

文章编号: 1000-0550(2010)01-0102-16

大别山周缘盆地物源研究: 新结果及运用^①

李任伟

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 叙述单颗粒碎屑矿物在大别山周缘盆地物源分析中的运用。现代河流沉积与大别山源区的对比研究表明碎屑石榴石、K-白云母和电气石的化学组成可以有效地被用于物源分析。它们在侏罗纪—白垩纪—古近纪沉积中的特征揭示了大别山源区岩石组成的复杂性,由扬子大陆深俯冲折返所形成的高压—超高压变质岩在白垩纪—古近纪逐渐向东南缘盆地提供了重要的物源,在侏罗纪时期主要分布在大别山北缘盆地的源区。石炭纪时期大别山北缘盆地中碎屑 Cr-尖晶石的化学组成和碎屑锆石 U-Pb 年龄结构指示源区岩石组成主要为早古生代华北大陆南缘活动大陆边缘的特征;此外,锆石 U-Pb 年龄指示源区岩石也具有扬子大陆的特征。

关键词 物源分析 单颗粒碎屑矿物 大别山 侏罗纪 石炭纪

作者简介 李任伟 男 1940 年出生 研究员 沉积学和地球化学 E-mail: lrw@mail.igcas.ac.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言: 研究进展

大别山(+苏鲁)地区具有全球最大规模的高压—超高压变质岩的出露。大约从 20 世纪 80 年代至今,它成为国内、外固体地球科学界开展大陆动力学研究的重要对象。中—新生代时期大别山造山带的形成和演化与扬子大陆向华北大陆下的深俯冲和折返直接相关^[1-3],因此,研究在大陆深俯冲过程中所形成的高压—超高压岩石何时出露地表,以及它们的时—空展布特征成为该造山带研究的一个重要课题。我们主要依赖物源分析的方法,即在与造山带有成因联系的盆地中寻找高压—超高压物源的沉积记录。这方面的工作已经取得进展^[4],本文报导若干后续的研究成果。

大别山被认为是秦岭造山带东延的部分^[5]。但是,由于相对缺乏为秦岭造山带特征的(例如秦岭群和二郎坪群)地层,人们对大别地区古生代的地质历史知之甚少,本文作者通过对大别山北缘石炭纪盆地物源的研究揭示它在古生代时期确实经历了与秦岭造山带类似的构造演化史^[6],本文也将提供新的根据。

传统的物源研究包括岩石学和地球化学两类方法。前者以岩石中碎屑成分为研究对象,常见的如石英、长石和岩屑以及重矿物组合^[7,8],其研究成果被广泛应用于盆地—源区古地理的恢复。大约从 20 世

纪 70 年代后期起至 80 年代,岩石学的方法也被广泛用于物源区板块构造环境的判别^[9,10]。地球化学的方法包括碎屑岩的主元素、微量元素和同位素组成特征^[11-14]。由于岩石学方法有时存在局限性,例如砂岩原始骨架颗粒的特征可能在沉积后所经历的成岩作用和变质作用过程中发生变化,而沉积物的化学组成,元素的比值和同位素组成却相对变化小,因此,从 80 年代起地球化学的方法也成为源区研究,尤其是源区构造环境判别的有效工具^[15]。砂岩岩石和地球化学的方法已经被用于大别山周缘盆地的物源分析^[16-23]。此外,砾岩中砾石的地球化学特征在大别山北缘合肥盆地的物源分析中获得了特殊的运用^[24-26]。特别值得提及合肥盆地晚侏罗世—早白垩世沉积中高压—超高压变质岩砾石发现和研究的意义。它不仅证明扬子大陆深俯冲形成的岩石已于此时期大规模地折返地表^[27-31],而且还保留了扬子大陆深俯冲过程中曾经历过不同温压条件的两期超高压变质作用的证据^[31],为研究大陆深俯冲过程提供了新的信息。

碎屑岩物源研究的进展与研究手段的革新紧密相关,从 20 世纪 80 年代后期起微探针技术的应用将物源分析引入到一个新的,即单颗粒碎屑矿物组成研究阶段^[32,33]。微探针技术主要包括两种类型,一类是电子微探针分析,主要用于单颗粒碎屑矿物化学组

^①国家重点基础研究发展规划(批准号:G1999075507)和中国科学院重大专项(编号:KZ951-A1-401-07)资助。
收稿日期:2008-11-12; 收修改稿日期:2009-04-08

成的分析,从中提取有关物源的信息^[34]。另一类是离子微探针分析,用于分析单颗粒碎屑矿物的同位素组成,从中提取有关物源的信息。离子探针包括灵敏、高分辨率离子微探针(SHRIMP)和激光探针质谱(LA-MC-ICPMS),它们可以对单颗粒碎屑锆石等矿物进行U—Pb年龄测定。微探针技术本质上是光学显微镜、矿物化学和同位素分析技术的延伸。在物源研究中人们往往碰见的是多物源(混合)的问题,此时全岩岩石学和地球化学的研究方法仅仅能够提供提供一个平均值,但是单颗粒碎屑矿物的研究能帮助我们获得有关物源沉积记录更具体、精确的信息,因而充分显示出其优势。从20世纪90年代中期,离子微探针技术开始运用于北海油田的物源研究^[35],并迅速成为古地理重建和造山带源区构造演化研究的有力工具^[36-39]。本文作者采用微探针技术对大别山北缘侏罗纪和石炭纪沉积物源进行了研究^[4,6,40-43],其中,防虎山组超高压变质岩物源的新发现证明扬子大陆深俯冲物质初次折返地表的时间应为早侏罗世^[41-43]。Grimmer等人也采用微探针等方法对大别山东南缘前陆盆地沉积物源进行了研究,他们推测高压超高压变质岩可能于象山群沉积早期(中侏罗世,大约190~160 Ma)初次出露地表^[44]。本文将采用微探针技术研究源于大别山的现代河流沉积中的碎屑石榴石、电气石和白云母,大别山东南缘前陆盆地白垩—古近系沉积中的碎屑石榴石和白云母,大别山北缘合肥盆地侏罗系沉积中碎屑电气石化学组成,大别山北缘石炭系沉积中碎屑Cr—尖晶石化学组成和碎屑锆石的U—Pb年龄。通过对这些碎屑矿物的研究我们可以更多地了解中—新生代和古生代时期大别山物源区的时空变化特征。

在结束本节时还需提及裂变径迹技术,它也广泛被应用于物源分析^[45]。Grimmer等曾对大别山东南缘前陆盆地碎屑磷灰石裂变径迹进行过研究,但是由于沉积物深埋的缘故被完全退火(磷灰石裂变径迹退火温度大约为60~110℃, >110℃时被完全退火),所获结果不能运用于物源分析^[44,46]。本文作者对合肥盆地南缘侏罗纪碎屑锆石和磷灰石也进行过研究(结果待发表),不仅磷灰石裂变径迹完全退火,大多数样品中锆石的裂变迹也发生退火(退火温度大约为200~320℃),因而难以采用该项技术开展物源分析。许长海等对合肥盆地南缘碎屑磷灰石裂变径迹发表的结果也表明它们更多反映的是盆地埋藏加热的信息^[47,48]。但是,他们发现合肥盆地东北部

上白垩统的碎屑磷灰石可能部分保留源区抬升剥露的信息。

1 研究区地质背景

1.1 中—新生代时期大别山周缘盆地

1.1.1 合肥盆地

大别山从南至北包括下列构造岩石单元:扬子前陆褶皱冲断带,宿松蓝片岩带,角闪岩带,含柯石英榴辉岩带,北部正片麻岩带,以及佛子岭群和卢镇关群绿片岩—角闪岩相带(图1)。合肥盆地位于大别山北缘,盆地南缘侏罗系地层的分布如图1。在安徽省肥西县地区,侏罗系沉积自下而上包括防虎山组、圆筒山组和周公山组。在霍山—独山—金寨地区,它包括三尖铺组和凤凰台组。在河南省武庙和商城地区侏罗系地层包括朱集组和段集组。防虎山组是合肥盆地出露的最古老的中生代地层,含有总体面貌代表早侏罗世的植物化石,因此被划归为早侏罗世地层,(见文献4,43,及其中的参考文献)。防虎山组厚402 m,是一套河流相沉积,下部以灰白、灰黄色厚层砾岩、砂砾岩、粗砂岩和中—厚层中粗粒长石砂岩、长石石英砂岩为主。上部为灰白色厚层至中—厚层含砾的粗粒长石石英砂岩和中、粗粒石英长石砂岩。圆筒山组、三尖铺组和朱集组属中侏罗世沉积^[43]。圆筒山组主要由互层的紫红色细砂岩、粉砂岩和泥岩组成,为相对远源的河流—湖泊环境沉积。三尖铺组为一套冲积—河流环境沉积,下部由红色砂岩和砾岩组成,中部为红色砂岩、粉砂岩和泥岩,上部为紫红或紫灰色砂岩。朱集组则主要为河流环境沉积的砂岩、粉砂岩和泥岩,在商城地区底部为一套红色的砾岩。周公山组,凤凰台组和段集组属晚侏罗世—早白垩世(J_3 — K_1 ?)。周公山组和段集组主要为冲积—河流环境沉积,凤凰台组则主要为冲积环境沉积,厚度千米以上。古水流的研究结果表明中—晚侏罗世时期合肥盆地南缘沉积物源为大别山^[20,29,49,50]。

1.1.2 大别山南缘前陆盆地

大别山南缘的大冶—麻城盆地地层结构如图2所示。它包括早、中三叠世的大冶组和嘉陵江组,其下部为一套薄层状微晶灰岩和页岩组合,上部为中厚层、夹薄层白云岩。晚三叠世蒲圻组为一套砂岩—泥岩沉积。香溪群(J_1)总体上为一套河流相含煤碎屑岩沉积,花家湖群(J_2)则为辫状河中粗粒砂岩—粉砂岩的旋回。晚侏罗世地层以马架山为代表,主要为酸性流纹质火山岩与火山凝灰质碎屑岩沉积。灵乡组

(K_1^1) 产出凝灰质碎屑岩夹酸性火山岩,由南向北(大冶到黄石)碎屑岩层变厚、粒度总体变粗,砾石(角砾)成分也由灰岩—闪长岩—流纹岩—大理岩组合变为石英岩—片麻岩—角闪岩组合,表明物源发生了明显变化。大寺组(K_2^2)发育中酸性—酸性火山岩夹火山角砾岩,由南向北尖灭或相变为凝灰质碎屑岩。晚白垩世(可能还包括古近纪)的公安寨组在大别山南麓地区发育类磨拉石堆积,下段为紫红色含砾砂岩、细砂岩夹砾岩,中段为紫红色泥质粉砂岩与砾

质砂岩互层,上段为紫红色砂质砾岩、砾岩和砾石质细砂岩互层,为一套冲积扇、辫状河沉积。盆地地层的展布情况可参考文献[19]。

1.1.3 大别山东缘前陆盆地

大别山东缘安庆—怀宁—潜山地区中、新生代地层分布于庐断裂以东的下扬子盆地,中生代地层在安庆月山出露较好,新生代古近系出露在怀宁—潜山地区^[23],包括中晚三叠世黄马青群(铜头尖组和拉犁尖组),早、中侏罗世磨山组、罗岭组,晚侏罗世—早

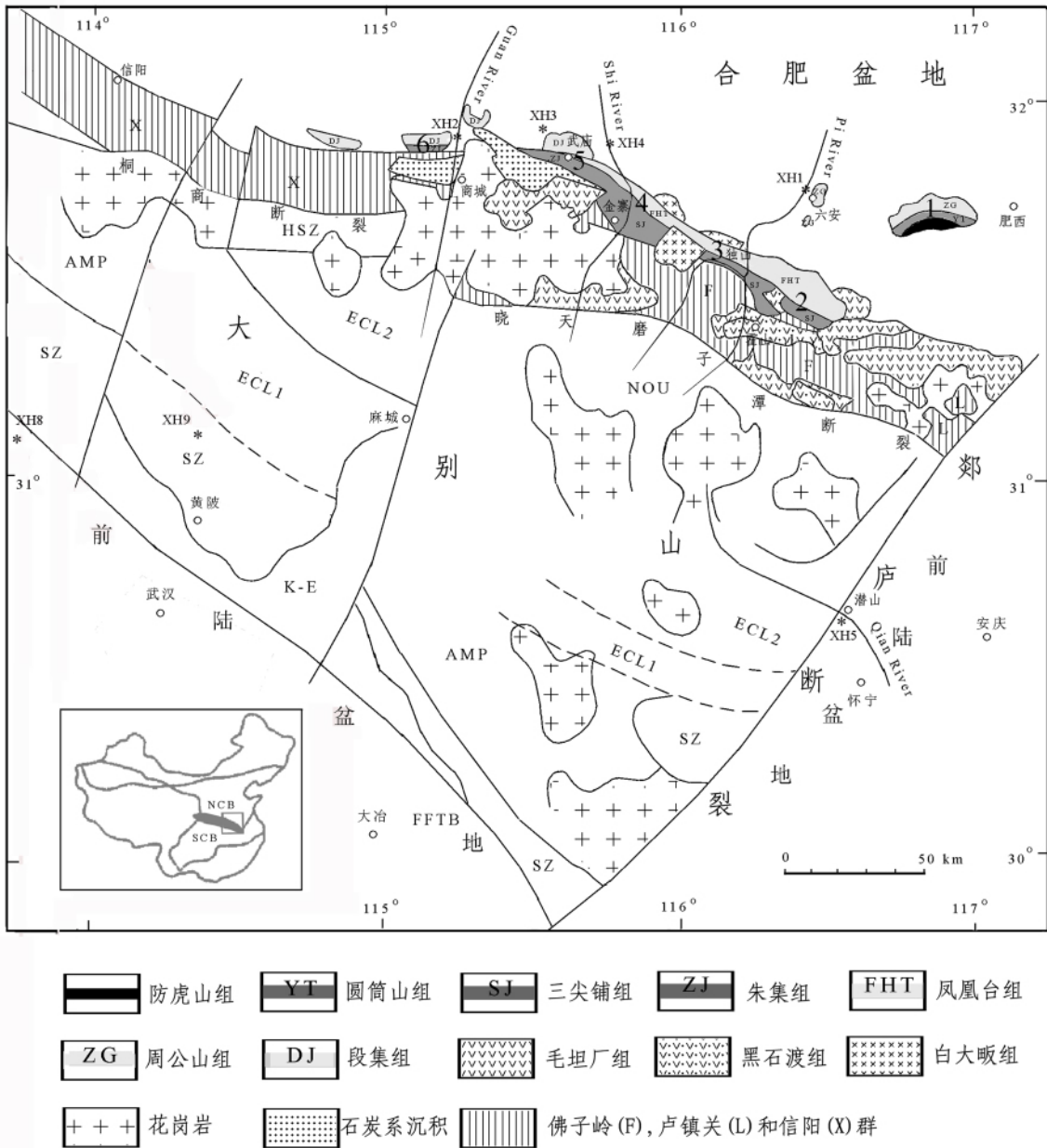


图1 大别山与周缘盆地地质简图

(根据文献43改编。有关大别山南缘前陆盆地地层出露细节,读者可参考文献19和43。)

AMP: 角闪岩带; ECL1: 含石英榴辉岩带; ECL2: 含柯石英榴辉岩带; F: 佛子岭群; FFTB: 前陆褶皱冲断带; HSZ: 浒湾剪切带;

K-E 白垩—第三纪地层; L: 卢镇关群; NOU: 北部正片麻岩带; SZ: 宿松蓝片岩带; X: 信阳群。

Fig. 1 Simplified geological map of the Dabie Shan and adjacent basins

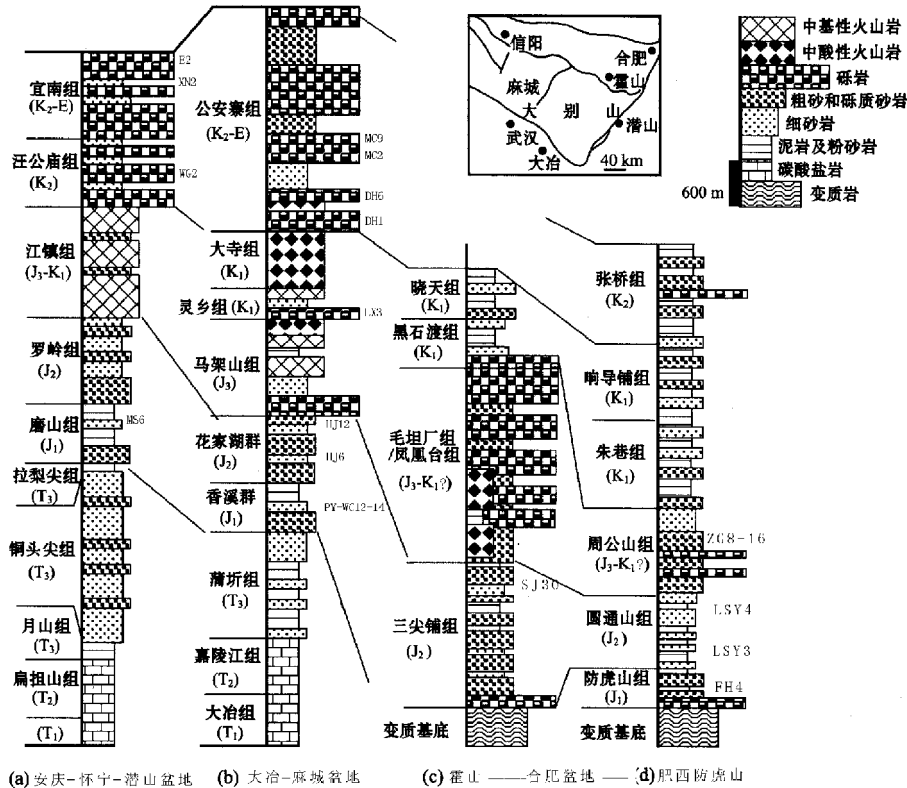


图 2 大别山周缘盆地地层格架 (取自文献 18)
 Fig. 2 Stratigraphy of the adjacent basins around Dabie Shan

白垩世江镇组 晚白垩世—古近纪汪公庙组和宜南组 (图 2)。黄马青群底部为厚度不等的砾岩,中、上部由紫色和灰紫色砂岩和页岩组成,属于河流—湖泊沉积。早侏罗世磨山组由灰白、灰黄色砂岩、页岩组成,底部夹厚度不等的砾岩、砂砾岩。中侏罗世罗岭组,厚度变化大,为紫红、灰紫色砂岩、钙质粉砂岩和粉砂质页岩,底部夹灰白色含砾粗砂岩或砾岩,与磨山组呈假整合触。江镇组—古近系地层为紫红色、棕红色厚层砾岩、砂砾岩和砂岩互层,为冲积扇和河流沉积。

1.2 大别山北缘石炭纪盆地

大别山北缘石炭系主要分布在河南商城地区 (图 1),是该区古生代唯一未变质或轻微变质的沉积地层,它的源区特征可以反映古生代时期大别造山带的面貌^[6]。地层从下往上包括花园墙组 (D₃?—C₁) 杨山组 (C₁) 道人冲组 (C₁₋₂) 胡油坊组 (C₂) 和杨小庄组 (C₂)。花园墙组是一套厚度超过 344 m 的河流相沉积,主要由中—粗粒的石英砂岩和泥岩、粉砂岩、砾岩夹层所组成。杨山组是一套含煤地层,厚度超过 288 m。它主要由砾岩 (砾石为石英岩)、石英砂岩夹泥岩、粉砂岩和煤层组成。杨山组含有三十多层煤,层厚约 1~2 m。道人冲组 (>344 m) 包括石

英砂岩和长石石英砂岩,夹砾岩 (砾石为石英岩)、粉砂岩和页岩。胡油坊组分布面积最大,厚度超过 770 m,它主要为长石砂岩 (有的含碎屑白云母和岩屑),此外,该组也包括砾岩、粉砂岩和泥岩。胡油坊组是在一个河流—湖泊环境下沉积的地层。杨小庄组由细砾岩、砂岩、粉砂岩、炭质页岩和煤层所组成。

2 分析方法

本文所报导的样品一般为砂质沉积物。样品被破碎和磨细至 80 目,经摇床分选、再经过多次精细淘洗获得重砂矿物;通过磁选,重砂矿物被分为强磁和弱磁部分;通过电磁选,弱磁性部分矿物被分为强电磁、弱电磁和无磁部分;最后,再通过精细清洗进一步把无磁部分矿物细分为轻的和重的两部分,对上述各部分重矿物进行镜下鉴定,并挑选石榴石,电气石, Cr-尖晶石等矿物。碎屑白云母是在样品被粉碎后淘洗,并经摇床分选,去除颗粒状矿物后在镜下挑选。本文采用电子微探针对碎屑石榴石、白云母,电气石和 Cr-尖晶石进行分析,仪器为中国科学院地质与地球物理所的 CAMECA SX 51 型电子探针仪和中国地质科学院矿床所的 JEOL JXA8800 型电子探针仪。

还对大别山北缘石炭系碎屑锆石进行了 U—Pb 年龄测定,采用中国地质科学院地质所的 SHRIM II 型仪器,选用标准为 SL13(其年龄为 572 Ma, U 含量 238×10^{-6}) 和 TEM(年龄为 417 Ma)。每五次样品分析后做一次标准(TEM),四次扫描。对老于 1 200 Ma 的锆石根据 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值计算年龄,但对比其年轻的锆石则采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值计算年龄^[6,40~43]。

3 结果和讨论

3.1 碎屑石榴石

在被用于物源分析的重矿物中,石榴石具有特殊的意义^[32,51~53],首先,它远比辉石和角闪石类矿物稳定,因而不易在风化、搬运、沉积和成岩作用过程中发生变化。在酸性介质参与的成岩作用过程中石榴石可能遭到破坏,但它也远较磷灰石稳定。此外,石榴石的化学组成比较复杂,它包括 6 个端元组分:镁铝石榴石、铁铝石榴石、锰铝石榴石、钙铝石榴石、钙铁石榴石和水钙铝石榴石,而且容易通过电子微探针技术获得分析资料进行物源分析。本文作者曾对合肥盆地碎屑石榴

石进行过研究,其结果不仅在地层对比上具有意义,而且可以揭露侏罗纪时期大别山源区岩石组成特征^[40]。例如,凤凰台和周公山组较高含量的镁铝石榴石指示它们可能来源于大别造山带高压—超高压的变质岩。该结果是大别山周缘盆地高压—超高压物源研究最早的报导。

3.1.1 现代沉积

本文对源于大别山的现代河流砂中的碎屑石榴石进行了取样(图 1),研究的目的在于从的现代源区—盆地系统的角度来了解碎屑石榴石用于源区分析的有效性。图 3 包括了大约 150 颗碎屑石榴石的分析资料。XH1—XH4 样品主要来源于大别山北缘佛子岭群和卢镇关群的绿片岩—角闪岩相带。该带是一套变质程度较低的岩石,包括变质砂岩和石英岩,云母石英片岩,石英片岩,石墨片岩和不同类型的片麻岩。此外,它们还可能来源于北大别正片麻岩相带(图 1 中 NOU),以及合肥盆地再循环沉积。XH5 物源主要为大别山超高压变质岩,即(图 1)中的含柯石英榴辉岩带(ECL2)。XH8 和 9 的物源则主要来自大

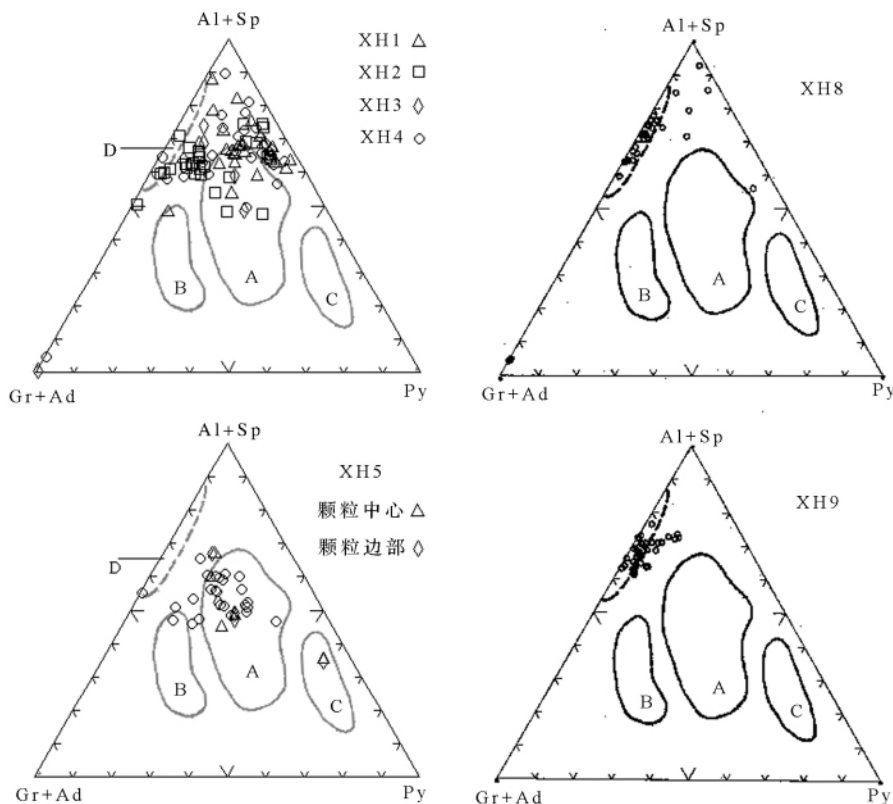


图 3 源于大别山的现代河流沉积中碎屑石榴石的化学组成

AL: 铁铝石榴石 Sp: 锰铝石榴石 Gr: 钙铝石榴石 Ad: 钙铁石榴石 Py: 镁铝石榴石。

图中 A 区为大别苏鲁地区产于片麻岩和超镁铁质岩的榴辉岩中的石榴石, B 区为产于大理岩的榴辉岩中的石榴石, C 区为产自碧溪岭和毛屋超镁铁质岩中的石榴石, D 区为产于片麻岩中的石榴石(分区根据文献 54)。样品 XH1-5, XH8-9 的位置见图 1。

Fig. 3 Chemical composition of the detrital garnets in the modern river sediments derived from the Dabie Shan

别山南部的宿松蓝片岩带(图 1 中 SZ)。我们从图 3 可以清楚地观察到来自上述不同构造岩石单元区的碎屑石榴石组成的差别。XH5 样品中的碎屑石榴石集中分布在 A 区,具有大别—苏鲁地区产于片麻岩和超镁铁质岩中榴辉岩的石榴石的化学组成^[54]。XH8 和 XH9 样品中碎屑石榴石的分布也很集中,主要在 D 区。XH1—XH4 中碎屑石榴石的分布范围较宽,但是仅和 XH5, XH8 和 XH9 部分重迭。XH1—XH4 的物源是比较复杂的,北大别片麻岩相带中还产出有高压—超高压变质的岩石^[3],这应是造成碎屑石榴石组成相对复杂的原因。根据上述我们可以

得出结论,源于大别山的现代河流沉积的碎屑石榴石可以有效地指示源区岩石的组成。将今比古,我们可以利用所得结果去研究中—新生代时期大别山周缘盆地沉积的源区特征。

3.1.2 大别山东—南缘前陆盆地

我们在大别山南缘大冶—麻城盆地的五个样品中分离出了碎屑石榴石。它们分别为花家湖群(中侏罗世 J₂) 顶部的 hj12,灵乡组(早白垩世 K₁) 的 Lx3,公安寨组(晚白垩世—古近纪 K₂—E) 的 dh6、mc2 和 mc9,其微电子探针分析结果如图 4。hj12 碎屑石榴石组成的特征是钙铝榴石(Gr) 含量很低,与

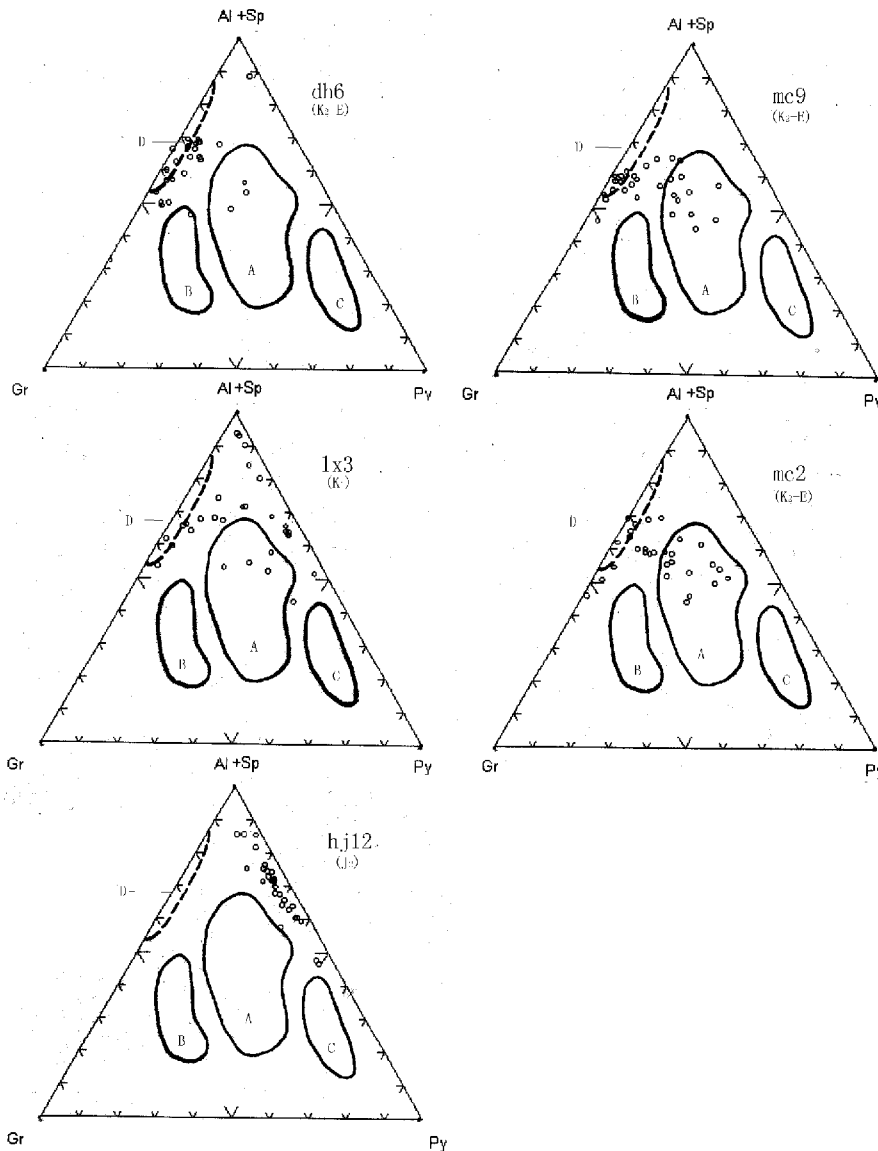


图 4 大别山南缘大冶—麻城盆地中碎屑石榴石的化学组成(图中说明见图 3 样品产出位置见图 2。钙铁榴石含量包括在 Gr 的计算中。)

Fig. 4 Chemical composition of the detrital garnets in the Daye-Macheng Basin located in the southern margin of Dabie Shan

合肥盆地侏罗纪时期来自大别山源区的碎屑石榴石组成具有明显的差别^[40,43],也与大别山周缘盆地现代沉积有明显差别(图3),因此它们的物源不应相同。hj12样品的碎屑石榴石可能有两种来源,一是侏罗纪时期南部的大别山,但该类源岩已被剥蚀。此外,它们也可能来源于华南褶皱带。Grimmer等在大别山东南缘前陆盆地侏罗纪沉积中也发现过来自华南褶皱带的碎屑石榴石^[44]。较之hj12,灵乡组(K₁)样品Lx3的碎屑石榴石组成发生了明显变化。Lx3碎屑石榴石的组成更加复杂,大约20%的颗粒落在大别山高压—超高压变质岩物源的范围(图4中A)。这种变化延续至公安寨组(K₂—E)的样品。在mc2和mc9中落入A区的碎屑石榴石的比例高至50%~60%。值得注意的是灵乡组和公安寨组碎屑石榴石的组成与合肥盆地三尖铺组—凤凰台组和圆筒山组—周公山组相似。因此,我们可以合理地推测,从灵乡组至公安寨组时期(K₁至K₂—E),高压—超高压变质岩才逐渐成为南部大别山重要的岩石构成单元,并向大冶—麻城盆地提供物源;但是,在侏罗纪时期它们主要分布在大别山北缘盆地的源区^[43]。

我们仅在安庆—怀宁—潜山盆地宜南组(K₂—E)的两个样品(E2和XN2)中获得了碎屑石榴石组分。它们的化学组成与大冶—麻城盆地中公安寨组的mc2和mc9相似(图5),分布于A区的样品从大约30%(E2)至70%(XN2)。因此,在宜南组和公安寨组沉积时期它们的物源相似,高压—超高压变质岩是重要的岩石类型。

3.2 碎屑 K-白云母

对二八面体式富钾白云母, Si + (Mg, Fe)可取代八面体位置的Al。当每分子单位(p. f. u.)中Si含量明显超过3.0时(O=11,水不参加计算)它被称做多硅白云母。Si + (Mg, Fe)对Al取代的程度主要取决于变质作用中的压力。因此,多硅白云母可作为高压—超高压变质作用的指示矿物^[55,56],并被用于物源研究。例如, Von Eynatten和Gaupp提出东阿尔卑斯白垩纪同造山期砂岩碎屑白云母Si大于3.3(p. f. u.)时指示它们来源于高压变质岩的物源^[57]。本文作者对合肥盆地侏罗系防虎山组、三尖铺组、周公山组和凤凰台组的碎屑白云母进行过研究,发现它们几乎都为多硅白云母, Si原子数多从3.3至3.6(p. f. u.)。合肥盆地中碎屑多硅白云母的发现表明在侏罗纪,甚至早侏罗世防虎山组沉积时期由扬子大陆深俯冲折返的高压—超高压变质岩已经成为合肥盆地

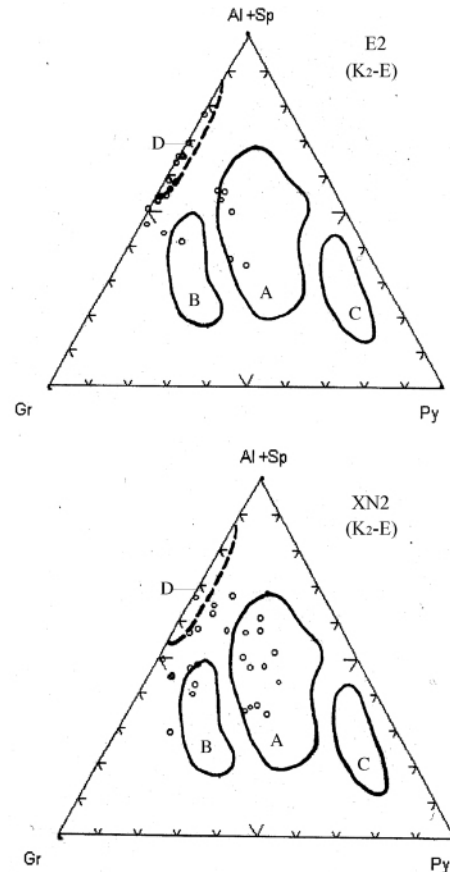


图5 大别山东缘安庆—怀宁—潜山盆地中碎屑石榴石的化学组成(图中说明见图3,样品产出位置见图2。钙铁榴石含量包括在Gr的计算中。)

Fig. 5 Chemical composition of the detrital garnets in the Anqing-Huaining-Qianshan Basin located in the eastern margin of Dabie Shan

的重要物源^[41]。Grimmer等对红安—大别山东—南缘前陆三叠—侏罗系沉积的碎屑白云母进行了研究,从此估算红安—大别山大约可以提供50%~80%的物源^[44]。

3.2.1 现代沉积

为了进一步考查碎屑 K-白云母用于源区分析的有效性,作者曾经对源于大别山的若干现代沉积进行过研究^[43]。图6中XH8和XH9为本文新提供的结果。我们将碎屑 K-白云母分成三类,即低含量(Si < 3.3 p. f. u.),中等 Si 含量(Si = 3.3 ~ 3.5 p. f. u.)和高 Si 含量(Si > 3.5 p. f. u.)^[44]。从图6我们可以清楚地观察到来自大别山不同构造岩石单元的碎屑白云母化学组成的差别。主要来源于超高压变质岩带(ECL2)的样品XH5都由多硅白云母组成,

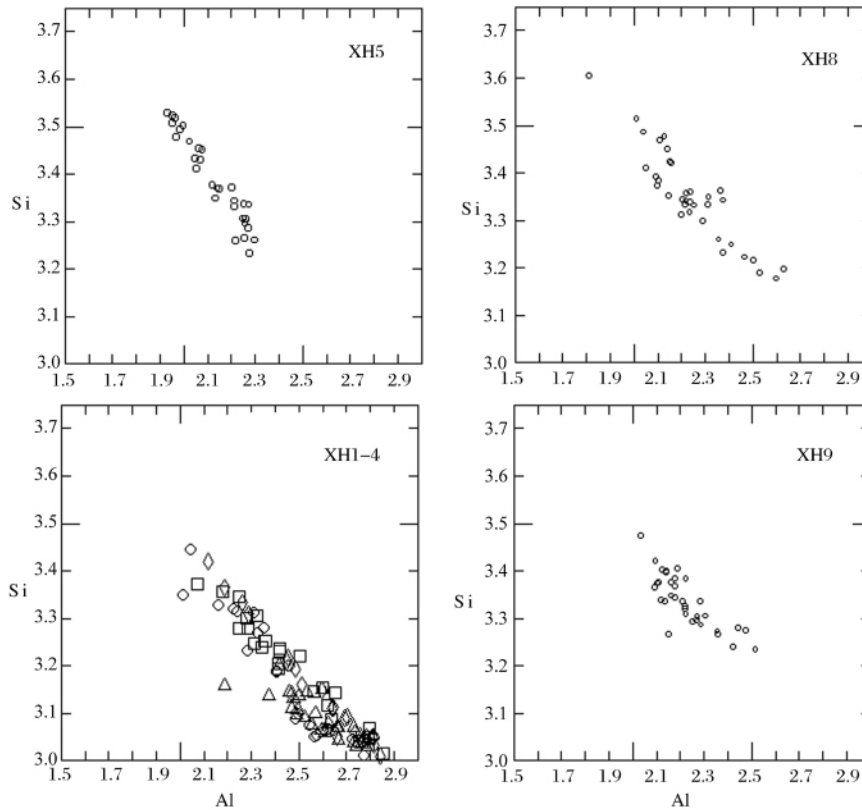


图 6 源于大别山的现代河流沉积中碎屑 K-白云母 Al—Si 含量图

Fig. 6 Si vs. Al diagrams of the detrital K-white micas in the modern river sediments derived from Dabie Shan

中等和高 Si 含量的 K-白云母大约占 70%。主要来源于高压变质岩带(SZ)的样品 XH8 和 XH9 也都由多硅白云母组成,中等和高 Si 含量的大约占 50%~60%。样品 XH1—XH4 的物源主要为大别山北缘相对低变质程度的岩石,它们的碎屑 K-白云母则主要为低 Si 含量的类型,约占 90%。从上述对比,如同前节中叙述的碎屑石榴石,碎屑白云母组成也是一个源区分析的有效指标,我们可以利用它来研究大别山周缘侏罗纪—古近纪沉积。

3.2.2 大别山东—南缘前陆盆地

我们在大冶—麻城盆地 7 个样品中获得了碎屑 K-白云母,它们分别是香溪群(J_1)的 PY-WC12, PY-WC14, 花家湖群(J_2)的 HJ6, HJ12, 公安寨组(K_2 —E)的 DH1, MC2 和 MC9(图 2)。对每个样品随机分析 25 粒,其结果列于图 7。PY-WC12 中的 K-白云母完全为低 Si 含量的类型,而且都小于 3.2 (p. f. u.)。HJ12 和 DH1 也主要含由低 Si 含量的 K-白云母组成,约占 80%以上,MC9 中低 Si 含量 K-白云母约为 60%。HJ6 和 MC2 的 K-白云母以中等 Si 含量类型为主,约占 60%。在分析的 7 个样品中,我们未发现

高 Si 含量的颗粒。Grmmer 等人报导过大别山南缘三个样品碎屑白云母的化学组成^[44],取自中侏罗世的 Y129 完全为低 Si 含量类型, Y134 (J_2) 主要为中等 Si 含量的类型, Y124 (J_{1-2}) 也主要由中等 Si 含量类型组成,但是含高 Si 含量的颗粒。从早侏罗世 (PY-WC12, PY-WC14 和 Y124), 中侏罗世 (HJ6, HJ12, Y129 和 Y134), 至晚白垩世—古近纪 (DH1, MC2 和 MC9), 碎屑 K-白云母组成的差别表明源区岩石组成发生过明显的变化,在早—中侏罗世(例如 PY-WC12, HJ12 沉积时期),大别山南缘盆地源区主要由相对低变质程度的岩石所构成,在 HJ6 和 MC2 沉积时期,高压变质岩有可能成为源区的重要组成。

在安庆—怀宁—潜山盆地我们获得了四个样品碎屑白云母组成的资料(图 7),它们分别为磨山组(J_1)的 MS6, 汪公庙组(K_2)的 WG2, 宜南组(K_2 —E)的 XN2 和 E2(图 2)。与大别山南缘大冶—麻城盆地侏罗纪样品 PY-WC12, PY-WC14, HJ6 和 HJ12 比较, MS6 样品中等 Si 含量类型的碎屑 K-白云母更丰富,约占 70%,此外还产出有高 Si 含量类型。WG2 主要由低 Si 和中等 Si 含量的类型所组成,也含有高 Si 含

量的颗粒。样品 XN2 和 E2 主要为低 Si 含量类型的碎屑 K-白云母, 约占 50% ~ 70%。根据上述资料我们可以推测从侏罗纪至晚白垩世—古近纪大别山东缘盆地沉积物源也是比较复杂的, 它反映了源区岩石组成的多样性, 既包括相对低级变质的, 也可能包括高压变质的岩石。此外, 高 Si 含量类型的碎屑 K-白云母(例如 MS6, WG2) 指示源区可能包含有超高压变质岩的组成。

侏罗纪时期大别山东—南缘盆地的碎屑 K-白云母组成与北缘合肥盆地有明显的差别^[41, 43]。合肥盆地肥西—霍山—独山—金寨地区, 半数样品中高 Si 含量的类型大约占 20% 至 40% ~ 45%。上述差别反映源区的岩石组成在古地理分布上存在明显的变化, 即高压和超高压变质岩主要分布在北大别山的东侧, 并向合肥盆地提供重要物源。人们对大别山超高压岩石如何折返的机制存在分歧^[3]。岩石和构造学家若关注大别山岩石古地理分布的面貌, 有可能从中获得帮助去做出正确的选择。

3.3 碎屑电气石

电气石是变质岩和花岗岩等类岩石中常见的副矿物。在 Al—全 Fe—Mg 和 Ca—全 Fe—Mg 三组分图中不同变质岩和花岗岩类的电气石具有特征的化学组成。因此, 它成为岩石成因的标志矿物^[58]。电气石是碎屑沉积岩中最稳定的重矿物, 其化学组成已被广泛用于物源分析^[57, 59, 60], 包括大别山北缘石炭系沉积^[61]。

3.3.1 现代沉积

迄今, 我们在大别山周缘中—新生代沉积盆地中还未见有任何有关碎屑电气石用于源区分析的报导, 为了了解其应用潜力, 我们首先研究现代沉积中的碎屑电气石。图 8 为源于大别山的现代河流沉积碎屑电气石的 Al—全 Fe—Mg 三组份图, 在北缘(XH1—XH4) 碎屑电气石分布于 B, D, E 和 F 区, 指示它们分别来源于贫 Li 花岗岩类的岩石(B 区), 富 Al 的变质泥岩和变质砂岩(D 区), 贫 Al 的变质泥岩和变质砂岩(E 区), 以及富 Fe³⁺ 石英电气石岩, 或 Ca-硅酸盐岩, 变质泥岩(F 区)。这种复杂的组成与北部大别山众多的岩石类型(花岗岩和不同类型的变质岩)有良好的对应关系(图 1), 表明碎屑电气石可以有效地指示物源区的岩石组成。XH5 样品中碎屑电气石的化学组成比较单一, 集中分布在贫 Al 的变质泥岩和变质砂岩区(图 8 E)。此外, 与 XH1—XH4 比较, 它相对更富 Mg。XH5 的物源主要为大别山超高压变

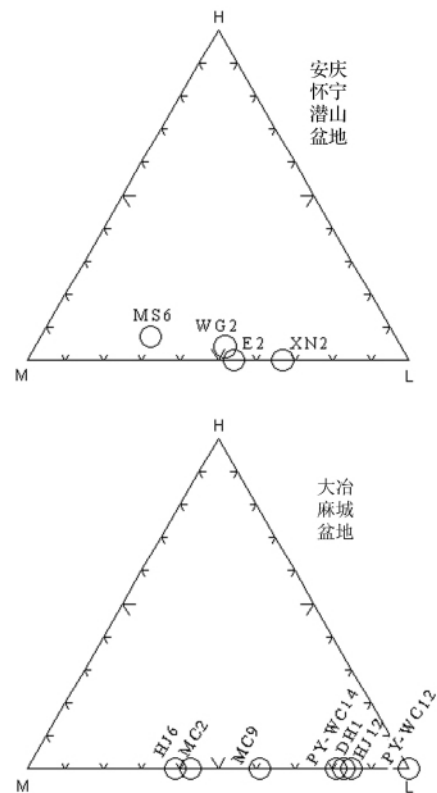


图7 大别山东—南缘盆地碎屑 K-白云母中的 Si 的含量
H: 高 Si 含量云母, Si 原子数 > 3.5 (p. f. u.); M: 中等 Si 含量云母, Si 原子数 = 3.3 - 3.5 (p. f. u.); L: 低 Si 含量云母, Si 原子数 < 3.3 (p. f. u.)。
Fig. 7 Si contents of the detrital K-white micas in the sedimentary basins located in the south-eastern margin of Dabie Shan

质岩(图 1), 因此富 Mg, 贫 Al 的电气石可能为超高压岩石的一个鉴别特征。虽然我们现在缺乏有关大别山超高压变质岩中电气石的资料, 但是电气石可以在各种级别的变质作用中生成^[58], 文献中也有高压—超高压变质岩产出电气石的报导^[61-63]。在取自大别山南部、主要来源于高压变质岩的河流砂样品 XH9 中, 电气石的分布也主要集中在贫 Al 变质泥岩和变质砂岩区(图 8 E)。此外, 大约半数的颗粒与 XH5 相似, 也相对富 Mg。XH—XH4 样品有部分电气石的化学组成与 XH5 和 XH8 类似, 它们也可能来自北大别的高压—超高压变质岩。在北大别现代河流沉积的碎屑石榴石中我们可以观察到类似的现象(见 4.1.1)

3.3.2 合肥盆地

大别山周缘现代河流沉积的研究结果表明碎屑电气石化学组成, 不仅可以用于常规的物源分析^[58], 而且还可能指示高压—超高压变质岩的物源, 本节将利用这些成果研究合肥盆地侏罗系沉积的源区。图 9

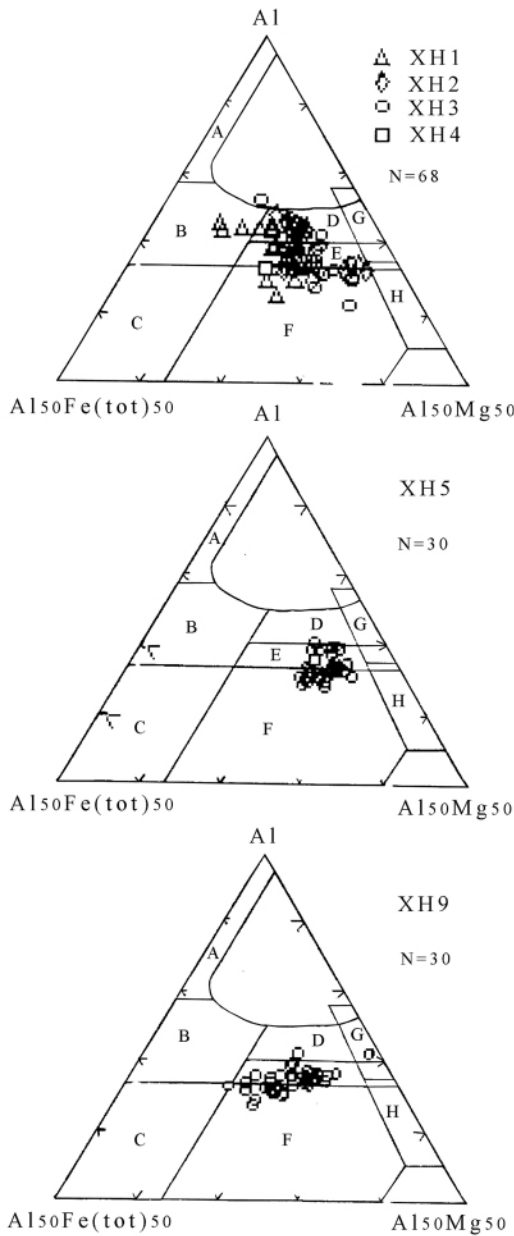


图 8 源于大别山的现代河流沉积中碎屑电气石 Al—全 Fe—Mg 三组份图

A: 富 Li 花岗岩, 伟晶岩, 细晶岩; B: 贫 Li 花岗岩, 伟晶岩, 细晶岩; C: 水热蚀变花岗岩; D: 富 Al 变泥岩和变砂岩; E: 贫 Al 变泥岩和变砂岩; F: 富 Fe³⁺ 石英—电气石岩, Ca-硅酸盐岩, 变泥岩; G: 低 Ca 变超基性岩, 富 Cr, V 的变质沉积岩; H: 变碳酸盐岩, 变辉石岩。图中岩石成因分区根据文献 58, 60。N 代表分析数量(粒)

Fig. 8 Al—total Fe—Mg diagrams of the detrital tourmalines in the modern river sediments derived from the Dabie Shan

M39) 和段集组 (M36, 37) 分离出的碎屑电气石的分析资料。在防虎山地区, 从 FH4, LSY3, LSY4 至 ZG8-16 碎屑电气石主要分布在 F 区, 其次 E 区, 反映侏罗纪时期其源区主要由贫 Al 变质泥岩和变质砂岩, 富 Fe³⁺ + 石英—电气石岩, 或 Ca-硅酸盐岩, 或变质泥岩组成。此外, 源区岩石还包括富 Al 变质泥岩和变质砂岩 (图 9 D 区), 贫 Li 花岗岩 (B 区)。霍山地区三尖铺组样品 (SJ30) 的电气石组成与防虎山地区类似, 也主要分布在 E 和 F 区。此外, 分布在 C 区的一粒电气石指示其源区还存在蚀变花岗岩。在防虎山和霍山地区侏罗纪沉积岩样品中含有贫 Al 和富 Mg 的碎屑电气石, 综合石榴石和多硅白云母的研究结果 (本文和文献 40, 41, 43), 这类电气石可能指示高压—超高压变质岩的物源。大别山北缘商城地区侏罗纪沉积岩中电气石的化学组成更加复杂, 指示除分布于图 9 中 D, E 和 F 区的岩石外, 贫 Li 花岗岩类的岩石 (B 区) 也是源区重要岩石类型。

3.4 碎屑 Cr 尖晶石

由于碎屑 Cr 尖晶石在沉积岩中含量低, 本文作者未在大别山周缘侏罗纪沉积岩中分离出此类重矿物。但是, 大别山北缘商城地区石炭系胡油坊组 (图 1) 的两个砂岩样品 M6 和 M10 中含碎屑 Cr 尖晶石。有关胡油坊组地层的分布和取样位置见文献 4 和 6。M6 和 M10 中碎屑 Cr 尖晶石 Cr₂O₃ 的含量从 31.20% 至 65.04%; TiO₂ 含量从 0.00 至 1.25%, 但绝大多数含量 < 0.5%; Cr/(Cr + Al) 比值范围从 0.43 至 0.90; 绝大多数颗粒的 Mg/(Mg + Fe²⁺) 比值从 0.20 至 0.75, Fe³⁺/(Cr + Al + Fe³⁺) 比值小于 0.12。图 10 表示 M6 和 M10 样品中碎屑 Cr 尖晶石的若干化学组成。

碎屑 Cr 尖晶石不仅可以指示物源区存在基性—超基性岩石 [64], 而且其矿物化学组成还被用于判别该类岩石形成的构造环境 [64-67]。Hisada 报导过日本下白垩统陆源碎屑岩中 Cr 尖晶石化学组成的资料 [67]。在位于四国 Kochi 城附近的 Konomori 地区, Nagashiba 组地层中的碎屑 Cr 尖晶石 Cr/(Cr + Al) 比值从 0.6 至 0.9, 它们 TiO₂ 的含量低于 0.5%。在位于东京西约 80 km 的 Sanchu 地区, Sanchu 统地层中有两类碎屑 Cr 尖晶石, 即低 Ti 和高 Ti 含量类型。前者 TiO₂ 含量从 0.0 至 0.5%, Cr/(Cr + Al) 比值从 0.39 至 0.97。Sanchu 统地层中低 Ti 含量型碎屑 Cr 尖晶石与 Sanchu 蛇纹岩中 Cr 尖晶石的化学组成十分相似。Sanchu 蛇纹岩的原岩橄榄岩, 为岛弧成因,

展示了在防虎山组 (FH4), 园筒山组 (LSY3, LSY4), 周公山组 (ZG8-16), 三尖铺组 (SJ30), 朱集组 (M31),

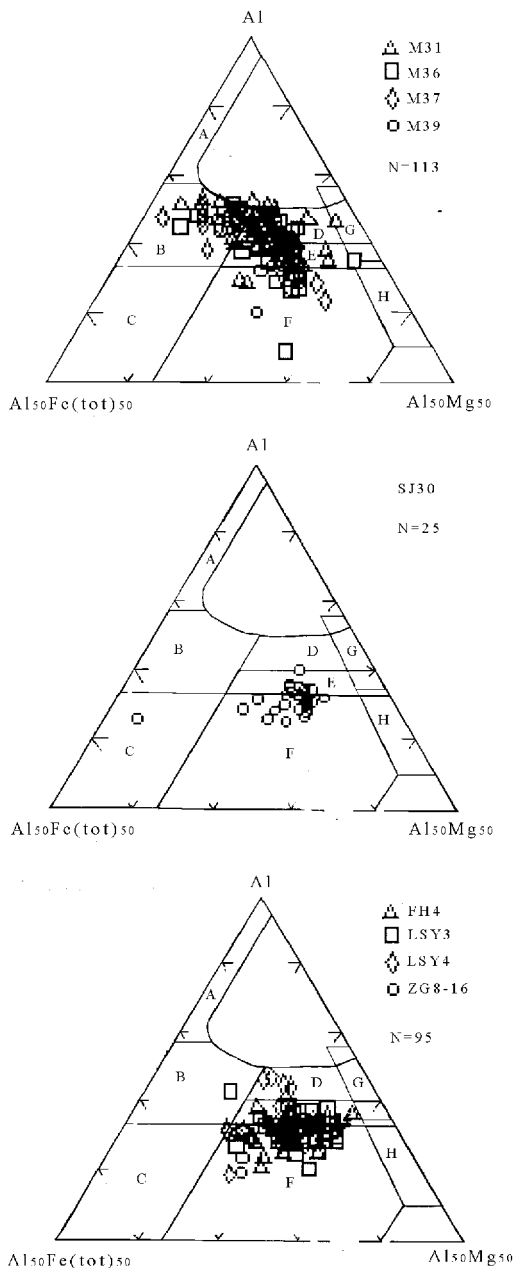


图9 合肥盆地侏罗系碎屑电气石的化学组成
(图中分区的含义见图8说明)

Fig. 9 Chemical composition of the detrital tourmalines
in the Jurassic sediments of Hefei Basin

所含尖晶石的 $Cr/(Cr + Al)$ 比值范围宽, TiO_2 含量低。因此, Hisada 认为 Nagashiba 组和 Sanchu 统地层中低 Ti 的 Cr 尖晶石可能为弧前环境形成的橄榄岩的碎屑^[67]。为了确定泰国 Phetchabun 地区已被剥蚀的基性—超基性岩的岩石学特征, Chutakositkanon 研究了二叠系 Nam Duk 组地层中的碎屑 Cr-尖晶石^[64]。它们的 Cr 含量相当高, $Cr/(Cr + Al)$ 比值大

多高于 0.50, 甚至高达 0.83。 TiO_2 的含量从 0.02 至 1.16%, 但是一般低于 0.60%。 Chutakositkanon 认为 Nam Duk 组碎屑 Cr-尖晶石相对高的 $Cr/(Cr + Al)$ 比值和低的 TiO_2 含量指示其来源于岛弧成因的基性—超基性岩。大别山北缘胡油坊组大多数碎屑 Cr-尖晶石的化学组成与日本 Nagashiba 组和低 Ti 型 Sanchu 统相似, 它们也与泰国 Nam Duk 组地层中碎屑 Cr-尖晶石化学组成相似(图 10 中上图), 因此我们推测它们也应来源于岩浆弧构造环境的岩石。英属哥伦比亚北部侏罗—白垩纪 Bowser 盆地中的碎屑 Cr-尖晶石 $Cr/(Cr + Al)$ 比值从 0.21 到 0.89, $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 比值从 0.24 至 0.70, $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al + Cr)$ 比值低于 0.12^[66]。 Cookenboo 等认为 Bowser 盆地中碎屑 Cr-尖晶石来源于与边缘海和岛弧环境相关的阿尔卑斯型(Alpine-type) 橄榄岩。大别山北缘胡油坊组 M6 和 M10 中碎屑 Cr-尖晶石的化学组成与 Bowser 盆地的相似(图 10, 下图), 也指示它们可能来源于弧岛环境的岩石。本文作者曾对商城地区石炭系沉积岩进行过微量元素的研究^[6], 其 $La-Th-Sc$ 和 $Th-Sc-Zr/10$ 的比值强烈指示它们的源区为大陆岛弧的构造环境。此外, 胡油坊组样品 M6 中碎屑锆石的年龄结构与秦岭群和二郎坪群高度相似, 表明与后者相似的岩石是石炭纪时期大别山北缘沉积盆地重要的物源^[6], 而秦岭群和二郎坪群形成于北秦岭的岩浆弧^[5]。因此, 微量元素和碎屑锆石与本文 Cr-尖晶石的研究结果相一致。

3.5 碎屑锆石

碎屑锆石是沉积岩中最稳定的的一个副矿物, 其年龄结构不受岩石在沉积循环中各种分馏作用的影响, 因此成为物源分析一个新的有效工具^[35-38]。本文作者曾对大别山北缘中石炭统胡油坊组的碎屑锆石进行过 U—Pb 年龄的研究^[6], 本文将补充下石炭统花园墙组顶部地层样品(M80)的分析资料(图 11)。M80 样品碎屑锆石的年龄范围很宽, 从早石炭世至古元古代, 指示其物源的组成是相当复杂的。但是, 它们主要由两组年龄组成, 一组从奥陶纪至泥盆纪, 峰值为 400~450 Ma, 大约占所分析颗粒的 30%。另一组年龄为新元古代, 大约占 20%。为了比较, 图 11 还包括已发表的石炭系胡油坊组碎屑锆石的年龄资料(图 11 中 M70 和 M6)。我们可以发现它们的年龄结构十分相似。M70 和 M6 也主要由奥陶纪—泥盆纪和新元古代两组年龄组成。本文作者在文献 6 中讨论过这两组年龄的构造意义。华北大陆南缘在

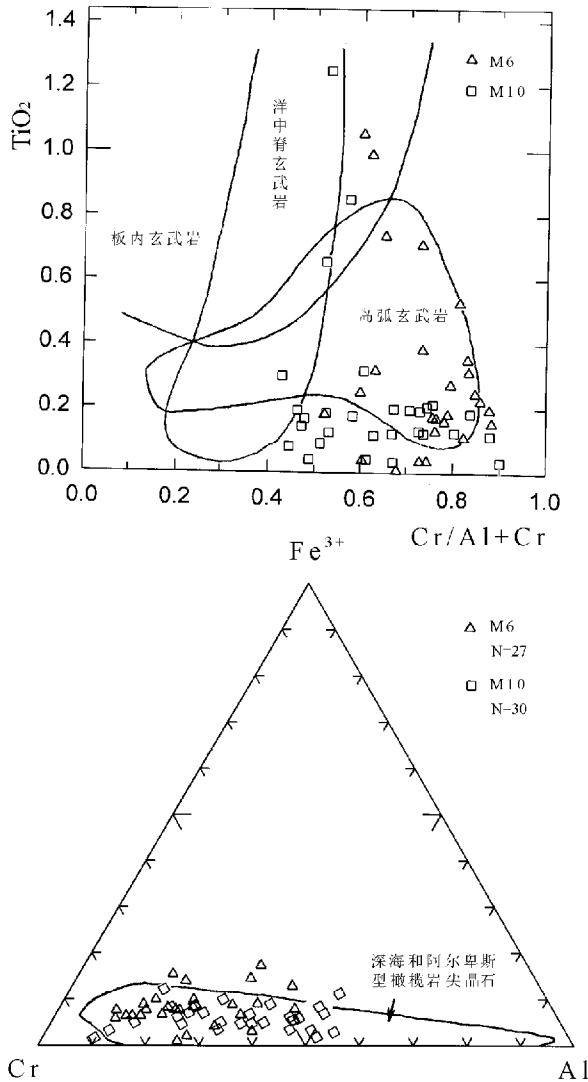


图 10 大别山北缘石炭系碎屑 Cr-尖晶石化学组成
 上图: TiO_2 (wt%) - $Cr/(Cr + Al)$ 构造分区根据文献 64-65;
 下图: $Fe^{3+} - Cr - Al$ 构造分区根据文献 66。

Fig. 10 Chemical composition of the detrital Cr-spinel in the Carboniferous sediments of the northern margin of Dabie Shan

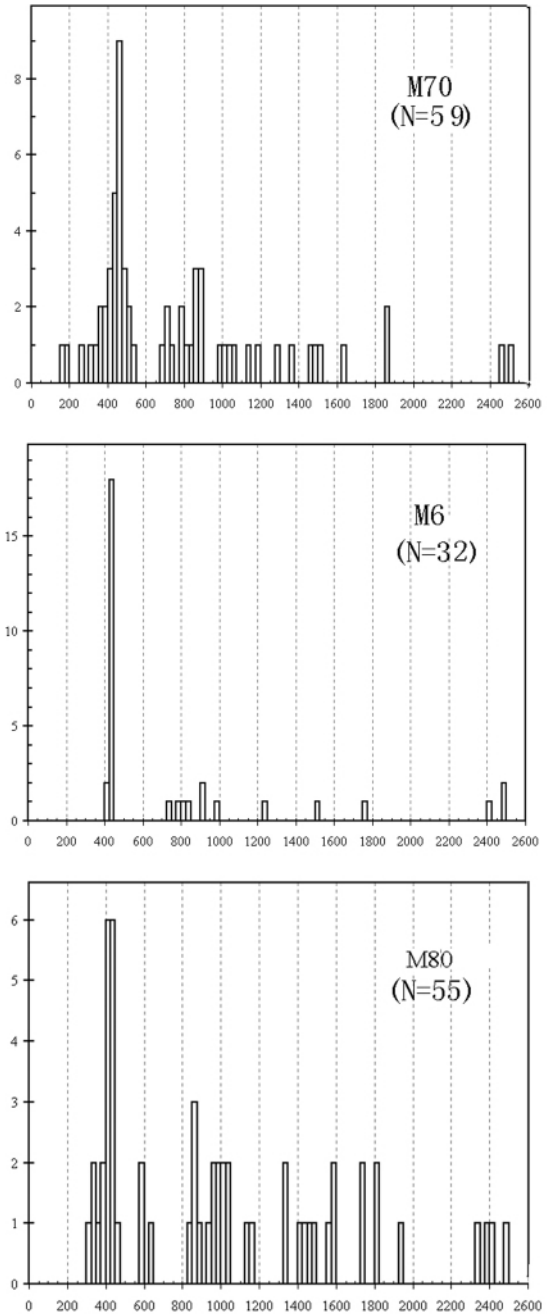


图 11 大别山北缘石炭系沉积岩中碎屑锆石 SHRIMP 年龄频谱 (M6 和 M70 引自文献: [6])
 年龄间隔 25 Ma; 大于 1 200 Ma 的年龄值根据 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 计算, 小于 1 200 Ma 的年龄值根据 $^{206}Pb/^{238}U$ 计算。
 Fig. 11 Histograms of detrital zircon SHRIMP ages for the Carboniferous sedimentary rocks with a plotting increment of 25 Ma. Ages greater than 1 200 Ma are calculated using $^{207}Pb/^{206}Pb$ ratios and ages less than 1 200 Ma are calculated from $^{206}Pb/^{238}U$ ratios

早古生代时期为一活动大陆边缘,其代表性地层秦岭群和二郎坪群变质岩锆石年龄的范围从奥陶纪至泥盆纪。它们与大别山北缘石炭系沉积岩中碎屑锆石年龄值(包括本文样品 M80)相一致,表明与其相关的地层从早石炭世开始已经成为大别山北缘沉积盆地的主要物源。从此可以推测早古生代时期的大别造山带与秦岭地区应属于同一个岛弧体系,经历过相似的构造演化。华北大陆南缘缺乏相当于新元古代年龄的岩浆和变质岩地层。但是,扬子陆块由于遭受了四堡运动和晋宁—澄江运动热事件的影响,普遍发

育新元古代的岩浆和变质地层,新元古代锆石的年龄

成为扬子陆块的鉴定特征^[1, 39, 44]。大别山北缘石炭系地层中相当数量新元古代年龄碎屑锆石的发现,表明需要一个扬子大陆,或者与其物质组成属性相当的陆块在早古生代时期与华北大陆发生对接的构造模式^[6]。

4 结论

单颗粒碎屑矿物研究已经成为物源分析的一个重要手段。本文将其应用于大别山周缘盆地,获得了如下新的研究成果。(1) 源于现今大别山不同构造岩石单元河流沉积中的碎屑石榴石、K-白云母和电气石具有特征的化学组成,它们可以作为研究古大别山区岩石组成的标志。例如,分布于 Al + Sp—Gr + Ad—Py 三组分图 A、B、C 区中的石榴石,多 Si 的白云母(Si 原子数大于 3.3 p. f. u.) ,富 Mg 的电气石可以指示高压—超高压类型变质岩物源。(2) 碎屑石榴石化学组成指示高压—超高压岩石在晚白垩世—古近纪是大别山东南缘盆地重要的物源。(3) 碎屑多硅白云母的研究结果表明除个别样品外,侏罗纪时期大别山东南缘盆地现存沉积的源区主要由相对低变质程度的岩石所构成。(4) 侏罗纪时期富 Mg 的碎屑电气石主要分布在大别山北缘的盆地(例如霍山—防虎山地区)。再综合本节(2)、(3)和已发表的成果,所有物源分析都指示虽然高压—超高压变质岩在侏罗纪时期可能在大别山东南缘盆地的源区有分布,但它们主要分布于大别山北缘盆地的源区。此外,碎屑电气石的化学组成还指示大别山北缘(往西)商城地区盆地在侏罗纪时期存在相当数量贫 Li 花岗岩的物源。(5) 大别山北缘石炭纪盆地中碎屑 Cr-尖晶石的化学组成表明其源区的岩石可能形成于大陆岛弧的构造环境。(6) 大别山北缘早石炭世碎屑锆石主要由奥陶纪—泥盆纪和新元古代两组 U—Pb 年龄组成,前者指示物源为类似华北大陆南缘的秦岭和二郎坪群的岩石,后者指示物源为扬子(或类似属性的)大陆,因此需要构建一个两大陆对接的模式。

致谢 李忠、江茂生、孟庆任、李双应和金福全参加了本文的工作,孙枢曾对本文的工作给予支持,也感谢审稿者宝贵意见。

参考文献(References)

1 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-

Early Jurassic tectonic unroofing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105B: 13339-13364

- 2 Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, *et al.* Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east-central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 13303-13338
- 3 Wang Qingchen, Shi Yonghane, Lin Wei, *et al.* Exhumation of the Dabie UHP Terrane, China [J]. *International Geology Review*, 2008, 50: 15-31
- 4 李任伟, 孟庆任, 李双应. 大别山及邻区侏罗和石炭纪时期盆-山耦合: 来自沉积记录的认识 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1133-1143 [Li Rewei, Meng Qingren, Li Shuangying. Coupling of the Jurassic and Carboniferous basins with the orogens in the Dabie Shan and adjacent area: constraints from sedimentary record [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2005, 21(4): 1133-1143]
- 5 Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation [J]. *Geology*, 1999, 27: 123-126
- 6 Li R, Li S, Jin F, *et al.* Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonic significance: constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircon [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166: 245-264
- 7 Pettijohn F J. *Sedimentary Rocks*. Third Edition [M]. New York: Harper and Row, 1975: 483-508
- 8 Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone*, Second Edition [M]. New York: Springer-Verlag, 1987: 251-273
- 9 Dickinson W R, Suczek C. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63: 2164-2182
- 10 Dickinson W R. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins [C] // Kleinspehn K L, Paola C, eds. *Basin Analysis*. New York: Springer-Verlag, New York, 1988: 3-25
- 11 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone [J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 611-627
- 12 Bhatia M R, Crook A W. Trace elements characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181-193
- 13 Roser B P & Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio [J]. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635-650
- 14 McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T *et al.* Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2015-2050
- 15 Ravnas R, Furnes H. The use of geochemical data in determining the provenance and tectonic setting of ancient sedimentary successions: the Kalvag Melnges, western Norwegian Caledonides [C] // Guy Plint A, ed. *Sedimentary Facies Analysis: A tribute to the Research and Teaching of the Harold G. Reading*. Special Publication Number 22 of the IAS. Oxford, London: Blackwell Science, 1995, 237-264

- 16 李忠, 李任伟, 孙枢, 等. 合肥盆地南部侏罗系砂岩碎屑组分及物源构造属性[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 438-445 [Li Zhong, Li Renwei, Sun Shu, et al. Detrital composition and provenance tectonic attributes of Jurassic sandstones, south Hefei basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 438-445]
- 17 李忠, 孙枢, 李任伟, 等. 合肥盆地充填序列及其对大别造山作用的指示[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(3): 256-263 [Li Zhong, Sun Shu, Li Renwei, et al. Mesozoic fill-sequences in Hefei Basin: implication for Darbie orogenesis, central China [J]. Science in China: Series D, 2001, 44(1): 52-63]
- 18 李忠, 李任伟, 孙枢. 大别山中生代构造演化: 来自盆地充填记录的启示[J]. 地质通报, 2002, 21(8-9): 547-553 [Li Zhong, Li Renwei, Sun Shu. Mesozoic tectonic evolution of the Dabie Mountains: Evidence from basin-fill records [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(8-9): 547-553]
- 19 李忠, 李任伟, 孙枢, 等. 大别山南麓中生代盆地充填记录对造山作用属性的反映[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(6): 449-478 [Li Zhong, Li Renwei, Sun Shu, et al. Mesozoic basin-fill records in south foot of Dabie Mountains: Implication for Dabie orogenic attributes [J]. Science in China: Series D, 2003, 46: 217-230]
- 20 Zhong Li, Renwei Li, Shu Sun, Qingchen Wang. Jurassic depositional records and sandstone provenances in Hefei Basin, central China: implication for Dabie orogenesis [J]. The Islands Arc, 2004, 13: 346-358
- 21 李双应, 李任伟, 岳书仓, 等. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及物源制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 667-676 [Li Shuangying, Li Renwei, Yue Shucang, et al. Geochemistry of Mesozoic detrital rocks and its constraints on provenance in Feixi area, Anhui Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 667-676]
- 22 Li Shuangying, Li Renwei, Yue Shucang, et al. Geochemistry of rare earth elements of Mesozoic-Cenozoic sandstones in north margin of Dabie Mountains and adjacent area: constraints to source rocks [J]. Journal of Rare Earths, 2004, 22(4): 558-562]
- 23 李双应, 李任伟, 孟庆任, 等. 大别山南麓中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1157-1166 [Li Shuangying, Li Renwei, Meng Qingren, et al. Geochemistry of the Mesozoic and Cenozoic detrital rocks and its constraints on provenance in the southeast foot of Dabie Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(4): 1157-1166]
- 24 李任伟, 江茂生, 李忠, 等. 大别山北麓侏罗系大理岩砾石的碳-氧同位素组成及地质意义[J]. 岩石学报, 1999, 15: 623-629 [Li Renwei, Jiang Maosheng, Li Zhong, et al. Carbon and oxygen isotopic compositions of the marble conglomerates of Jurassic age in the northern margin of Dabie Mountains, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15: 623-629]
- 25 李忠, 李任伟, 孙枢, 等. 大别山北麓侏罗系花岗岩类砾石的 Rb-Sr 年代学特征[J]. 科学通报, 2001, 46(7): 582-585 [Li Zhong, Li Renwei, Sun Shu, et al. Rb-Sr chronology characteristics of Jurassic granitoid gravels in Hefei Basin, central China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(12): 1126-1129]
- 26 刘少峰, 张国伟, 张宗清, 等. 合肥盆地花岗岩砾石的同位素年代学示踪[J]. 科学通报, 2001, 46(9): 748-75 [Liu Shaofeng, Zhang Guowei, Zhang Zongqing, et al. Isotope chronological trace of granite gravel in Hefei Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46: 1716-1721]
- 27 王道轩, 刘因, 李双应, 等. 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限: 大别山北麓晚侏罗世砾岩中发现榴辉岩砾石[J]. 科学通报, 2001, 46(14): 1216-1220 [Wang Daoxuan, Liu Yin, Li Shuangying, et al. Lower limit on the UHPM Rock exhumation: Discovery of eclogite pebbles in the Late Jurassic conglomerates from the northern foot of the Dabie Mountains, eastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(14): 1216-1220]
- 28 李双应, 岳书仓, 王道轩, 等. 大别造山带超高压变质岩折返隆升的地层学证据[J]. 地质论评, 2002, 48(4): 345-352 [Li Shuangying, Yue Shucang, Wang Daoxuan, et al. Stratigraphic evidence for the exhumation of UHP metamorphic rocks in the Dabie orogen [J]. Geological Review, 2002, 48(4): 345-352]
- 29 Wang Q, Li R, Wang D, et al. Eclogites preserved as pebbles in Jurassic conglomerate, Dabie Mountains, China [J]. Lithos, 2003, 70: 345-357
- 30 李任伟, 桑海清, 张任祜, 等. 合肥盆地侏罗系沉积岩中高压-超高压变质岩物源年代学研究[J]. 科学通报, 2003, 48(5): 480-485 [Li Renwei, Sang Haiqing, Zhang Renhu, et al. Geochronology of source materials from high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Jurassic sedimentary rocks of Hefei Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48: 480-485]
- 31 Wan Y, Li R, Wilde S A, et al. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(17): 4333-4348
- 32 Link P K, Mahoney J B, Fanning C M. Isotopic determination of sediment provenance: Techniques and applications [J]. Sedimentary Geology, 2005, 182: 1-2
- 33 Najman Y. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins [J]. Earth-Science Reviews, 2006, 74: 1-72
- 34 Morton A C. A new approach to provenance studies: Electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the North Sea [J]. Sedimentology, 1985, 32: 553-566
- 35 Morton A C, Clauue-Long J C, Berge, C. SHRIMP constraints of sediment provenance and transport history in the Mesozoic Statjord Formation, North Sea [J]. Journal of the Geological Society, London, 1996, 153: 915-929
- 36 Dickinson W R, Gehrels G E. U-Pb ages of detrital zircons from Permian and Jurassic eolian sandstones of the Colorado Plateau, USA: paleogeographic implications [J]. Sedimentary Geology, 2003, 163: 29-66
- 37 Cawood P A, Nemchin A A, Freeman M, et al. Linking source and sedimentary basin: Detrital zircon record of sediment flux along a modern river system and implications for provenance studies [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 210: 259-268
- 38 DeCelles P G, Gehrels G E, Najman Y, et al. Detrital geochronolo-

- gy and geochemistry of Cretaceous-Early Miocene strata of Nepal: implications for timing and diachroneity of initial Himalayan orogenesis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227: 313-330
- 39 Enkelmann E, Weislogel A, Ratschbacher L, *et al.* How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study [J]. *Tectonics*, 2007, 26(4): art. No. TC 4007
- 40 李任伟, 李忠, 江茂生, 等. 合肥盆地碎屑石榴石组成及其对源区恢复和地层对比的意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(增刊): 91-98 [Li Renwei, Li Zhong, Jiang M, *et al.* Compositions of Jurassic detrital garnets in Hefei Basin and its implication to provenance reconstruction and stratigraphic correlation [J]. *Science in China: Series D*, 2000, 30 (Supp): 91-98]
- 41 李任伟, 孙枢, 李忠, 等. 高压-超高压岩石对合肥盆地侏罗系沉积的贡献 [J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 526-530 [Li Renwei, Sun Shu, Li Zhong, *et al.* Contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure rocks to the Jurassic sedimentation in Hefei Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 526-530]
- 42 李任伟, 万渝生, 陈振宇, 等. 根据碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年恢复早侏罗世大别造山带源区特征 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34: 320-328 [Li Renwei, Wan Yusheng, Chen Zhengyu, *et al.* The Dabie Orogen as the early Jurassic sedimentary provenance: Constraints from the detrital zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. *Science in China: Series D*, 2005, 48: 145-155]
- 43 Li R, Wan Y, Cheng Z, *et al.* Provenance of Jurassic sediments in the Hefei Basin, east-central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 23: 279-294
- 44 Grimmer J C, Ratschbacher L, McWilliams M *et al.*. When did the ultrahigh-pressure rocks reach the surface? A $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ white mica, Si-in-white mica, single-grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 197: 87-110
- 45 Carter A. Present status and future avenues of source region discrimination and characterization using fission track analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124: 31-45
- 46 Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, *et al.* Cretaceous-Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China) [J]. *Tectonophysics*, 2002, 359: 225-253
- 47 许长海, 周祖翼, Van Den Haute, 等. 大别造山带磷灰石裂变径迹 (AFT) 年代学研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(7): 622-634 [Xu Changhai, Zhou Zhuyi, Van Den Haute, *et al.* Apatite-fission-track geochronology and its tectonic correlation in the Dabieshan orogen [J]. *Science in China: Series D*, 2005, 48(4): 506-520]
- 48 许长海, 周祖翼, Van Den Haute, 等. 合肥盆地构造演化的磷灰石裂变径迹分析 [J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 5-13 [Xu Changhai, Zhou Zhuyi, Van Den Haute, *et al.* Apatite-fission-track thermochronology of tectonic evolution in Hefei Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 27(6): 5-13]
- 49 孟庆任, 李任伟, 李双应. 合肥盆地南部中生代沉积过程与大别山变质地体的构造剥露 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1145-1156 [Meng Qingren, Li Renwei, Li Shuangying. Mesozoic sedimentation of the southern Hefei basin and exhumation of the Dabieshan metamorphic terrane [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4): 1145-1156]
- 50 Meng Q, Li S, Li R. Mesozoic evolution of the Hefei basin in eastern China: Sedimentary response to deformations in the adjacent Dabieshan and along the Tanlu fault [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2007, 119(7-8): 897-916
- 51 Haughton P D W, Farrow C M. Compositional variation in Lower Old Red Sandstone detrital garnets from the Midland Valley of Scotland and the Anglo-Welsh basin [J]. *Geological Magazine*, 1989, 126: 373-396
- 52 Tebbens L S, Kronenberg S B, Vandenberg M W. Compositional variation of detrital garnets in Quaternary Rhine, Meuse and Baltic river sediments in the Netherlands [J]. *Geologie en Mijnbouw*, 1995, 74: 213-224
- 53 Hutchison A R, Oliver G J H. Garnet provenance studies, juxtaposition of Laurentian marginal terranes and timing of the Grampian Orogeny in Scotland [J]. *Bulletin of the Geological Society, London*, 1988, 155: 541-550
- 54 Zhang Ruyuan, Liou J G, Ye Kai. Mineralogy of UHPM rocks [C]// Cong Bolin, ed. *Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabie-shan-Sulu Region of China*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, Beijing: Science Press, 1996, 106-127
- 55 Massonne H J, Schreyer W. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 96: 212-224
- 56 Guidotti C V, Sassi F P. Petrogenetic significance of Na-K white mica mineralogy: Recent advances for metamorphic rocks [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1998, 10: 815-854
- 57 Von Eynatten H, Gaupp R. Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124: 81-111
- 58 Henry D J, Guidotti C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An examples from the staurolite-grade metapelites on NW Maine [J]. *American Mineralogist*, 1985, 70: 1-15
- 59 Morton A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research [C]// Morton A C, Todd S P, Haughton P C W. eds. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Spec. Publ. -Geol. Soc. Lond., 1991, 57: 31-45
- 60 Henry D J M, Dutrow B L. Tourmaline in a low grade clastic meta-sedimentary rock: an example to the petrogenetic potential of tourmaline [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 112: 203-218
- 61 Bebout G E, Nakamura E. Record in metamorphic tourmalines of subduction-zone devolatilization and boron cycling [J]. *Geology*, 2003, 31: 407-410
- 62 Shimizu R, Ogasawara Y. Discovery of K-tourmaline in diamond-bearing tourmaline-K-feldspar-quartz rock from the Kokchetav Massif, Kazakhstan [J]. *Eos Trans. AGU*, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract V43A-1561

- 63 Marschall H R , Altherr R , Kalt A *et al.* Detrital , metamorphic and metasomatic tourmaline in high-pressure metasediments from the Syros (Greece) : intra-grain boron isotope patterns determined by secondary-ion mass spectrometry [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 2008 ,155: 703-713
- 64 Chutakositkanon V , Hisada K , Charusiri P , *et al.* Tectonic significance of detrital chromian spinels in the Permian Nam Duk Formation , central Thailand [J]. *Geosciences Journal* , 2001 5(1) : 89-96
- 65 Arai S. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry [J]. *Mineralogical Magazine* , 1992 ,56: 173-184
- 66 Cookenboo H O , Bustin R M , Wilks K R. Detrital chromian spinel compositions used to reconstruct the tectonic setting of provenance: implications for orogeny in the Canadian Cordillera [J]. *Journal of Sedimentary Research* , 1997 67: 116-123
- 67 Hisada K , Arai S , Lee Y I. Tectonic implication of Lower Cretaceous chromian spinel-bearing sandstones in Japan and Korea [J]. *The Island Arc* , 1999 8: 336-348

Provenance Study of the Adjacent Basins to Dabie Shan: New Results and Its Application

LI Ren-wei

(Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029)

Abstract Application of single grain detrital minerals to the provenance analysis of the adjacent basins to Dabie Shan is described in this paper. Correlation of the modern river sediments to the Dabie Shan source area shows that the chemical compositions of detrital garnet , K-white mica and tourmaline are useful indicators for provenance analysis. The characteristics of their chemical composition in the Jurassic-Cretaceous-Paleogene sediments reveal the complication of rock composition of Dabie Shan as the source area. The exhumed high pressure-ultrahigh pressure metamorphic rocks formed due to the deep subduction of Yangtze Block became an important source rock of the sedimentary basins adjacent to south-eastern Dabie Shan during the Cretaceous-Paleogene , gradually. They were mainly located in the source area of the sedimentary basins adjacent to north Dabie Shan during the Jurassic. The detrital Cr-spinel composition and detrital zircon age structure of the Carboniferous sediments in the northern margin of Dabie Shan show that the source area is characteristic of the southern active continental margin of the North China Block during the early Paleozoic. In addition , it is characteristic of detrital zircon age of the Yangtze Block.

Key words provenance; single grain detrital mineral; Dabie Shan; Jurassic; Carboniferous