

物源分析方法及其发展趋势

刘腾^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 徐小刚^{1,2}, 康昱^{1,2}, 闫枫^{1,2}

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:物源分析是进行盆地分析、古环境与古气候恢复、古地理重建、构造背景追溯及盆山耦合研究的必要内容和方法, 研究意义重大。物源分析的母岩主要包括陆源岩、内源岩、火山源岩、岩浆源岩、变质源岩、地外源岩和混合源岩等几种类型, 各类源岩类型依次对应不同的源区及构造环境背景。笔者通过对大量文献的检索和调研, 主要总结阐述了沉积岩石学方法、重矿物分析方法、地球化学分析方法、地质年代学方法、黏土矿物学方法、化石及生标化合物方法及地球物理学方法等几类物源分析方法。并展望了未来物源分析的发展趋势。随着新技术和新方法的不断创新与涌现, 物源分析将从传统方法转向现代测试技术方法, 从单方法向多方法的综合运用完善, 从单学科趋于向多学科交叉融合, 从定性分析向定量分析发展。

关键词:源(母)岩; 物源分析; 重矿物; 地球化学; 发展趋势

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2016)04-0121-08

Methods and Development Trend of Provenance Analysis

LIU Teng^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, XU Xiaogang^{1,2}, KANG Yu^{1,2}, YAN Feng^{1,2}

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks is significant for all of palaeogeomorphology remodeling, palaeogeography reconstruction, palaeoenvironment and palaeoclimate recovering, original basin resuming, sedimentary basin reappearing, depositional system analysis, sedimentary deposits forecasting, petroleum reservoir predicting, parent rock property tracing, geotectonics settings analysis, crust and geotectonics evolvement resume, and study on coupling of basin and mountains. Source rocks of provenance analysis have several types, which include terrigenous source rocks, volcanic magma source rocks, metamorphic source rocks, exogenous source rocks and mixed source rocks. Based on the retrieval and a vast amount of literature research, the author summarized traditional provenance analysis methods and research progress of sedimentological method, petrographic method, heavy mineral method, element geochemistry method, geochronology method, clay mineral method, fossil and biomarker method, and geophysics method and its research progress. And the future development trend of the provenance analysis has been predicted. With the constant innovation and emergence of new technology and

收稿日期: 2016-02-12; 修回日期: 2016-04-27

基金项目: 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费(BJ14252)和中国地质调查局油气资源项目(1212011220761)

作者简介: 刘腾(1991-), 男, 西北大学在读硕士研究生。主要从事矿产普查与勘探研究。E-mail: lteng90@126.com

new method, the provenance analysis will be shifted from traditional methods to the modern testing technology methods, from a single method to the integrated approach, from single discipline changes to multidisciplinary cross combination, and from the qualitative analysis to quantitative analysis.

Keywords: source rocks; provenance analysis; heavy mineral; geochemistry; development trend

物源区是沉积盆地中碎屑物质的供给区,并包含原岩类型、气候环境和地形地貌等方面的含义。沉积物可以记录原(母)岩从一个源区搬运至另一个堆积(源)区的时空过程,并可对造山带的深部构造特性进行记录和反映。物源分析作为盆地分析的重要内容,是进行古环境与古气候恢复、古地理重建、构造背景追溯及盆山耦合研究的必要内容和方法,具有重要的科学研究意义。随着地质科学理论的日臻完善和多种现代分析测试技术水平的提高,物源分析已成为盆地研究的重点课题之一。通过物源分析,不仅能够了解物源区的地质演化过程,而且借助稳定矿物同位素测年方法,还可以对源区遗失的年代史进行描述分析(王成善等,2003;汪正江等,2000;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;何梦颖,2014)。

1 物源分析的源(母)岩类型

不同物源区的母岩和构造背景在沉积盆地中有不同的沉积、地球化学响应。依据源岩性质差别,物源区母岩主要包括陆源岩、内源岩、火山源岩、岩浆源岩、变质源岩、地外源岩和混合源岩等几种类型(王成善等,2003)(表1)。

表1 物源区母岩与板块构造亲缘性分析表
(据王成善修编,2003)

Tab. 1 The provenance of source rocks and plate tectonic affinity analysis (After Wang Chengshan, 2003)

物源区母岩类型	母岩与板块构造的亲缘性
陆源岩	大陆克拉通、裂谷、被动边缘、褶皱山系、俯冲岛弧、大陆弧
内源岩	陆壳、洋壳海盆(上升洋流、重力流、蒸发作用、洋底碳酸盐岩溶解)
火山源岩	海底、大陆、岛弧火山(基性、中性、酸性、钙碱性、碱性)
岩浆源岩	大陆(张裂)型、大洋(缝合、转换)型、洋-洋或洋-陆(碰撞)型
变质源岩	陆内、造山带(区域、热液、接触)变质与板块俯冲有关的双变质带
混合源岩	以上相关组合(离散的、聚敛的、造山的等)

2 物源分析方法及原理

依据不同物源在沉积物的迁移和沉积过程中就会有不同的岩性、岩相和地球化学特征响应的基本原理,我们在进行物源分析时,通常对碎屑岩石、矿物成分及其组合特征、地层发育状况、沉积岩相的侧向与纵向变化叠置、地球化学特征及其组合特征等方面进行重点研究。随着现代测试技术的多样化和方法水平的不断提高,物源分析的方法种类也与日俱增并渐趋成熟。目前,应用较多的分析方法有:沉积学与岩石学方法、重矿物分析方法、地球化学分析方法、地质年代学方法、黏土矿物学方法、化石及生标化合物方法及地球物理学方法等。笔者将分类陈述和分析各种方法的原理与应用(杨仁超等,2013)。

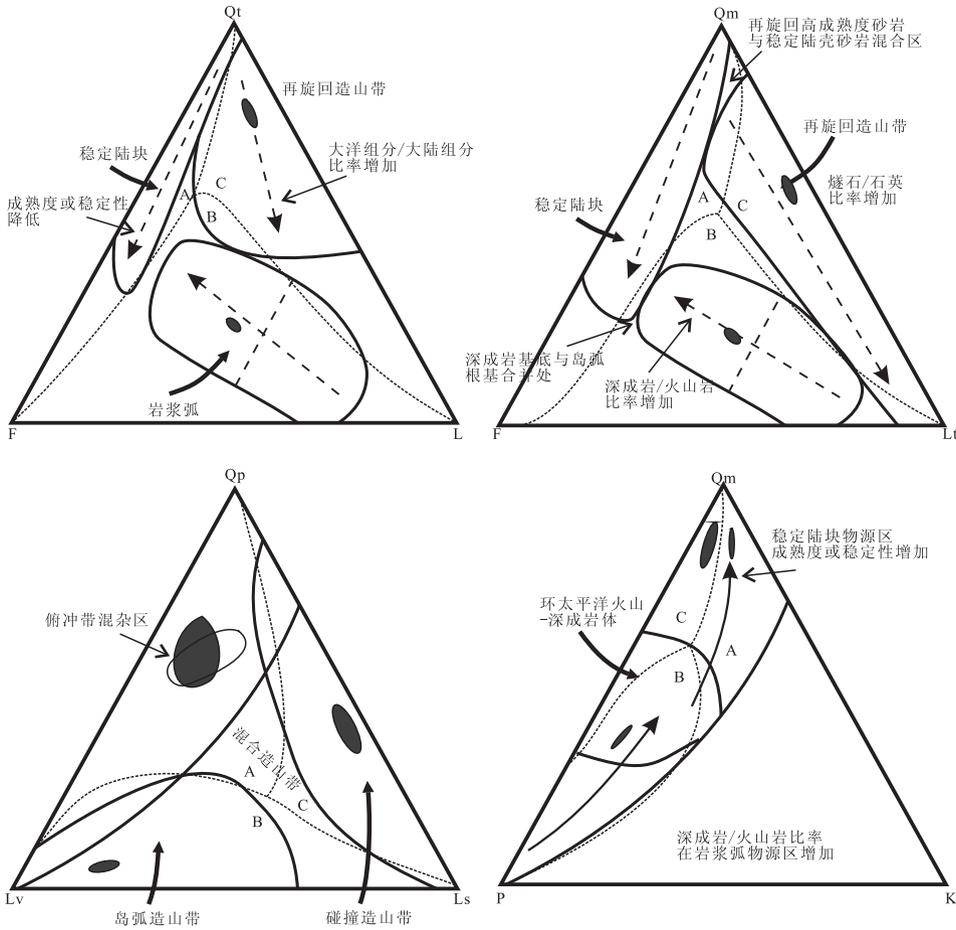
2.1 沉积学与岩石学方法

沉积学方法是根据盆地现有的钻井、测井和地震等数据资料,经过详细的地层对比与划分,编绘出特定地史时期的地层等厚度图、沉积相展布图等相关图件,对物源区的相对位置作出推断。在此基础上结合研究区内碎屑岩石的岩性、成分、沉积体形态、粒度、沉积构造、古流向及植物微体化石等资料,进一步地确定物源区。砂岩百分比等值线图 and 砾岩百分比等值线图最能反映物源的方向。沉积学方法具有直接、有效、花费小等优点,但也存在资料统计工作量大、仅能判断物源的粗略方向,不能确定物源区的具体位置和母岩性质等具体信息的缺点(王成善等,2003;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;何梦颖,2014;徐田武等,2009)。

岩石学方法主要是根据盆地陆源碎屑岩来自母岩的陆源碎屑组合推断物源区的母岩类型。例如,沉积物中的砾石层作为研究古气候环境演替的重要指标,有效的指示了沉积构造环境的演变过程。砾石层的物源,时代与年龄以及砾石层地层层序的划分等都可以直接或间接地反映砾石层的沉积环境,是沉积环境的一种指示标志(丁新潮等,2014)。

DICKINSON 等依据大量的砂岩碎屑成分统计数据,建立了砂质碎屑矿物成分与物源区之间的系统关系,绘制了多个经验判别三角图解(Q-F-L, Qm-F-Lt, Qp-Lv-Ls, Qm-P-K 等)(图 1),至今仍被广泛应用于物源区的构造背景分析,并成功地解释了多个物源区的构造背景(王成善等,2003;汪正江等,2000;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;DICKINSON W R 等,1983;马收先等,

2014;冯连君等,2003)。但是经过大量实践发现,该方法仍存在几处缺陷:首先没有考虑混合物源的存在,其次忽略了风化、搬运和成岩作用等作用的影响,使其在某些研究区应用时出现与真实情况偏差的情况(张妮,2012)。因此,DICKINSON 的物源区的判别图解有助于源区的构造背景分析,但必须与其他地质证据相结合才能得出切合实际的结论(汪正江等,2000;赵红格等,2003;杨仁超等,2013)。



Qm. 单晶石英;Qt. 石英总量(Qm+Qp);Qp. 多晶石英(包括燧石);F. 斜长石总量(P+K);Lv. 火成岩岩屑;L. 不稳定岩屑(Lv+Lm+Ls);Lm. 变质岩岩屑;Lt. 多晶质岩屑(L+Qp);Ls. 沉积岩岩屑(除链石和硅化灰岩);点线分界为 WELTJE(2006)的计算结果,A. 稳定陆块;B. 岩浆弧;C. 再旋回造山带。灰色区域为 99%置信度的平均值

图 1 物源区判别图(据 DICKINSON,1985; WELTJE,2006; 马收先, 2014)

Fig. 1 Discriminant provenance diagram(After DICKINSON,1985; WELTJE,2006; MA Shouxian,2014)

传统的岩石学研究手段在物源分析中可发挥重要作用,如作为物源直接标志的沉积物岩屑,可用偏光显微镜直接鉴定。而研究岩石中主要造岩矿物的发光性对判别沉积环境和岩石成因非常有利,且碎屑颗粒的发光分析可直接对物源区环境进行判断。

例如,碎屑岩中常见的石英、长石和岩屑随物源变化就具有不同的发光特征,故依据其在阴极发光镜下的颜色特征分析物源。ZINKERNAGEL(1978)首次提出了石英阴极发光色谱的划分方案(表 2)。但不同研究者对阴极发光颜色的辨别存在极大的主观

性。因此,对颜色的判断会出现偏差。为弥补此缺陷,有学者将阴极发光(CL)与扫描电镜(SEM)相结

合,得到不同成因石英的红光、蓝光和绿光光谱,并对光谱进行定量分析,以期取得更为理想的判别效果。

表2 石英阴极发光颜色与源岩类型表(据马收先,2014;ZINKERNAGEL,1978)
Tab.2 Quartz CL images and source rocks (After MA Shouxian,2014; ZINKERNAGEL,1978)

类型	发光颜色	温度(℃)	源岩类型
I	紫色、蓝色为主	>573(快速冷却)	火山岩、深成岩、接触变质岩
II	棕色为主	>573(缓慢冷却)	高级区域变质岩(变质火山岩、变质沉积岩)
		300~573	低级变质岩(接触变质岩外带、区域变质岩、回火沉积岩的自生石英)
III	不发光	<300	沉积岩中的自生石英

2.2 重矿物分析方法

沉积学中的重矿物指存在于陆源碎屑岩中的一些比重大(>2.86)、含量少的透明和不透明矿物,它们主要集中于细、粉砂岩中。重矿物类型主要有辉石、角闪石、绿帘石、石榴子石、尖晶石、独居石、锆石、磷灰石、金红石等,其组合与轻矿物组合反映了母岩的性质(王成善等,2003;杜世松等,2015)。重矿物分析方法是通过对沉积物中的重矿物组合来指示源区母岩的岩石类型和矿物组合特征,随着电子探针技术的应用及其分析水平和精度的不断提高,重矿物物源分析法得到了广泛应用。重矿物具有耐磨蚀和稳定性强的特点。因此,能够较多的保留其母岩的特征,其在物源分析中具有重要地位(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;徐田武等,2009;简星等,2012)。

由于重矿物之间有严格的共生关系,因此重矿物组合是物源变化的极为敏感的指示标志。物源分析可用砂岩的重矿物组合、ATi(磷灰石/电气石)-RZi(TiO₂矿物/锆石)-MTi(独居石/锆石)-CTi(铬尖晶石/锆石)等重矿物特征指数、以及锆石-电气石-金红石指数(ZTR指数)来指示物源。物源区的风化剥蚀、搬运过程中的机械破碎、搬运和沉积过程中的水力分选、深埋过程的成岩改造等作用因素会导致砂岩中的重矿物含量发生变化。沉积物时代越新,利用重矿物判断物源的准确性会越高(赵红格等,2003;杨仁超等,2013)。由于金红石和锆石均具有极高的稳定性,因此通常表现为相似的水力分选和埋藏成岩过程,利用沉积物中金红石和锆石的相对含量来指示物源,可以消除上述因素对物源分析的影响。MORTON等提出使用RuZi指数,即:

$$RuZi = \frac{\text{金红石}}{\text{金红石} + \text{锆石}} \times 100$$

RuZi指数是区分物源的重要指标,尤其是受强烈的埋藏成岩改造的沉积岩。高RuZi指数指示了源区富金红石的岩石含量高,如变泥质岩等,而低RuZi指数指示了源区贫金红石的岩石含量高,如火成岩等(简星等,2012;MEINHOLD G,2010;MEINHOLD,2013)。目前,碎屑金红石作为沉积物中最稳定的重矿物之一,蕴含着大量丰富的物源区信息,是重要的沉积物源指示矿物。随着电子探针的应用,一些学者也利用单矿物(辉石、角闪石、电气石、锆石、金红石、石榴子石等)的地球化学分异特征来判别物质来源(杨仁超等,2013;简星等,2012;MEINHOLD G,2010;MEINHOLD G,2013)。

2.3 地球化学分析方法

沉积物的地球化学组成是研究源区源岩类型、风化条件、构造背景以及古沉积序列、古气候环境的有力工具,尤其在河流沉积物的研究中得到广泛应用。根据元素含量、周期表中位置及放射衰变性,沉积物的地球化学分析方法包括常量元素分析、微量元素分析、稀土元素分析和同位素分析方法4种(王成善等,2003;赵红格等,2003;杨仁超等,2013)。前3种分析方法同属于元素地球化学方法的范畴。Th、Al、Co、Zr、Hf、Ti及稀土元素(REE)等元素在母岩风化、剥蚀、搬运、沉积等成岩过程中不易迁移,基本保持等量不变的被转移到碎屑沉积物中。因此,可作为沉积物物源的示踪标志,其中REE因其特殊的地球化学性质而在物源示踪中得到广泛运用。在某种程度上,沉积物成分特征和地球化学特征是物源和沉积盆地大地构造背景的函数,通过对砂岩的研究,提出一系列常量、微量元素地球化学端元判别图及稀土元素地球化学模式判别图,可以用来鉴别不同母岩源区的构造背景。

MCLENNAN 曾根据全岩化学组分和 Nd 同位素组成,分析了 5 种物源类型:古老大陆上地壳、再循环沉积岩、年轻的未分异弧、年轻的分异弧和各种外来组分的特征(表 3)。地球化学组合中常量元素 $Al_2O_3/SiO_2 - Fe_2O_3/SiO_2$ 图解常被用来揭示沉积风化过程中地球化学-矿物学的分馏。通过常量元素计算的化学蚀变指数(CIA)指标是风化程度测定的

一个标准,A - CN - K 图解可以判断风化趋势,推断物源区构造和气候的稳定性,微量元素的浓度多受物源区岩石类型、风化作用、沉积分选、成岩作用和元素的溶液地球化学性质等因素控制(汪正江等,2000;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;冯连君等,2003)。

元素地球化学分析建立在沉积物对母岩的主元

表 3 物源类型的地球化学和 Nd 同位素特征总结表(据赵红格,2003)

Tab. 3 Summary of geochemical and Ndisotopic characteristics of provenance type(After ZHAO Hongge,2003)

物源类型	ϵNd^+	Eu/Eu^*	Th/Sc	Th/U	其他
古老大陆上地壳(OUC)	≤ 10	$\approx 0.60 \sim 0.70$	≈ 1.0	> 3.8 (页岩)	涉及主元素组分
再循环沉积岩(RSR)	≤ 10	$\approx 0.60 \sim 0.70$	≥ 1.0		用示踪元素分析重矿物聚集的证据(如 Zr, Hf, REE)
年轻未分异弧(YUA)	$\geq +5$	≈ 1.0	< 1.0	< 3.0	未涉及到主族元素(如低 Si/Al, CIA),低 LILE 富集,组分变化大
年轻分异弧(YDA)	$\geq +5$	$\approx 0.50 \sim 0.90$	变化	变化	涉及到主族元素(如高 Si/Al, CIA),高 LILE 富集,组分变化大
外来组分	化学和同位素反映依赖于组分的特性。例如,非常高的 Mg, Cr, Ni, V, Cr/V 比值为蛇绿岩源岩的反映				

注: ϵNd^+ 值仅代表现代沉积物。不同区带类型之间的差异对古老岩石而言是存在的,但随着年龄变新,将会变的越来越不明显。确切值依赖于沉积年龄。

素组合的继承性基础之上。该方法分析物源兼具有效、经济、定量等优点,既适用于富含基质的砂岩和页岩,又可确定物源的年龄和地球化学演化历史,并可有效的避免水动力因素的干扰。原则上,化学元素只是在短距离搬运和化学风化很弱的条件下才具有较好的可比性。同时在进行元素组合分析时,还要考虑到搬运过程中的稀释作用,应注意其相对含量而非绝对含量(王成善等,2003;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;何梦颖,2014;马收先等,2014;冯连君等,2003)。

与沉积属性及其他地球化学属性方法不同,同位素分析方法主要为物源分析提供母岩的地质年代、隆升史及热史、地壳组成及演化,以及母岩的次生变化等信息。同位素分析方法包括裂变径迹定年、K - Ar 和 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 值, Rb - Sr 同位素、Sm - Nd、U - Pb 以及稳定同位素 6 个方面的方法。同位素分析方法应用是以沉积过程中元素与介质几乎没有发生活化迁移现象为前提的,所以应用时会一定程度上受到限制。

矿物的氧同位素成分与水岩反应、矿物结晶、后期改造的温度有关联。石英氧同位素可用于源区示

踪,石英 $\delta^{18}O$ 值在现代的风成沉积物的物源分析中应用较多。由于不同粒级的矿物难以筛选,该方法现阶段仅用于石英岩或燧石砾石的全岩氧同位素示踪。但随着离子探针等技术手段的普及有望在老地层中推广应用(马收先等,2014)。

Sm - Nd 同位素资料常被用来推断沉积岩物质来源和估计陆壳从地幔中分离出来的时间。Rb - Sr、U - Pb 由主量元素 K 和 Ca 组成的同位素体系,因其特殊的地球化学行为,在岩石成因、物质来源、板块碰撞、壳幔作用等重要的地球动力学过程研究中,会被赋以新的信息和启示。通过分析,发现同位素分析方法用岩石中同位素测年及其间的相互关系图来判定物源类型和年龄是一种更为精确的年代学物源判定方法(马收先等,2014)。

2.4 地质年代学方法

单颗粒碎屑矿物的同位素测年在物源分析中的应用方面,目前应用的方法主要有:碎屑颗粒的(磷灰石、锆石)裂变径迹测年法、含 U 微相(锆石、独居石和榍石)U - Pb 测年法、(云母和角闪石) $^{40}Ar/^{39}Ar$ 测年法、Sr - Nd 法、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 法、 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 法等(杨仁超等,2013)。

碎屑锆石的 U - Pb 年龄不受沉积分选过程影响,年龄谱系特征直接反映了沉积物源区岩石的年龄组成。根据沉积岩碎屑锆石年龄分布确定碎屑沉积岩物质来源、沉积时代和形成的构造环境,已成为国际上的研究热点之一。运用激光剥蚀等离子体质谱(LA - ICP - MS)的原位微区分析技术结合阴极发光图像识别出锆石的继承年龄、结晶年龄和变质年龄,目前已经发展到可以测定出 0.1Ma 的锆石年龄。对碎屑锆石 U - Pb 年代学及 Hf 同位素的综合研究,能够更准确的获取已完全被剥蚀掉,或者经历了岩浆事件而未暴露于地表的沉积物的信息,指示沉积物物源、搬运以及再旋回的过程,从而揭示研究区域的岩浆活动事件以及现代大陆地壳增长与演化的历史(王成善等,2003;汪正江等,2000;赵红格等,2003;杨仁超等,2013;张妮,2012;DICKINSON W R 等,1983;马收先等,2014;冯连君等,2003;杜世松等,2015;BRACCIALI L 等,2013;HASSAN B, 2014)。

2.5 地球物理学方法

地球物理学在物源分析中的应用主要有测井地质学法和地震地层学方法。测井地质学方法主要利用自然伽马曲线分形维数、地层倾角测井来判断物源方向。用地震地层学方法和层序地层学方法,并以地震剖面精细解释作为辅助,可以用来确定沉积物源和古水流方向。地震地层学的原理是根据地震剖面上总的地震特征来划分沉积层序,并分析古沉积相及其沉积环境,而物源和古水流方向的判定是其研究的部分内容。进行地震地层分析时,必须首先将钻井和测井资料结合对地下岩石反射层进行层位标定。在地震地层分析的基础上,利用单个地震相识

别对应的单个物源、古水流方向,再对得到的大量物源、古水流方向数据信息进行统计分析,进而确定研究盆地的总体物源及古水流方向(杨仁超等,2013;姜在兴,2005)。

2.6 黏土矿物学方法

泥岩的渗透率一般低于砂岩,在成岩过程中不易受到外来流体和杂质的影响,故其在确定物源方面可能比砂岩有效。另外,碎屑黏土是泥岩中的特殊组分,在确定物源和古气候方面应用潜力很大,尤其是在浅层沉积物的物源示踪及第四纪以来的气候变化研究方面应用广泛;利用 Al/Ca 或高岭石/蒙脱石比值也可用来判断物源方向(杨仁超等,2013;吕俏凤,2007)。

2.7 化石及生物标志化合物方法

借助于沉积物中微体植物化石的分析,以及泥质区正构烷烃、姥鲛烷、植烷、藿烷和甾烷等生物标志物的特征来判断有无陆源高等植物的输入,通过不同来源和成熟度的生物标志物,来判断沉积有机质与碎屑沉积物的来源(杨仁超等,2013;郭志刚等,2001)。

对盆地与造山带物源区的判定方法很多,实践表明,任何一种分析方法,只要其理论基础正确,测试或鉴定方法无误,均存在不可取代的优越性和不可避免的局限性(表 4)。随着研究的不断深入,各种分析方法会不断趋于严谨和完善,新技术将会不断的融入和改进。在方法的选择时,应结合研究区的实际情况,因地制宜地考虑研究方法本身的优缺点,力求取得更为贴近实际的结论和科研成果(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;马收先,2014)。

表 4 各种物源分析方法的优点和缺点对比表

Tab. 4 Advantages and disadvantages of all kinds of methods on provenance study

方法	沉积学与岩石学	重矿物	地球化学	地质年代	地球物理学	黏土矿物学
优点	直接有效,花费小	较好的保留母岩性质,矿物间严格共生	定量,具普适性,经济有效	精确指示源岩年龄组成,并推断构造活动背景	更有效划分沉积层序,分析沉积相及沉积环境	古气候方面潜力很大,浅层沉积物源示踪更有效
缺点	地层产状易受构造影响,数据繁杂,只粗略判定物源区	易受风化作用、水动力和成岩作用影响	含自生矿物,精度受沉积过程元素活化与否限制	无法准确区分直接物源与间接物源	统计大量资料,需将多钻井资料结合	遭受沉积过程、气候和成岩作用的影响

3 物源分析的发展趋势

随着先进物源分析方法和测试技术的使用,沉积物所携带的物源信息将被大量挖掘,物源区资料的应用前景也将更广阔,有理由推测未来沉积物物源分析的发展将呈现如下趋势。

3.1 从传统经典方法转向现代先进分析测试技术

早期的物源分析主要依靠沉积岩石学、地层学、重矿物等经典的分析方法。虽然传统的方法仍然有效,但现在更多的依赖于阴极发光、扫描电镜、电子探针、X衍射、能谱分析及激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)、激光感生火花电感耦合等离子体质谱(LINA-ICP-MS)、电子顺磁共振(EPR)、电子自旋共振(ESR)测年等现代分析测试技术的综合运用。但是,不论是“传统”或“新技术”,“经典”或“先进”,只要分析方法在研究区有效可行,且效果好,就可作为理想的物源分析方法(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;BRACCIALI L等,2013)。

3.2 从定性判断转向定量分析

定量物源分析是定量地评价从可识别的物源区到盆地充填过程中的碎屑物质类型、数量及供给速率。随着电子探针、离子探针、等离子质谱技术以及同位素测年等先进分析手段的应用,从定性到定量是物源分析的必然趋势。将现代分析测试技术、数学定量模型和计算机技术相结合,三者共同创造了物源分析的美好发展前景(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;马收先,2014)。

3.3 从单一方法转向多种方法的综合运用

随着研究的深入,物源分析正从早期的单一方法到多方法的综合运用、从单一学科走向多学科联合交叉转变。例如,岩石特征-重矿物-全岩主量元素-微量元素-稀土元素组合、重矿物-元素地球化学-同位素年代地质学组合、同位素地球化学-黏土矿物学的组合等。随着现代测试技术的不断提高和地质工作者的不断探索与实践,物源分析方法将会更加完善和丰富。物源体系分析的未来发展方向必将是由单一方法走向多学科多方法的综合运用(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;何梦颖,2014)。

3.4 不断涌现的新技术

国内外学者在不断探索和实践,使得与物源分析相关的新技术方法不断涌现。最新的研究表

明,Hf同位素与斑脱土化学特征作为物源变化的标志被首次应用于物源分析中;磁性矿物包裹体及磁学手段被不断发展和应用,地磁方法正在逐渐渗入精细的物源分析中;近年来,石英颗粒及重矿物的显微晶面形貌特征对物源的指示意义也被成功应用(赵红格等,2003;杨仁超等,2013;简星等,2012;EDUARDO G,2015;MEINHOLD G,2010;MEINHOLD G,2013;杜世松等,2015;BRACCIALI L,2013;HASSAN B,2014)。

4 结语

进行物源分析时,必须深入了解研究区地质背景,掌握物源区与沉积区的构造活动和演化历史,收集大量物源区的地质资料,充分考虑构造抬升、地层倒转、走滑平移和推覆作用、剥蚀作用、化学风化、水力侵蚀等外界因素对沉积物的干扰,并结合一定数量的样品测试,进行数据统计和分析,辅以先进的测试技术手段进行样品分析试验,只有这样,才能得到理想的物源分析结果。鉴于陆源沉积岩物源分析在未来地质研究、沉积矿产预测和勘探中发挥的重要作用,必将受到地质工作者的持久关注。在科学理论不断创新完善、测试仪器日臻精确、新技术方法不断涌现的大数据时代,物源分析也必将开创高速发展的未来。

参考文献(References):

- 王成善,李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2003:1-114.
- WANG Chengshan, LI Xianghui. Sedimentary Basin: From Principles to Analyses[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 1-114.
- 汪正江,陈洪德,张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. 沉积与特提斯地质,2000,20(4):104-110.
- WANG Zhengjiang, CHENG Hongdei, ZHANG Jinquan. Formerly sedimentary facies and palaeogeography[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(4): 104-110.
- 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报,2003,21(3):409-415.
- ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and Prospects of Provenance Analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica,

- 2003, 21(3):409-415.
- 杨仁超,李进步,樊爱萍,等. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J]. 沉积学报,2013,31(1):99-107.
- YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping, et al. Research Progress and Development Tendency of Provenance Analysis on Terrigenous Sedimentary Rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1):99-107.
- 张妮. 沉积盆地的物源综合研究-以苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组为例[D]. 南京:南京大学,2012.
- ZHANG Ni. Comprehensive provenance study in sedimentary basin;an example from the Paleogene Dainan Formation of Gaoyou Depression, the North Jiangsu Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- 何梦颖. 长江河流沉积物矿物学、地球化学和碎屑锆石年代学物源示踪研究[D]. 南京:南京大学,2014.
- HE Mengying. The Provenance Study on the Yangtze River Sediments, Based on Mineralogy, Geochemistry and Detrital Zircon Dating[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- 丁新潮,徐树建,倪志超. 沉积物中砾石层的研究进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2014,30(3):267-273+288.
- DING Xinchao, XU Shujian, NI Zhichao. Research Progress on Gravel Beds in Sediments [J]. Ludong University Journal(Natural Science Edition), 2014, 30(3):267-273+288.
- 马收先,孟庆任,曲永强. 轻矿物物源分析研究进展[J]. 岩石学报,2014,30(2):597-608.
- MA Shouxian, MENG Qingren, QU Yongqiang. Development on provenance analysis of light minerals[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2):597-608.
- 徐田武,宋海强,况昊,等. 物源分析方法的综合运用-以苏北盆地高邮凹陷泰一段地层为例[J]. 地球学报,2009,30(1):111-118.
- XU Tianwu, SONG Haiqiang, KUANG Hao, et al. Synthetic Application of the Provenance Analysis Technique: A Case study of Member 1 of Taizhou Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 30(1): 111-118.
- 简星,关平,张巍. 碎屑金红石:沉积物源的一种指针[J]. 地球科学进展,2012,27(8):828-846.
- JIAN Xing, GUAN Ping, ZHANG Wei. Detrital Rutile: A Sediment Provenance Indicator[J]. Advances in Earth Sciences, 2012, 27(8): 828-846.
- 冯连君,储雪蕾,张启锐,等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘,2003,10(4):539-544.
- FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(4): 539-544.
- 杜世松,伍永秋,黄文敏,等. 风成沉积物源分析方法及其应用研究进展[J]. 干旱区研究,2015,32(1):184-191.
- DU Shisong, WU Yongqiu, HUANG Wenmin, et al. Research Progress on Analysis Methods and Their Application of Aeolian Sediment Sources[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1):184-191.
- 姜在兴,邢焕清,李任伟,等. 合肥盆地中-新生代物源及古水流体系研究[J]. 现代地质,2005,19(2):247-252.
- JIANG Zaixing, XING Huanqing, LI Renwei, et al. Research on provenance and paleocurrents in the Meso-Cenozoic Hefei Basin[J]. Geoscience, 2005, 19(2): 247-252.
- 吕俏凤. 利用亲陆元素和陆源化合物研究物源与隐蔽储层的新方法[J]. 中国海上油气,2007,19(6):367-371.
- LÜ Qiaofeng. A new method to study provenance and subtle reservoir using continental elements and terrigenous minerals[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(6): 367-371.
- 郭志刚,杨作升,陈致林,等. 东海陆架泥质区沉积有机质的物源分析[J]. 地球化学,2001,30(5):416-424.
- GUO Zhigang, YANG Zuosheng, CHEN Zhilin, et al. Source of sedimentary organic matter in the mud areas of the East China Sea shelf[J]. Geochimica, 2001, 30(5): 416-424.
- DICKINSON W R, BEARD L S, BRAKENRIDGE G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(2): 225-235.
- Eduardo G. From static to dynamic provenance analysis-sedimentary petrology upgraded[J]. Sedimentary Geology, 2015,336:3-13.
- MEINHOLD G. Rutile and its applications in earth sciences [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 102(1-2): 1-28.
- MEINHOLD G. Erratum to "rutile and its applications in earth sciences"[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 116: 211.
- BRACCIALI L, Randall R P, HORSTWOOD M A, et al. U/Pb/LA-(MC)-ICP-MS dating of rutile: New reference materials and applications to sedimentary provenance[J]. Chemical Geology, 2013, 347: 82-101.
- HASSAN B. Provenance of sedimentary kaolin deposits in Egypt: Evidences from the Pb, Sr and Nd isotopes[J]. Journal of African Earth Sciences, 2014, 100: 532-540.