# 北大别造山后伸展期中一下地壳流动 形式数值模拟研究

林少泽1,2),向必伟3),赵田3),谢成龙4)

1) 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学),重庆,400045;

2) 重庆大学,土木工程学院,重庆,400045;3) 安徽大学,资源与环境工程学院,合肥,230601;

4) 合肥工业大学,资源与环境工程学院,合肥,230009

内容提要:造山后伸展过程中,深部地壳的变形形式反映深部岩石圈的构造活动方式,是造山后伸展深部动力 学研究的主要内容。本次工作以大别造山带造山后伸展变形构造为研究对象,在详细的构造观察和组构分析基础 上,以实际变形组构为约束开展数值模拟,系统地研究伸展变形构造在垂向剖面上岩石变形机制的空间分布,进而 揭示大别造山带造山后伸展过程中深部地壳的变形形式。野外观察表明,北大别穹隆边缘区域拉伸线理优选方位 显著,而到穹隆中部拉伸线理定向性减弱,再到穹隆核部线理定向性有所增强。运动学上,北大别穹隆内呈现了一 致的上盘向 NW 的剪切指向。以此为约束的数值模拟研究表明,大别造山带造山后伸展期中一下地壳流动方式总 体上是介于透入性简单剪切形式与纯剪切形式之间的组合形式;垂直剖面上呈现为由上、下边界向中心简单剪切 分量显著降低,中一下地壳流变带中部以纯剪切变形为主。我们用造山带加厚地壳的韧性垮塌和深俯冲的太平洋 板块"后撤"来解释其动力学来源。

关键词:造山后伸展;大别造山带;变形组构;中一下地壳流动;数值模拟

韧性侧向流动是造山带深部地壳重要的构造活动之一。在造山带中一下地壳,岩石被局限在近水平的相对刚性边界内发生定向流动,形成渠道流(channel flow)(Bird,1991;Beaumont et al.,2001,2004)。渠道内部岩石的流动变形形式取决于深部岩石圈的构造运动特征乃至造山带深部动力学过程。因此,中一下地壳侧向流动方式是造山带深部岩石圈运动学过程及其动力学的主要研究内容之一。

Godin et al. (2006)依据流体力学理论,提出造 山带中一下地壳在不同边界条件下存在两种端元流 变型式,其本质在于不同边界条件下流变带内部岩 石变形机制的空间分布。在相对运动边界条件下发 生的均匀透入性简单剪切,流变带内垂深剖面上各 处岩石的变形都接近于简单剪切;在相对静止边界 条件下,压力(重力)梯度驱动的流变带内岩石在上、 下两边界处接近简单剪切变形,而流变带中心接近 于纯剪切变形。因此,准确地查明流变带垂向上岩 石变形形式的分布规律,是揭示流变带变形特征及 其对应的边界条件的有效途径(Sonder,2001; Godin et al.,2006; Harris,2007; Xypolias et al., 2014; Bao Xuewei et al.,2015)。尤其当边界剪切 带剥露不完整时,无法通过耦合边界剪切带运动学 极性来揭示流变带变形特征时,调查流变带内岩石 变形特征的分布就成为不二的选择。

大别造山带造山后伸展期中一下地壳发生了显 著流动变形(Wang Yongsheng et al.,2011),经岩 浆穹窿作用后形成了穹隆构造。现今的北大别穹隆 出露了从上部长英质边界剪切带到下地壳变形麻粒 岩的流变带内部岩石,但并未出露流变带下部边界

注:本文为中央高校基本科研业务费专项(编号 106112017CDJXY200004; 2019CDXYTM0032)和国家自然科学基金项目(编号 41830213,41772210,41472194)资助成果。

收稿日期:2018-06-28;改回日期:2018-09-25;网络发表日期:2018-12-10;责任编辑:黄敏。

作者简介:林少泽,男,1988年生。博士,讲师。主要从事构造地质与大地构造研究。Email: lszcqu@126.com。通讯作者:向必伟,男, 1976年生。博士,副教授。主要从事造山带构造变形分析研究。Email:xbw1977@163.com。

引用本文:林少泽,向必伟,赵田,谢成龙. 2019. 北大别造山后伸展期中一下地壳流动形式数值模拟研究. 地质学报,93(4):791~803,doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019124.

Lin Shaoze, Xiang Biwei, Zhao Tian, Xie Chenglong. 2019. Numerical Modeling Insight into Flowing Style of the Middlelower Crust in the North Dabie Mountains during the Post-orogenic Extension. Acta Geologica Sinica, 93(4):791~803.

剪切带。北大别穹隆内岩石发育了典型的流动变形 构造和变形组构,但对于这些变形构造与组构所记 录的中一下地壳流变形式及其动力学机制,前人研 究还存在诸多争议。本文拟对北大别区域出露的从 中一下地壳流变渠道上部边界剪切带到流动变形的 下地壳岩石开展连续的构造变形观察研究,并通过 以实际变形组构为约束的数值模拟,揭示北大别造 山后伸展期中一下地壳流变场特征,从而探讨其动 力学机制。

# 1 地质背景

大别造山带是世界上高压一超高压岩石发育最 为广泛的地区,含柯石英和微粒金刚石的榴辉岩出 露地表指示造山带经历了板块深俯冲和折返等构造 过程(Carswell et al.,2003)。前人研究成果显示, 扬子板块向华北板块深俯冲发生于中三叠纪(约 240~230 Ma; Ames et al., 1996; Rowley et al., 1997; Hacker et al., 2000; Li Shuguang et al., 2000; Ayers et al., 2002),随后的超高压岩石折返 浅部地壳在早侏罗纪之前已基本结束(Hacker et al., 2000; Li Renwei et al., 2005)。此后,大别造山 带相对稳定了相当长时间之后(约 80Ma),于早白 垩世发生了大规模的造山后伸展活动(Zhong Zengqiu et al., 1998; Ratschbacher et al., 2000; Suo Shutian et al., 2000; Faure et al., 2003; Lin Wei et al., 2007, 2009; Wang Qiang et al., 2007; Chen Fang et al., 2016; Liu Xiaoqiang et al., 2016),形成 了北大别穹窿构造。

大别造山带整体走向 NWW,东端以郯庐断裂 带为界,西端的商麻断裂将其与红安大别分隔(图 1),由南至北可分为四个岩石构造单元(Okay et al.,1993; Zheng Yongfei et al.,2003): 宿松杂岩



图 1 北大别穹窿构造剖面图

Fig. 1 Structural cross-sections of the North Dabie dome

①-北大别片麻岩;②-早白垩世沉积;③-变形岩体;④-未变形岩体;⑤-浅色条带;⑥-麻粒岩团块;⑦-韧性剪切带;⑧-断裂带

①—Gneiss;②—Early Cretaceous sedimentary rocks;③—deformed pluton;

4—undeformed pluton; 5—light stripes; 6—granulite xenolith; 7—shear zone; 8—fault zone

带、南大别高压一超高压变质带、北大别杂岩带和北 淮阳浅变质带。宿松杂岩带位于大别造山带南端, 界于南襄樊-广济断裂和太湖-马庙断裂之间,主要 由绿片岩一蓝片岩相变沉积岩和副片麻岩构成 (Jiang Laili et al., 2003)。南大别高压一超高压变 质带位于大别造山带中部,北侧的五河一水吼剪切 带将其与北大别穹窿杂岩带隔开,其主要岩石组成 为副片麻岩和呈透镜状分布其中的榴辉岩、硬玉石 英岩、大理岩和含石榴子石辉岩。北大别穹窿杂岩 带位于大别造山带北部,晓天一磨子潭剪切带将其 与北侧的北淮阳浅变质带分开,该岩石单元主要由 TTG 片麻岩、早白垩世花岗质岩体以及少量基性-超基性岩体和零星分布于穹窿核部的下地壳麻粒岩 组成(Chen Nengsong et al., 1998)。北淮阳浅变质 带由金寨-舒城断裂将其与造山带前陆盆地----合 肥盆地分隔开,主要由佛子岭群和庐镇关群两个浅 变质单元组成(Liu Xiaoqiang et al., 2018)。其中 佛子岭群主要是一套低级变质的变沉积岩,庐镇关 群为角闪岩相变质的副片麻岩。

北大别片麻岩经历了不同于南大别高压一超高 压岩石的深俯冲峰期变质与折返过程(Liu Dunyi et al.,2007)。大量年代学资料(Hacker et al.,1998; Ratschbacher et al., 2000; Wu Yuanbao et al., 2007; Xu Haijin et al., 2007; Wang Qiang et al., 2007) 和构造分析(Hacker et al., 1998; Ratschbacher et al., 2000)揭示北大别在早白垩世 经历了大规模的造山后伸展。已有研究揭示北大别 造山后伸展构造总体呈现为穹窿状(图1),穹窿中 心分别位于岳西和黄土岭(Zhong Zengqiu et al., 1998; Suo Shutian et al., 2000), 其中西部的黄土岭 出露下地壳麻粒岩(Chen Nengsong et al., 1998; Wei Chunjing et al., 2000; Shen Ji et al., 2014; Liu Yican et al., 2015). Wang Yongsheng et al. (2011)构造年代学分析表明,北大别的穹窿构造是 早期中一下地壳近水平流动变形后伸展隆升的结 果,从北大别边界剪切带向穹窿中心连续出露的是 从中一上地壳到下地壳岩石及其相应的流变组构。

# 2 北大别穹窿变形组构

北大别西部总体上呈现为中部上隆的穹窿状几 何外形,穹窿在南北方向剖面(图 1,B-B'、C-C'、D-D')上出露完整,分别以五河一水吼剪切带和晓天 磨子潭剪切带为界,呈现为背形;在 NW 方向剖面 上(图 1,A-A'),背形构造的北西侧被商城-麻城断 裂带切割,从而造成部分缺失。

前期工作我们对北大别穹窿内变形组构开展了 详细调查。北大别穹窿西部糜棱岩化片麻岩面理以 黄土岭为中心总体构成了穹状构造。矿物拉伸线理 的分布总体呈现了从边界剪切带到穹窿中部优选方 位逐渐弱化的趋势(Xiang Biwei et al., 2017)。已 有的构造年代学研究表明北大别中一下地壳原始近 水平的流动变形略早于穹窿作用(Wang Yongsheng et al., 2011), 早期流动变形组构必然受 到隆升作用改造。我们近似地认为, 穹状隆升作用 对区域上的线理产状整体上进行改造,使得原本产 状接近但处于穹隆不同部位的线理产状呈现较大变 化,但在穹隆上相对穹隆整体而言的极小区间内,线 理产状只是在穹隆作用下发生整体旋转。为了能够 更加精细地查明穹窿内部变形岩石中拉伸线理的发 育规律及其所记录的流变场特征,本次工作对北大 别穹窿露头尺度上的组构进行精细观测。我们对穹 窿内部不同部位5个露头区域开展连续的组构测 量,露头面积十分微小(<1km<sup>2</sup>),相对于宏观尺度 上的北大别穹窿(>1500km<sup>2</sup>),单个露头上的变形 组构受到穹窿隆升作用改造的差异性很小,可以近 似地作为整体的旋转。因此,穹窿隆升前后变形组 构的整体方位可能会发生变化,但组构的分布格局 基本没有改变,可以代表穹窿隆升作用改造前中-下地壳流动变形组构的初始格局。

如图 2 所示,露头 a 位于邻近晓天一磨子潭剪 切带的南侧,处于北大别穹隆北部边缘区域;露头 b 位于五河一水吼剪切带北侧的穹隆南部边缘区域; 露头 c 和 d 处以穹隆的中部区域,露头 e 处于北大 别穹隆核部。这5处露头上的面理产状存在明显差 异,但各露头内部面理产状都十分一致,在赤平投影 上面理极点都呈现了非常集中的点极密(图 2)。露 头 a 上, 面理一致倾向 NE, 拉伸线理以优选方位向 NW 倾伏; 露头 b 面理倾向 SE, 拉伸线理较为集中 地倾向 SE,两个露头上线理产状都略微有些分散。 赤平投影上,露头 a 的拉伸线理呈现了以 NW 向点 集密为主的投影图案,露头 b 的拉伸线理呈现了以 SE 方向点极密为主的投影图案,两者都兼有大圆环 带投影特征(图 2a、2b)。露头 c 上, 面理一致倾向 SSE,拉伸线理产状从 SSW 至 NNE 向倾伏,且未形 成明显的优选方位,赤平投影上呈现为明显的大圆 环带状(图 2c)。露头 d 上, 面理一致倾向 SEE, 拉 伸线理产状从 NW 到 NE 再到 SE 向倾伏,在 NW/ SE 倾伏方向形成了微弱的优选方位,在赤平投影上



图 2 北大别穹隆变形组构及运动学指向

Fig. 2 Deformation Fabrics and top to shear sense in the North Dabie dome

①一北大别片麻岩;②一早白垩世岩体;③一面理轨迹;④一断裂带;⑤一上盘运动方向;⑥一面理极点;⑦一拉伸线理

①—Gneiss;②—Early Cretaceous pluton;③—foliation trajectory;④—fault zone;

5-shear sense of the hanging wall; 6-foliation poles; 7-mineral elongation lineation

呈现为以大圆环带状图案为主,在 NE/SE 方向微 弱的点集密(图 2d)。露头 e 位于北大别穹隆核部 的黄土岭附近,面理一致以中等角度倾向 SE,拉伸 线理总体向 S-SE 倾伏,赤平投影上呈现了以大圆 环带为主,兼有 SE 方向优选方位投影图案(图 2e)。

# 3 数值模拟

#### 3.1 数值模拟方法

Eshelby(1957)提出了处理均匀弹性椭球嵌入体与均匀弹性基质间应变场关系的数学方法。这一方法随后被拓展应用于线性牛顿体材料(Billy et al.,1975)乃至非线性的粘性(Power-law)材料(Lebensohn et al.,1993; Jiang Dazhi et al.,2012;

Jiang Dazhi,2013)。Eshelby(1957)在数学上证明 当均匀基质中的嵌入体为椭球体时,变形过程中椭 球体内部的应力和应变都是处处一致的,但随着椭 球的几何形状和方位的变化,椭球内部流变场是非 稳态的。对于各向同性非线性黏性材料,椭球体内 流变场与远离嵌入体的基质内流变场满足如下公式 (Jiang Dazhi,2013):

$$D^{\mathrm{E}} = A : D^{\mathrm{M}} \tag{1}$$

$$W^{\rm E} = W^{\rm M} + \Pi : S^{-1} : (A - J^{\rm S}) : D^{\rm M}$$
(2)

两式中 D<sup>E</sup> 和 D<sup>M</sup>分别是椭球嵌入体内部和远 离嵌入体的基质内的拉伸张量;W<sup>E</sup>和 W<sup>M</sup>分别是椭 球嵌入体内部和远离嵌入体的基质内的涡度张量。 J<sup>S</sup>是四阶对称单位张量;S 和 Ⅱ 分别是对称和反对 称的 Eshelby 张量。A 是四阶应变率分布 (Partitioning) 张量,对各向同性材料其表达式为:  $A = [J^{s} + (n \cdot r_{eff} - 1)S] - 1: [J^{s} + (n - 1)S]$ (3)

式(3) 中 n 是非线性黏性基质材料的应力指数, $r_{eff}$ 是椭球嵌入体与基质材料的有效黏度比。由于椭球嵌入体的有效黏度取决于其变形时的真实应力(或者应变率)。当给定  $D^{M}$ 式(1)(2)(3)中的变量就只有 n 和 $r_{eff}$ ,嵌入体材料的有效黏度可通过Mancktelow(2013)和 Jiang Dazhi(2013)开发的迭代程序进行数值求解。

本次工作以北大别造山后伸展变形组构为约 束,采用多尺度数值模拟方法(Jiang Dazhi et al., 2012),探究北大别穹隆内部造山后伸展流变场特 征。北大别穹隆内任一处由不同流变学性质地质体 构成的露头区域,至少包含了三个尺度的构造,露头 区域整体为一级构造,被观察的各个观察点或成分 层岩石为二级构造,岩石中观察到的面理和拉伸线 理组构为三级构造。大量流变学性质不同的二级构 造构成一级构造,每个二级构造个体内部的流变场 决定了三级构造。我们在研究某一个二级构造内部 的流变场时,可以首先将一级构造对等为一均匀介 质(HEM, Jiang Dazhi, 2013),所研究的二级构造就 是处在这一均匀介质内的变形体。只要一级构造与 二级构造之间尺度差距足够大,任何单一的二级构 造对一级构造整体的流变学性质影响有限,可以忽 略。基于这一思想,我们构建一个均匀基质中包含 一个与基质流变学性质不同的椭球体的数值模型, 用椭球体模拟二级构造,用基质模拟与一级构造对 等的均匀介质(HEM),用椭球体内的最大有限应变 主轴和最小应变主轴垂直面模拟拉伸线理和面理 (Jiang Dazhi et al., 2012)。这样,基质中不同流变 学性质的椭球体内的最大有限应变主轴和最小应变 主轴的空间方位就能用来模拟观察区域内随机分布 的成分不一的岩石内拉伸线理和面理的产状。因 此,当获得的模拟面理和模拟线理与实际观测的面 理和拉伸线理产状格局基本一致时,对应的基质流 变场就代表了观察区域整体的流变场。

#### 3.2 数值模型

在图 3 所示的右手笛卡尔坐标系内(x<sub>1</sub>x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>), 我们建立一个基质单元体模型,内部嵌入椭球体。 鉴于已有资料多从单斜变形角度观察和分析北大别 造山后伸展变形,并没有揭示存在三斜变形的证据。 为此,我们在参考坐标系 x<sub>1</sub>x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>内定义基质流变场





Fig. 3 Numerical model and its coordination system

速度梯度张量  $L^{M}, L^{M} = \begin{bmatrix} (1-\mu) & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\mu} & \dot{\gamma} \\ 0 & 0 & \dot{-} \end{bmatrix} Ma^{-1}.$ 

如图 4 所示, 为主应变率,  $\gamma$  为沿  $x_2$  方向平行于  $x_1x_2$  平面的剪应变率。 $\gamma$  与运动学涡度数  $w_k$  存在 如下关系  $\dot{\gamma} = 2wk \sqrt{(\mu-1)^2 + \mu}/\sqrt{1-wk^2}$ 。 $L^M$ 中, 给定,  $\mu$  和  $w_k$  为变量。 $\mu$  是标量参数, 衡量体 积不变条件下, 沿  $x_3$  方向的缩短应变时, 沿  $x_1$  和  $x_2$  方向的拉伸应变率的相对大小。当  $\mu=1$  时,  $L^M$ 表达的是平面应变的一般剪切流变场, 垂向上的缩 短量完全由沿变形带走向的伸长量协调(图 4*a*); 当  $\mu=0$  时,  $L^M$  表达的是水平的 Sanderson et al. (1984)型走滑挤压变形带(图 4c); 当  $\mu=0.5$  时,  $L^M$ 表达的是单轴压扁模式(图 4b)。模拟计算中,  $\mu$  在  $0\sim1$ 之间每间隔 0.1 连续取值,  $w_k$  在  $\mu$  值给定时 在  $0\sim1$ 之间每隔 0.1 连续取值。

我们通过程序产生 300 个方位和形状随机的椭 球体,考察在基质流变场  $L^{M}$  中每个椭球体内部流 变场应变主轴方位。这 300 个椭球的长轴和中间轴 在 1 和 10 之间随机获得,短轴固定为 1。这样,椭 球体形状从近等轴的(1:1:1)到层状的(10:10: 1)再到杆状的(10:1:1)随机分布。椭球体长轴与  $x_3$  轴锐夹角以及长轴在  $x_1x_2$  平面投影与  $x_1$  轴锐 夹角通过程序随机赋值,使得椭球体方位随机分布 (Jiang Dazhi, 2007)。基质与椭球体材料都采用 power-law 黏性材料,应力指数均设为 2。椭球体与 基质的流变强度差异用两者的黏度比来衡量,初始 值在 0.2~2 之间随机获得。由于非线性的相互反 馈,通过迭代计算的实际有效黏度比的变化范围要 比初始范围大得多,能够反映大多数天然岩石间的 流变强度差异(Jiang Dazhi, 2012, 2013)。

我们利用适用于 power-law 黏性材料的 Eshelby 公式(Lebensohn et al., 1993; Jiang Dazh



#### 图 4 数值模拟结果



 $(a) - \mu = 1$  时,代表是单轴缩短 $(x_3)$ ,单轴拉伸 $(x_1)$ 的平面应变模式,最大有限应变轴平行于拉伸轴方向; $(b) - \mu = 0.5$  时,代表是单轴缩短 $(x_3)$ , $x_1$ , $x_2$  轴方向伸展,且伸展应变率相等的三斜应变模式,最大有限应变轴难以定向; $(c) - \mu = 0$  时,代表是单轴缩短 $(x_3)$ ,单轴拉伸  $x_2$ 的平面应变模式,最大有限应变轴平行于拉伸轴方向;不同灰度区域区划不同应变场下最大有限应变轴和最小有限应变轴的赤平投影格局(a)—a plain strain model with single principal strain axis  $(x_3)$  shortening and single principal strain axis  $(x_1)$  stretching when  $\mu = 1$ , in which the maximum finite strain axis is parallel to  $x_1$  axis;(b)—a triclinic strain model with single principal strain axis  $(x_3)$  shortening and single principal strain axis  $(x_3)$  shortening and two principal strain axes  $(x_1, x_2)$  stretching when  $\mu = 0.5$ , in which the maximum finite strain axis  $(x_2)$  stretching when  $\mu = 0$ , in which the maximum finite strain axis is parallel to  $x_2$  axis; The stereographic projection pattern of the maximum and minimum finite strain axes under different strain fields is showed by different gray areas

et al.,2012; Jiang Dazhi,2013)进行模拟计算,获得 上述 300 个椭球体内部流变场最大主应变轴和最小 主应变轴方位并进行赤平投影,用以模拟线理和面 理极点产状。当模拟计算所获得的"线理"和"面理" 产状格局不随进一步的变形发生改变时,终止计算。

#### 3.3 模拟结果与分析

图 4 呈现了椭球区域内最大和最小有限应变轴 在  $x_1x_2x_3$  坐标系内赤平投影结果及其随  $\mu$  和  $w_k$  的 变化的规律。最小有限应变轴的方向与  $\mu$  和  $w_k$  的 变化基本无关,始终平行于  $x_3$  轴;最长拉伸轴的优 选方位格局与  $\mu$  和  $w_k$  都相关。随着  $\mu$  值增大( $x_2$ 方向伸展的分量增大)和  $w_k$  增大( $x_2$  方向剪应变增 大),最大有限应变轴方向由  $x_1$  轴方向点极密(图 4, I 类投影区域) 经历优选方位不明显(图 4, II 类 投影区域),逐渐过渡到  $x_2$  方向的点极密图案(图 4, V 类投影区域)。当 $\mu$ >0.65 时,无论  $w_k$  如何取 值,最大有限应变轴都在  $x_2$  方向形成点极密。图 4 的灰度变化呈现了最大有限应变轴优选方位的逐渐 变化。需要指出的是,最大有限应变轴由  $x_1$  轴方向 点极密到(图 4, I 类投影区域)到优选方位不明显 (图 4, II 类投影区域)也是渐变过渡的,类似于从图 4 的 II 类投影区域过渡到 V 类投影中间经过图 4 的 III 和 IV 投影类型。

上文已述,本次模拟计算的椭球体内最大有限 应变轴和最小有限应变轴分别用来模拟北大别穹隆 内露头观察的线理和面理极点。我们只需要将理论 模拟结果沿坐标轴简单旋转使得 x2 与造山带走向 方向一致时模拟面理与实际面理产状基本一致,就 可以通过对比模拟线理和面理和实际测量线理和面 理的赤平投影格局。结合地质构造现实的相关约 束,我们就可以确定各个典型露头上岩石变形的流 变场特征。本次工作我们获得的北大别穹隆内 5 个 露头区域变形组构观测数据(图2所示)。其中,露 头 A 和 B 处于获得的变形组构赤平投影呈现 NW 向点极密为主兼有大圆环带(图 2a、2b),对应了图 4 模拟组构中区域Ⅳ的投影格局;露头C和D处于获 得的变形组构赤平投影呈现大圆环带为主兼有 NW 向点极密(图 2c、2d),对应了图 4 模拟组构中区域 Ⅲ的投影格局;露头 E 处于获得的变形组构赤平投 影也呈现了 NW 向点极密为主兼有大圆环带(图 2e),对应了图 4 模拟组构中区域Ⅳ的投影格局。前 文已述,前人已有的对晓天一磨子潭和五河水吼剪 切带变形组构的观察,都报道了 NW-SW 向优选方 位的拉伸线理,对应了图 4 模拟组构中区域 V 的投 影格局。

前人对于北大别穹隆造山后伸展构造分析研究 成果可以对变形流变场特征进行初步约束:①造山 后伸展总体拉伸方向为沿造山带走向方向,对应于 数值模型,μ>0.5;②同一韧性构造变形过程中,不 同区域的应变率是相同的。结合上述实际观察组与 数值模拟结果的对比,从北大别穹隆中部到边缘剪 切带各露头区域的流变场特征在图 4 描述时,其取 值范围只能在 0.5 $<\mu<$ 0.6,从大圆环带兼有  $x_2$  方 向极点型投影区域到 x2 方向极点型投影区域(图 4 黄色区域)。考虑到已有报道和本次野外构造观察 都显示北大别穹隆内变形岩石记录了一致的上盘向 NW 的剪切指向,揭示北大别造山后伸展流变场具 有相当的非共轴变形分量,我们取  $\mu \approx 0.55$  时的流 变场参数描述本次北大别穹隆内各观察区域流变场 特征(图 4,绿色粗线)。因此,北大别穹隆中部观察 区域流变场运动学涡度数 0.25 $< \omega_{\mu} < 0.4$ ,以共轴 变形为主导;邻近穹隆边界和穹隆核部的观察区域 运动学涡度数 0.4 < wk < 0.6, 以共轴变形为主兼有 简单剪切变形;穹隆边界剪切带区域运动学涡度数  $0.6 < w_k < 1, 应该为剪应变集中带。尽管 <math>\mu$  的取值 0.5<μ<0.6 范围内并不能完全确定,但北大别穹 隆内流变场分布特征是一致的,即穹隆中部以共轴 变形占主导,简单剪切分量最小,向南、北边缘简单 剪切分量增大,向核部简单剪切分量也增大(图4所 示)。

## 4 讨论

#### 4.1 北大别穹隆造山后伸展变形组构

恢复北大别穹隆造山后伸展变形过程中发育的 变形组构产状特征,是探讨北大别穹隆造山后伸展 过程的深部变形型式及其动力学机制的前提。北大 别区域早白垩世经历了广泛的上盘向 NW 的伸展 活动(Wang Yongsheng et al.,2011),造就了北大 别穹隆的构造格局。尽管实际观察到北大别穹隆内 发育了产状较为复杂的拉伸线理,目前多数学者倾 向穹隆伸展过程中发育了与伸展流变方向一致的 NW-SE 向拉伸线理(Wang Yongsheng et al., 2011;Ji Wenbin et al.,2017)。

对于现今观察到的北大别穹隆内产状复杂的拉 伸线理,先后出现过多种不同解释。其中一种可能 的解释是将不同倾向的拉伸线理进行产状分类,近 S-N 向拉伸线理解释为记录造山带俯冲阶段活动的 变形组构,NNW-SSE 向拉伸线理代表造山带俯冲 岩石折返构造变形组构,而只有 NW-SE 向拉伸线 理则代表了造山伸展剪切变形组构(Lin Wei et al.,2005)。这一解释的关键是认为北大别穹隆伸 展过程中早期的变形组构发生不完全置换的同时发 育了 NW-SE 向拉伸线理。另一种可能的解释认 为,北大别造山后伸展过程中发育的 NW-SE 向拉 伸线理在随后的穹状隆升过程中被改造成为现今的 产状格局。此外,早期学者认为不同倾向的拉伸线 理是北大别造山后伸展过程中穹隆状抬升时,岩石 向四周韧性垮塌发育的变形组构(Zhong Zengqiu et al.,1998)。

本次野外构造分析表明,北大别造山后伸展活 动发育的拉伸线理并非前人所认为的一致的 NW-SE向,而是呈现为 NW-SE 向略占优势,其它倾向 线理均有不同程度发育的产状分布格局。首先,现 今出露的北大别穹隆内岩石在造山后伸展过程变形 过程中伴随着大规模的混合岩化作用,并发生了大 规模的韧性流动变形。本次在所有露头尺度上观察 到的面理产状十分一致,局部露头上岩石发生揉皱, 褶皱轴面与面理方向一致。这些现象表明北大别穹 隆内部岩石内变形组构在造山后伸展期被完全置 换,不太可能保留早期俯冲和折返期的变形组构。 对韧性变形组构置换叠加的模拟研究揭示,早期的 变形组构很容易被完全置换,不太可能保存下来。 年代学上,大量前人资料显示,北大别穹隆内混合岩 流动变形时间、变形岩体侵入时间以及记录伸展变 形的冷却年龄大都在 142~128Ma 之间(Wu Yuanbao et al., 2007; Xu Haijin et al., 2007; Wang Yongsheng et al., 2011)。尽管这些区域拉伸线理 产状也不尽一致,但前人定年结果表明这些变形组 构都是早白垩世造山后伸展的产物。其次,本次野 外选取的5个露头尺度上观察的面理产状十分一 致,而拉伸线理产状依旧呈现复杂的格局。这就排 除了这些产状复杂的拉伸线理是伸展活动形成之后 被随后的穹状隆升活动改造的结果,因为不同露头 之间比较,面理和拉伸线理产状总体格局的差异能 体现穹隆隆升活动的改造作用,而单一露头内的变 形组构产状的整体格局应该仍然代表其形成时的特 点,尽管它们整体上发生了一定的偏转。最后,本次 观察以及前人报道均表明北大别穹隆内变形岩石记 录了一致的上盘向 NW 的剪切运动,这一运动学特 征不支持不同倾向拉伸线理是穹隆隆升过程中岩石 向不同方向韧性垮塌的论断。基于这些认识,我们 认为北大别穹隆内产状复杂的拉伸线理都是造山后 伸展活动的结果,这一产状分布格局用传统单一尺 度变形分析方式解释,很可能记录了造山后伸展活 动中岩石流动变形特征。

#### 4.2 北大别穹窿中一下地壳流变方式

已有的构造研究揭示了北大别穹窿现今构造格 局是早白垩纪造山后伸展隆升的结果(Hacker et al.,2000;Ratschbacher et al.,2000;Faure et al., 2003;Wang Yongsheng et al.,2011)。现今的北大 别穹窿从边界到核部出露了中一下地壳不同深度的 岩石(Wei Chunjing et al.,2000;Liu Yican et al., 2001;Ge Ningjie et al.,2001;Xia Qunke et al., 2003;Wu Yuanbao et al.,2004),构成了北大别穹 窿中一下地壳流变带较为完整的垂深剖面。本次通 过刻画垂深剖面上岩石变形、运动学以及岩石变形 机制的分布,很好地揭示了北大别穹隆造山后伸展 期中一下地壳的流变方式。

图 5 刻画了造山后伸展期北大别穹窿中一下地 壳岩石变形一变质温度、变形特征和变形机制等随 深度的变化(用运动学涡度数刻画)。前人大量研究 表明(Chen Nengsong et al., 2006; Xiang et al., 2008; Wang Yongsheng et al., 2009; Wang Shuijiong et al., 2013; Hu Zhaoping, 2016),北大别 穹隆从边界剪切带到核部,岩石变形一变质温度逐 渐升高,暗示其构造变形层次的加深。北大别穹窿 边界剪切带糜棱岩变形温度约为 600℃(Xiang et al., 2008; Wang Yongsheng et al., 2009); 边缘区域 内岩石极少发生混合岩化作用,主要为灰色长英质 片麻岩;穹窿中部,片麻岩中析出的浅色条带比例逐 渐增加,混合岩化程度逐渐增强,指示了约760℃的 变质变形温度(Wang Shuijiong et al., 2013; Hu Zhaoping,2016);穹窿的核部片麻岩的混合岩化作 用没有明显地进一步加强,但发育了下地壳高温麻 粒岩,指示的变质温度约为 920℃(Chen Nengsong et al., 2006)。野外观察到的不同区域内岩石变形 组构特征也刻画了深度剖面上岩石变形机制的变 化。顶部边界剪切带内岩石保存了显著的非对称变 形组构(图 5a),记录了明显地剪切指向。邻近边界 剪切带随着深度增加,岩石内保留的变形组构及其 剪切指向的非对称性逐渐降低(图 5b),到达穹隆中 部岩石内的非对称的变形组构难以识别,剪切指向 也逐渐倾向于不可识别(图 5c)。穹隆核部的下地 壳麻粒岩及周边岩石又保存了较为明显的非对称变 形组构,剪切方向指向性也较为明确(图 5d)。

本次以变形组构为约束的数值模拟进一步揭示 了不同深度岩石的变形型式。图 5 所示深度剖面 上,顶部边界剪切带为剪应变集中带,运动学涡度数 约为 0.9;向深部剪切带邻近区域运动学涡度数快 速降为 0.6 左右,从以简单剪切变形为主过渡到以 纯剪切变形为主;到穹隆变形带中部,运动学涡度数 降为 0.3 左右,以纯剪切变形占绝对主导;随着深度 的进一步增加,在下地壳麻粒岩深度,运动学涡度数 增为 0.6 左右,从绝对主导的纯剪切变形过渡到纯 剪切变形为主兼有一定的简单剪切变形。

岩石变形型式在深度剖面上的这一分布特征揭示流变带具有明显的韧性垮塌式的 Poiseuille 流动性质。然而,深度剖面上处处一致的上盘向 NW 的运动学特征限定了流变带整体为活动边界下的 Couette 流动型式。

#### 4.3 北大别穹窿造山后伸展深部动力学机制

Poiseuille 和 Couette 两种中一下地壳流动模 式是深部岩石圈不同活动形式在浅部的响应。本次 数值模拟揭示的北大别穹窿中一下地壳岩石流变性 质在深度剖面上的展布,其体现的既非纯粹是加厚 地壳韧性垮塌的 Poiseuille 流动模式,也不是简单 的活动板块边界剪切伸展的 Couette 流动模式,而 是兼具两者特性的过渡型式。

早白垩世大别造山带深部岩石圈具备两种流动 型式的动力学基础。首先,造山带经历印支期碰撞、 折返运动后,岩石圈显著加厚。地球化学资料显示, 造山后伸展早期北大别穹窿区域的地壳厚度大于





Fig. 5 The vertical section and flowing model in the middle-lower crust of the North Dabie dome

(a)一边界剪切带内,显著的非对称性变形组构指示上盘向 NW 的剪切运动;(b)一剪切带边缘区域,非对称性变形组构较为明确的指示上盘 向 NW 的剪切运动;(c)一穹隆中部,变形组构非对称性不明显,指示显著的共轴变形特征;(d)一穹隆核部,非对称性变形组构较为明确的指 示上盘向 NW 的剪切运动;(e)一北大别穹窿中一下地壳垂向剖面示意图;(f)一运动学涡度数在深度剖面上的分布特征;1一片麻岩;2一剪切 带;3一混合岩脉;4一麻粒岩

(a)—within the boundary shear zone, significant asymmetric deformation fabrics indicating the top to NW shear sense; (b)—within the area adjacent to the boundary shear zone, slightly asymmetric deformation fabrics indicating the top to NW shear sense; (c)—within the central areas of the dome, ambiguous asymmetric deformation fabric indicating a coaxial deformation; (d)—within the nuclear area of the dome, asymmetric deformation fabrics indicating the top to NW shear sense; (c)—distribution characteristics of the kinematic vorticity number on depth profile; 1—gneiss;2—shearband;3—migmatiteband;4—granulite

50 km(Wang Yongsheng et al., 2007), 这就为深部 地壳韧性垮塌提供了势能条件。造山带在俯冲碰撞 和折返时, 地温梯度较低, 约为  $5 \sim 10^{\circ}$  (Zheng Yongfei et al., 2016), 在沉寂了近 80Ma 之后, 地温 梯度明显回升,这一过程以早白垩世时期北大别穹 窿区域强烈的混合岩化作用为标志。下地壳岩石的 混合岩化使得其流变学强度显著降低,韧性垮塌流 动就成为可能。早白垩世时期,造山带前陆合肥盆 地的沉积作用既受平行于造山带走向的一系列伸展 断层控制(Wang Wei et al., 2017), 也受垂直于造 山带走向的郯庐断裂带控制(Wang Wei et al., 2017),这指示空间上造山带早白垩世在走向和垂直 走向上均有不同程度的伸展空间。其次,大别造山 带处于华北克拉通南缘,已有资料揭示华北克拉通 中一下地壳大规模流动变形的动力可能来源于太平 洋板块向欧亚板块俯冲后期深俯冲洋壳俯冲角度增 大产生的"后撤"效应(Zheng Jianping et al., 2001; Wu Fuyuan et al. ,2005; Zhao Dapeng et al. ,2007; Zhu Guang et al., 2010)。因此, 我们认为北大别穹 窿中一下地壳流动变形中透入性简单剪切流动 (Couette 流动)分量与华北克拉通破坏过程中中-下地壳流动变形发育的大量核杂岩伸展构造具有相 同的动力学背景,都是深俯冲的太平洋板块"后撤" 的结果。

# 5 结论

本次构造变形分析和以变形组构为约束的数值 模拟都揭示,北大别穹窿造山后伸展期中一下地壳 流动方式是介于透入性简单剪切模式与纯剪切模式 之间的组合类型,这与华北克拉通变质核杂岩式的 伸展减薄有所不同。透入性简单剪切可能与华北克 拉通破坏时中一下地壳一致的上盘向 NW 的流动 变形有相同的动力学来源,即深俯冲的太平洋板块 "后撤";而北大别造山后伸展过程中的纯剪切变形, 应该是造山带加厚地壳韧性垮塌的结果。本次工作 的研究结果对认识世界上类似的碰撞造山带的造山 后伸展期中一下地壳流变形式及其伸展构造具有重 要的启示意义。

## References

- Ames L, Zhou Gaozhi, XiongBaocheng. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics, 15(2): 472~489.
- Ayers J C, Dunkle S, Gao Shan, Miller C F. 2002. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie

Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. Chemical Geology, 186(3): 315~331.

- Bao Xuewei, Sun Xiaoxiao, Xu Mingjie, Eaton D W, Song Xiaodong, Wang Liangshu, Ding Zhifeng, Mi Ning, Li Hua, Yu Dayong, Huang Zhouchuan, Wang Pan. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions. Earth and Planetary Science Letters, 415: 16~24.
- Beaumont C, Jamieson R, Nguyen M, Lee B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. Nature, 414 (6865): 738~742.
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, Medvedev S. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 109(B6): B06406.
- Bilby B A, Eshelby J D, Kundu A K. 1975. The change of shape of a viscous ellipsoidal region embedded in a slowly deforming matrix having a different viscosity. Tectonophysics, 28(4): 265~274.
- Bird P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 96(B6): 10275~10286.
- Carswell D A, Compagnoni R. 2003. Introduction with review of the definition, distribution and geotectonic significance of ultrahigh pressure metamorphism. In: Carswell D A and Compagnoni R (Eds.), Ultrahigh Pressure Metamorphism. Eotvos University Press, Budapest: 3~9.
- Chen Fang, Peng Zhi, QiuJunqiang, Dong Tingting, Liu Binquan. 2016. Geological and geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb Ages of the Jinzhai intrusion in Anhui Province. Acta GeologicaSinica, 90(5): 879~895(in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Sun Min, You Zhendong, Malpas J. 1998. Wellpreserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, central China. Journal of Metamorphic Geology, 16(2): 213~222.
- Chen Nengsong, Liu Rong, Sun Min, Li Huimin, He Lei, Wang Qinyan, Zhang Hongfei. 2006. LA-ICPMS U-Pb zircon dating for felsic granulite. Huangtulingarea, North Dabieshan: constraints on timing of its protolith and granulitefacies metamorphism, and thermal events in its provenance. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 31 (3): 294~300 (in Chinese with English abstract).
- Eshelby J D. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 241(1226):376~396.
- Faure M, Lin Wei, Schärer U, Shu Liangshu, Sun Yan, Arnaud N. 2003. Continental subduction and exhumation of UHP rocks. Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). Lithos, 70(3~4): 213~241.
- Ge Ningjie, Li Huiyu, Qin Liping, Hou Zhenhui, Bo Lin. 2001. Sr, Ndand Pb Isotope Geochemistry of Granulites and TTG Gneisses from the North Dabie Mountains. Acta GeologicaSinica, 75(3): 379~384 (in Chinese with English abstract).
- Godin L, Grujic D, Law R D, Searle M P. 2006. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: An introduction. Geological Society, London, Special Publications, 268(1): 1~23.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong Shuwen. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. Earth and Planetary Science Letters, 161(1~4): 215~230.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong Shuwen, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in

east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. Journal of Geophysical Research, 105(B6): 13339 $\sim\!13364.$ 

- Harris N. 2007. Channel flow and the Himalayan-Tibetan orogen: a critical review. Journal of the Geological Society, 164(3): 511  $\sim$ 523.
- Hu Zhaoping. 2016. Anatexis of orogenic crust: Evidence from migmatites in the North Dabie. A dissertation for doctor's degree. University of science and technology of China. 1~127 (in Chinese with English abstract).
- Ji Wenbin, Lin Wei, Faure M, Shi Yonghong, Wang Qingchen. 2017. The early Cretaceous orogen-scale Dabieshan metamorphic core complex: implications for extensional collapse of the Triassic HP-UHP orogenic belt in eastcentral China. International Journal of Earth Sciences, 106(4): 1311 ~1340.
- Jiang Laili, Wu Weiping, Liu Yican, Zhang Yong, Qian Cunchao. 2003. Progress of tectonic research on the (UHP) belt in the eastern Dabieshan Orogen in Central China. Progress in Natural Science, 13(12): 1238~1246.
- Jiang Dazhi. 2007. Numerical modeling of the motion of deformable ellipsoidal objects in slow viscous flows. Journal of Structural Geology, 29(3), 435~452.
- Jiang Dazhi. 2012. A general approach for modeling the motion of rigid and deformable ellipsoids in ductile flows. Computer and Geosciences, 38(1): 52~61.
- Jiang Dazhi. 2013. The motion of deformable ellipsoids in power-law viscous materials: formulation and numerical implementation of a micromechanical approach applicable to flow partitioning and heterogeneous deformation in Earths lithosphere. Journal of Structural Geology, 50: 22~34.
- Jiang Dazhi, Bentley C. 2012. A micromechanical approach for simulating multiscale fabrics in large-scale high-strain zones: theory and application. Journal of Geophysical Research Solid Earth. 117(B2): 382~396.
- Lebensohn R A, Tomé C N. 1993. A self-consistent anisotropic approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals: application to zirconium alloys. Acta Metallurgica Et Materialia, 41(9), 2611~2624.
- Li Renwei, Wan Yusheng, Cheng Zhenyu, Zhou Jianxiong, Li Shuangying, Jin Fuquan, Meng Qingren, Li Zhong, Jiang Maosheng. 2005. Provenance of Jurassic sediments in the Hefei Basin, east-central China and the contribution of highpressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan. Earth and Planetary Science Letters, 231(3): 279~294.
- Li Shuguang, Jagoutz E, Chen Yizhi, Li Qiuli. 2000. 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. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 64(6): 1077~1093.
- Lin Wei, Enami M, Faure M, Schärer U, Arnaud N. 2007. Survival of eclogite xenolith in a Cretaceous granite intruding the Central Dabieshan migmatite gneiss dome (Eastern China) and its tectonic implications. International Journal of Earth Science, 96(4): 707~724.
- Lin Wei, Shi Yonghong, Wang Qingchen. 2009. Exhumation tectonics of the HP-UHP orogenic belt in Eastern China: New structural-petrological insights from the Tongcheng massif, Eastern Dabieshan. Lithos, 109(3~4): 285~303.
- Lin Wei, Wang Qingchen, Shi Yonghong. 2005. Architecture, kinematics and deformation analysis in Dabie-sulu collision zone. Acta PetrologicaSinica, 21(4): 1195~1214 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoqiang, Yan Jun, Wang Aiguo, Li Quanzhong, Zhang Yuanyuan. 2016. Geochronological study on Mesozoic magmatic rocks in Yuexi area, Dabie Orogen. Geological Review, 62(4): 897~914(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoqiang, Yan Jun, Wang Aiguo. 2018. Petrogenesis of quartz

sygnite porphyry in the Gongdongchong Pb-Zn deposit, North Huaiyang Belt. Acta Geologica Sinica, 92(1):  $41 \sim 64$  (in Chinese with English abstract).

- Liu Yican, Li Shuguang, Xu Shutong, Jiang Boming, Zheng Yongfei, Zhang Zongqing, Jiang Laili, Chen Guanbao, Wu Weiping. 2001. Sm-Nd dating of eclogites from Northern Dabie Mountains and its constraints on the timing of granulitefacies retrogression. Geochimica, 30(1): 79~87 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yican, Deng Liangpeng, Gu Xiaofeng. 2015. Multistage exhumation and partial melting of high-T ultrahigh-pressure metamorphic rocks in continental subduction-collision zones. Science China: Earth Sciences, 58(7): 1084~1099.
- Liu Dunyi, Wan Yusheng, Wu Jiashan, Wilde S A, Zhou Hongying, Dong Chongyan, Yin Xiaoyan. 2007. Eoarchean Rocks and Zircons inthe North China Craton, Developments in PrecambrianGeology, 15(7):251~273.
- Mancktelow N S. 2013. Behaviour of an isolated rimmedelliptical inclusion in 2d slow incompressible viscousflow. Journal of Structural Geology, 46: 235~254.
- Okay A I. 1993. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrene: Dabie Shan, China. European Journal of Mineralogy, 5(4): 659~675.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong Shuwen, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 105(B6): 13303~13338.
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, Peng Z X, Baker J, Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. Earth and Planetary Science Letters, 151(3~ 4): 191~203.
- Sanderson D J, Marchini W R D. 1984. Transpression. Journal of Structural Geology, 6: 449~458.
- Shen Ji, Wang Ying, Li Shuguang. 2014. Common Pb isotope mapping of UHP metamorphic zones in Dabie orogen, Central China: Implication for Pb isotopic structure of subducted continental crust. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 143: 115~131.
- Sonder L J. 2001. Ductile shear zones as counterflow boundaries in pseudoplastic fluids: Discussion and theory. Journal of Structural Geology, 23(1): 149~153.
- Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhendong. 2000. Extensional deformation of post ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation process of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie massif, China. Science China Earth Sciences, 43 (3): 225~236 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, Jian Ping, Zhao Zhenhua, Li Chaofeng, Xu Wei, Ma Jinlong, He Bin. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(10): 2609~2636.
- Wang Wei, Zhu Guang, Zhang Shuai, Liu Cheng, Gu Chengchuan. 2017. Detrial zircon evidence for depositional time and provenance of Mesozoic sediments in Hefei Basin. Geological Review, 63(4): 955~977(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongsheng, Xiang Biwei, Zhu Guang, Chen Wen, Wei Xin. 2009. <sup>40</sup> Ar-<sup>40</sup> Ar geochronology records for post-orogenic extension of the Xiaotian-Mozitan fault. Geochimica, 38(5): 458~471 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongsheng, Xiang Biwei, Zhu Guang, Jiang Dazhi. 2011. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China. Journal of Structural Geology, 33(3): 362~380.
- Wang Shuijiong, Li Shuguang, Chen Lijuan, He Yongsheng,

AnShichao, Shen Ji. 2013. Geochronology and geochemistry of leucosomes in the North Dabie Terrane, East China: implication for post-UHPM crustal melting during exhumation. Contributions to Mineralogy and Petrology, 165 (5): 1009 $\sim$ 1029.

- Wei Chunjing, Chen Bin, Zhang Cuiguang, Chen Jing. 2000. Metamorphism of Dabie Mountains and its relationship with the collisional orogeny. Journal of Geomechanics, 6(3): 25~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, Zhang Xiaoou, Yang Jinhui. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth and Planetary Science Letters, 233(1): 103~119.
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Zheng Yongfei, Xia Qunke, Tu Xianglin. 2004. Trace element geochemistry of zircons in migmatitic gneiss at Manshuihe, North Dabieshan and its geological implications. Acta PetrologicaSinica, 20(5): 1141 ~1150 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: constraints on partial melting. Journal of Metamorphic Geology, 25(9): 991~1009.
- Xia Qunke, Zheng Yongfei, Ge Ningjie, Deloule E. 2003. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from gneiss of Huangtuling, Northern Dabie: Old protolith and multi-stage evolution. Acta PetrologicaSinica, 19(3): 506 ~ 512 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Biwei, Wang Yongsheng, Zhu Guang, Shi Yonghong. 2008. Evolution of the Xiaotian-Mozitan fault and its implications for exhumation of Dabie HP-UHP rocks. Progress in Natural Science: Materials International, 18(6): 713~722.
- Xiang Biwei, Wang Yongsheng, Zhu Guang, Hu Shaoqi, XieChenglong. 2017. Quartz C-axis as an indicator of the middle-lower crust flowing during the post-orogenic extension in the North Dabie. Geotectonica et Metallogenia, 41(5): 801 ~816 (in Chinese with English abstract).
- Xu Haijin, Ma Changqian, Ye Kai. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. Chemical Geology, 240(3~4): 238~259.
- Xypolias P, Alsop G I. 2014. Regional flow perturbation folding within an exhumation channel: A case study from the Cycladic Blueschists. Journal of Structural Geology, 62: 141~155.
- Zhao Dapeng, Maruyama S, Omori S. 2007. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics. Gondwana Research, 11(1 ~2): 120~131.
- Zheng Jianping, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu Fengxiang, Zhang Ming, Pearson N J. 2001. Relic refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. Lithos, 57(1): 43~66.
- Zheng Yongfei, Fu Bin, Gong Bing, Li Long. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. Earth-Science Reviews,  $62(1 \sim 2)$ : 105  $\sim 161$ .
- Zheng Yongfei, Chen Renxu, Xu Zheng, Zhang Shaobing. 2016.

The transport of water in subduction zones. Science China Earth Sciences, 59(4):  $654 \sim 682$ .

- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, You Zhendong. 1998. Extensional tectonic framework of post high and ultrahigh pressure metamorphism in Dabieshan, China. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 23(3): 225~229.
- Zhu Guang, Niu Manlan, Xie Chenglong, Wang Yongsheng. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. The Journal of Geology, 118(3): 277 ~293.

## 参考文献

- 陈芳,彭智,邱军强,董婷婷,柳丙全. 2016. 安徽金寨岩体地质和 地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 地质学报,95 (5):879~895.
- 陈能松,刘嵘,孙敏,李惠民,何蕾,王勤燕,张宏飞.2006.北大 别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的 锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束.地球科学一中国地质大学学 报,31(3):294~300.
- 葛宁洁,李惠玉,秦礼萍,侯振辉,柏林. 2001. 大别山麻粒岩和 TTG 片麻岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学. 地质学报,75(3): 379~384.
- 林伟,王清晨,石永红.2005.大别山-苏鲁碰撞造山带构造几何 学、运动学和岩石变形分析.岩石学报,21(4):1195~1214.
- 刘晓强,闫峻,王爱国,李全忠,张媛媛. 2016. 大别造山带岳西地 区中生代岩浆岩年代学研究. 地质论评,62(4):897~914.
- 刘晓强,闫峻,王爱国. 2018. 北淮阳汞洞冲铅锌矿区石英正长斑岩 成因. 地质学报,92(1):41~64.
- 刘贻灿,李曙光,徐树桐,江博明,郑永飞,张宗清,江来利,陈冠 宝,吴维平. 2001.大别山北部榴辉岩的 Sm-Nd 年龄测定及其 对麻粒岩相退变质时间的制约.地球化学,30(1):79~87.
- 胡昭平. 2016. 造山带地壳的深熔作用:北大别混合岩地球化学研 究. 中国科学技术大学博士论文, 1~127.
- 王薇,朱光,张帅,刘程,顾承串. 2017. 合肥盆地中生代地层时代 与源区的碎屑锆石证据. 地质论评,63(4):955~977.
- 王勇生,向必伟,朱光,陈文,魏鑫. 2009. 晓天一磨子潭断裂后造 山伸展活动的<sup>40</sup> Ar-<sup>39</sup> Ar 年代学记录.地球化学,38(5):458 ~471.
- 魏春景,陈斌,张翠光,陈晶. 2000. 大别地区的变质作用及与碰撞 造山过程的关系. 地质力学学报,6(3):25~38.
- 吴元保,陈道公,郑永飞,夏群科,涂湘林.2004.北大别漫水河混 合岩化片麻岩中锆石微区微量元素特征及其地质意义.岩石学 报,20(5):1141~1150.
- 夏群科,郑永飞,葛宁洁,Etienne Deloule. 2003. 大别山北部黄土 岭片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成:古老的原岩和多 阶段历史. 岩石学报,19(3):506~512.
- 向必伟,王勇生,朱光,胡召奇,谢成龙.2017.石英C轴组构指示北 大别造山后伸展期中一下地壳流变形式.大地构造与成矿学, 41(5):801~816.
- 钟增球,索书田,游振东.1998.大别山高压、超高压变质期后伸展 构造格局.地球科学——中国地质大学学报,23(3):225 ~229.

# Numerical Modeling Insight into Flowing Style of the Middle-lower Crust in the North Dabie Mountains during the Post-orogenic Extension

LIN Shaoze<sup>1,2)</sup>, XIANG Biwei<sup>\*3)</sup>, ZHAO Tian<sup>3)</sup>, XIE Chenglong<sup>4)</sup>

1) Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area

(Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing, 400045;

2) School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045;

3) School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, 230601;

4) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

\* Corresponding author: xbw1977@163.com

#### Abstract

The deformation style of the deep crust during the post-orogenic extension can reflect the tectonic activities of deep lithosphere, and should be the key issue in studying the kinematics of the deep lithosphere. Based on the field observation and structural texture in the North Dabie Mountains, numerical modeling was conducted for the post-ogogenic extensional deformation structure of the Dabieshan orogen to systematically analyze the vertical spatial distribution of rock deformation mechanism of the extensional deformation and further reveal the deformation styles of middle-lower crust during the post-orogenic extensional process. Field observations show that stretching lineation has distinctive preferred orientation in the margin areas of the North Dabie dome, gradually deceases towards the middle of the dome, and then is enhanced again in the core of the dome. Kinematically, the dome of North Dabie Mountain shows a consistent NW-trending shearing in hanging wall. Based on the results above, numerical modeling in this study indicates that flow styles of the North Dabie middle-lower crust is generally the combination of simple penetrative shear deformation and pure shear deformation. Simple shearing in the profiles shows distinct decreasing toward the core from top and bottom and, flow mode in the center of the middle-lower crust is dominantly pure shearing. It can be concluded by the authors that the flow model of the North Dabie middle-lower crust may result from the recession of the deeply subducted pacific plate and the ductile collapsing of the thickened orogenic crust.

Key words: post-orogenic extension; Dabie Orogen; deformation fabrics; Middle-lower crust flowing; numerical modeling