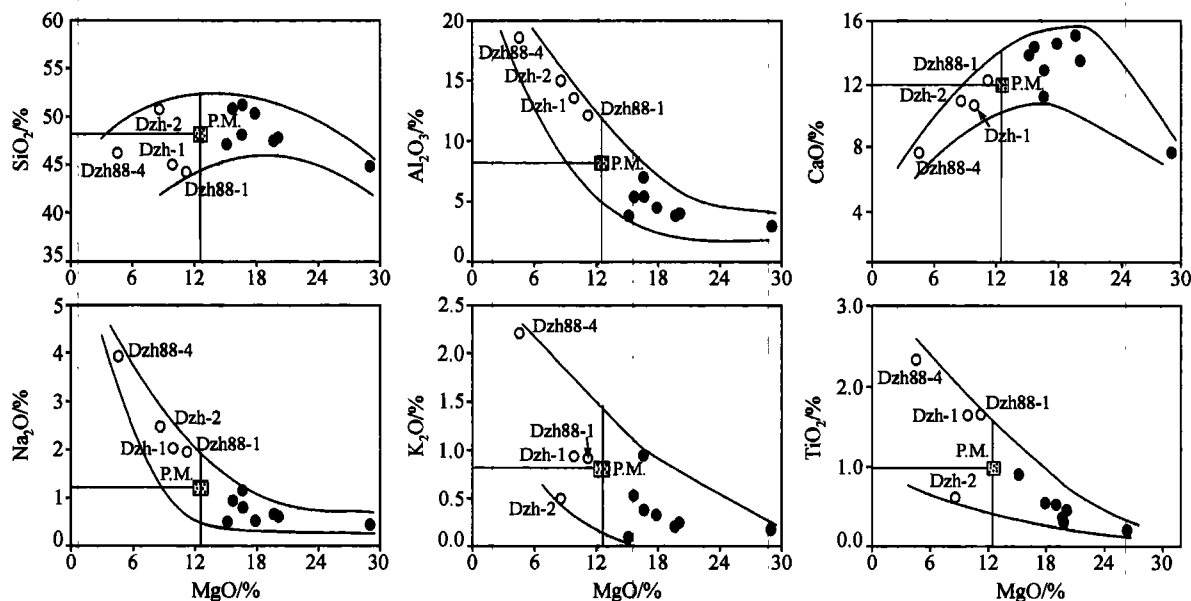


图1 祝家铺辉石-辉长岩  $\text{MgO}$  与其他主要元素相关图  
数据引自文献[28], P.M.代表母岩浆组成

$\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  都正常地升高,  $\text{CaO}$  正常地下降, 但  $\text{SiO}_2$  含量却没有像大多数玄武岩那样升高, 反而表现出下降趋势. 其中辉长岩脉样品 Dzh88-4 的低  $\text{SiO}_2$ (46.24%)、低  $\text{MgO}$ (4.53%)和高  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (6.14%) 说明这一分离结晶过程缺少橄榄石结晶, 主要受富硅的辉石和斜长石分离结晶控制, 这也与辉石岩中缺少橄榄石矿物的观察一致. 这种分离结晶作用, 表明母岩浆具有较低温度和硅过饱和特征. 它不像是从涌流圈直接析出的原始岩浆, 而是在进入到岩浆巢之前, 曾发生过橄榄石分离结晶及散热降温过程. 这表明涌流圈产生的玄武岩浆在侵入地壳以前, 可能发生过岩浆板底垫托作用, 它经常与岩石圈拆离相伴生.

(iii) 李曙光等人<sup>[28,29]</sup>和 Jahn 等人<sup>[30]</sup>先后报道了大别山北部辉石-辉长岩侵入体的微量元素及 Sr, Nd 同位素数据, 并指出该侵入体具有轻稀土富集、高场强元素(Nb, Ti)亏损以及很低的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值(-2.4 ~ -19)的特征. 他们分别提出两种不同的壳幔相互作用模型来解释这种典型的下地壳地球化学特征: 俯冲陆壳析出流体交代楔形地幔<sup>[29]</sup>和俯冲陆壳中的中性下地壳与地幔岩混杂的源混合模型<sup>[30]</sup>. 然而, 这两种模型都缺乏足够的说服力(详见另文评述). 更可能的一种解释是岩石圈拆离引发的地幔上涌和岩浆板底垫托, 可导致幔源玄武质熔体与下地壳的相互作用, 从而使熔体成分发生变化, 并深深地打上了下地壳的烙印.

### 3 岩石圈拆离的地震层析成像证据

最近徐佩芬等人<sup>[31]</sup>发表了大别-苏鲁碰撞造山带的地震层析成像结果, 显示大别山超高压变质带以南和合肥盆地北部地区的岩石圈厚度明显减薄, 最薄处仅有 50 km 左右. 这一岩石圈减薄可能有两种机制: (1) 碰撞后造山带岩石圈拆离; (2) 与新生代玄武岩有关的地幔上涌所引发的热侵蚀作用. 在皖中地区, 除合肥盆地部分地区有第三系玄武岩活动, 新生代火山活动最强烈地区是在郟庐断裂带及其以东地区(如嘉山和来安一带)<sup>[32]</sup>. 尽管合肥盆地北部岩石圈减薄可能部分与上涌地幔热侵蚀有关, 然而, 大别山南侧太湖-马庙断裂附近的岩石圈减薄只能用碰撞后岩石圈拆离来解释, 因为大别山没有新生代玄武岩活动.

### 4 地壳引张盆地与岩石圈减薄区的错位不耦合与岩浆板底垫托

徐佩芬等人<sup>[31]</sup>的大别山地震层析图像还显示了

在大别山及合肥盆地下约 40 km 处存在一薄层状低速异常带, 有两种可能解释: (1) 近期(第四纪)发生的部分熔融带或壳-幔边界的幔源岩浆板底垫托作用带; (2) 岩石圈内部壳-幔边界的大规模滑脱带. 由于在大别山没有第四纪岩浆作用, 因此我们倾向第 2 种解释, 这一解释还得到地壳引张盆地(如合肥盆地)与岩石圈减薄区错位不耦合关系的支持.

大别山地震层析成像显示出大别山及邻区岩石圈减薄或软流圈地幔上涌, 其中心分别在太湖-马庙断裂(TMf)和寿县-定远断裂(SDF)<sup>[31]</sup>. 然而大别山南北两侧伴随的大规模燕山期火山作用的中生代引张盆地、如长江中下游火山岩盆地、大别山北淮阳带和合肥盆地南部地区, 均在上述断裂以南, 也就是说盆地中心与岩石圈减薄及地幔上涌中心存在错位不耦合, 这种错位可能与左旋走滑的郟庐断裂带大规模水平位移有关, 即郟庐断裂西侧陆壳大规模向南滑动, 而岩石圈地幔部分滑距较小, 从而导致陆壳与岩石圈地幔之间产生大规模滑脱(detachment)断层和相对水平错位. 苏鲁地区由于郟庐断裂导致的上部地壳与岩石圈地幔之间的滑脱错位, 已由一些地球物理和地球化学研究证明<sup>[33,34]</sup>. 地震层析结果显示了这种陆壳与岩石圈地幔之间的分离, 滑脱在郟庐断裂以西也可以发生.

Hopper 等人<sup>[35]</sup>通过数值模拟指出在引张环境下, 上地壳引张中心(盆地)与岩石圈减薄及地幔上涌中心错位不耦合(offset decoupling), 只有在下地壳具有极弱的矿物组成(如湿石英)时才能发生. 显然我们不能期望下地壳岩石全是由含水石英岩组成的, 然而在下地壳与岩石圈地幔之间存在大面积熔体时, 可以满足这一岩石力学要求. 岩浆板底垫托作用可以提供这一条件, 该区大规模早白垩纪岩浆事件及郟庐断裂大规模位移的发生时代(早白垩纪)的一致性<sup>[36]</sup>, 也支持这一解释.

### 5 造山带碰撞后引张环境下的盆地 + 穹隆 + 盆地耦合关系与岩石圈拆离

在早白垩世, 大别山穹隆的南北两侧形成了下扬子和北淮阳两个引张火山岩盆地, 这种早白垩世盆地 + 穹隆 + 盆地的耦合关系很难用简单的引张构造模型去解释. 本文指出的碰撞后岩石圈拆离事件可以给出较合理的解释. 前已述大别-苏鲁带碰撞后岩石圈拆离发生在大别山穹隆的南北两侧, 从而

形成碰撞造山带两侧的引张盆地。然而,大别山穹隆下面的岩石圈仍厚达100 km<sup>[31]</sup>,被上涌软流圈地幔所包围。由于周围软流圈地幔的密度高于中间造山带大陆岩石圈的平均密度,从而使其上浮,形成穹隆构造。

## 6 大别-苏鲁造山带碰撞后岩石圈拆离发生的时代

根据上述讨论,大别山碰撞后岩石圈拆离可能发生过两次,最早一次发生在中侏罗世,并可能主要表现为山根中榴辉岩化的镁铁质下地壳的拆离,引发了超高压岩石的第2次快速抬升与冷却,以及在造山带核部发育的170 Ma左右的岩浆事件。第2次岩石圈拆离可能发生在早白垩世,导致了大别山穹隆构造的产生与快速抬升,以及早白垩世更大范围的火山喷发和岩浆侵入事件。大别山早白垩世岩浆事件的巨大规模,显示第2次岩石圈拆离构造的引张效应远大于第1次(中侏罗纪),这可能与早白垩世郯庐断裂大规模走滑的发生<sup>[36]</sup>及所引发的造山带进一步引张作用有关。

**致谢** 作者曾与孙枢院士、刘福田教授和徐佩芬博士进行过富有启发性的讨论,在此表示感谢。本工作受国家重点基础研究发展规划(G1999075503)、国家自然科学基金(批准号:49873006)和中国科学院知识创新重点项目(KZCXZ-107)资助。

## 参 考 文 献

- Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177~189
- Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust? *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 101~117
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379~388
- Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 1077~1093
- Li S G, Xiao Y L, Liu P 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
- Li S G, Wang S S, Chen Y Z, et al. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar methods. *Chem Geol*, 1994, 112: 343~353
- 李曙光, 李惠民, 陈移之, 等. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学 II. 锆石 U-Pb 同位素体系. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(3): 200~206
- Ames L, Tilton G R, Zhou G. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472~489
- Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonics implications. *Chem Geol*, 1996, 133: 29~51
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215~230
- 张本仁. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 110~123
- 孙卫东, 李曙光, Chen Y D, 等. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地球化学*, 2000, 29(3): 209~216
- 陆欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 等. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义. *高校地质学报*, 1999, 5(4): 372~377
- Davies J H, Blanchenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129: 85~102
- Zhong Z Q, Suo S T, You Z D. Regional-Scale Extensional Tectonic Pattern of ultrahigh-pressure and High-pressure metamorphic belts from the Dabie Massif, China. In: Ernst W G, Liou J G, eds. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-type Orogenic Belt: Final Report of the Task Group III-6 of the International Lithosphere Project*. Columbia: Bellwether Publishing Ltd, 2000. 161~169
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. What brought them up? Exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure rocks. *Geology*, 1995, 23: 743~746
- 王国灿, 杨巍然. 大别山核部罗田穹隆形成的构造及年代学证据. *地球科学*, 1996, 21(5): 524~528
- 桑隆康, 王人镜, 张泽明, 等. 九资河-天堂寨地区燕山晚期花岗岩与大别山带核部隆升. *地质学报*, 2000, 74(3): 234~246
- 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 和裂变径迹年龄测定. *中国科学, B 辑*, 1995, 25(10): 1086~1092
- Liou Y S, Lo C H, Tsai C H, et al. Thermochronological study of the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic terrane, east central China. *J of Geol Soc China*, 1999, 42(2): 159~188
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 1998, 45: 431~456
- 魏春景, 张立飞, 王式光. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩质岩石及其地质意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(4): 355~363
- 陈廷恩, 牛宝贵, 富云莲, 等. 大别山腹地岩石圈岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义. *地质学报*, 1999(4): 329~336
- Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U/Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *J of Geology*, 1997, 105: 744~753
- 王德滋, 伍启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. *地质学报*, 1996, 70(1): 23~33

- 26 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 大别山辉石-辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 高校地质学报, 1999, 5(3): 345~350
- 27 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 1999, 44(19): 2110~2114
- 28 李曙光, 聂永红, 郑双根, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用 I. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩主要元素及微量元素地球化学. 中国科学, D 辑, 1997, 27(6): 488~493
- 29 李曙光, 聂永红, Hart S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用 II. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的 Sr, Nd 同位素地球化学. 中国科学, D 辑, 1998, 28(1): 18~22
- 30 Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chem Geol, 1999, 157: 119~146
- 31 徐佩芬, 孙若味, 刘福田, 等. 扬子板块俯冲、断离的地震层析成象证据. 科学通报, 1999, 44(15): 1658~1661
- 32 安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987. 382~394
- 33 Li Z X. Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. Geology, 1994, 22: 739~742
- 34 Chung S L. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. J Geol, 1999, 107: 301~312
- 35 Hopper J R, Buck W R. Styles of extensional decoupling. Geology, 1998, 26: 699~702
- 36 朱光, 徐嘉炜, 孙世群. 郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据. 地质论评, 1995, 41(5): 452~456

(2001-03-26 收稿, 2001-05-25 收修稿稿)

## 湖泊沉积物磁学性质的环境意义

胡守云<sup>①</sup> 邓成龙<sup>②\*</sup> E. Appel<sup>③</sup> K. Verosub<sup>④</sup>

①中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ②中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; ③Institut für Geologie, Universität Tübingen, Tübingen 72076, Germany; ④Department of Geology, University of California, Davis, CA 95616, USA.

\* 联系人, E-mail: deng0714@yahoo.com

**摘要** 对湖泊沉积物磁性矿物的来源及其鉴别方法进行了较为深入系统的分析, 发现不同湖泊沉积物的磁学参数具有不同的气候响应过程. 提出为了恢复古气候和古环境的变化过程, 详细的岩石磁学和土壤磁学研究是认识湖泊沉积物磁学性质及其环境意义的基础.

**关键词** 岩石磁学 古气候 湖泊

随着科学技术的进步, 用于岩石磁学研究的仪器不断问世. 与此同时, 环境磁学研究在最近十几年取得了令人瞩目的成果<sup>[1,2]</sup>. 从最初的以岩芯柱对比为目的, 迅速扩展到将岩石磁学同潜在的环境变化过程相联系; 从侧重于区域对比, 发展到区域气候响应和全球变化研究. 对磁性矿物的物源研究, 从最初仅局限于碎屑来源, 逐步认识到磁细菌作用、沉积后还原条件下的磁性矿物的溶解作用、原地磁性矿物的自生或成岩作用、生物与人类活动的影响等. 正是这些受不同环境过程控制的磁性矿物共生在一起, 使得磁性矿物鉴定、剩磁获得过程、磁性质对环境变化响应等问题复杂化. 本文的主要目的是通过分析全球不同地区湖泊沉积物磁学性质的变化, 来认识湖泊沉积物磁学参数与沉积环境和气候变化的相互关系, 进而为湖泊环境磁学工作中遇到的一些实际问题提供可能的研究途径.

### 1 磁性矿物的来源

20 世纪 80 年代, 多数学者认为流域的碎屑是湖泊沉积物中磁性矿物的主要来源<sup>[3]</sup>. 基于这一事实, Dearing 等人<sup>[4]</sup>利用磁参数研究了侵蚀历史及来自流域碎屑物质的输入通量及方向, 并建立了磁化率与侵蚀量之间的半定量关系. 事实上, 湖泊沉积物中磁性矿物的成因是很复杂的, 例如, 在富含有机质的湖泊沉积物中, 部分磁性矿物起源于自生作用或成岩作用, 胶黄铁矿是这类磁性矿物中最典型的一种<sup>[5~8]</sup>. 这种矿物主要产生于还原条件下的富含硫化物及有机质的沉积物中, 常与粗颗粒磁铁矿共生(细颗粒的磁铁矿在还原条件下溶解), 在暴露于空气时, 容易氧化. 在变化的磁场中, 胶黄铁矿(以及磁黄铁矿)与磁铁矿的磁性特征相近, 往往难于鉴别. 但 XRD 测试、显微镜下鉴定及所携带剩磁随温度的变化特征有