

砂岩中主要碎屑成分的物源区意义

刘 立

胡春燕

(长春地质学院)

一、引 言

英文的物源区 (provenance) 意为起源和产生的地方。在沉积岩石学中, 物源区特指来源区中母岩的性质、成分、特征和大小、气候和地形, 并在某种程度上包括搬运作用因素 (Suttner, 1974)。因此可以表达为: 物源区 = f (母岩、地形、气候, 搬运作用) (Basu, 1985)。

物源区研究的目的是为了了解沉积岩分布区的定量古地质学问题。我们不仅要力求推断提供沉积物碎屑的山脉的岩性和位置, 而且还要找出现已侵蚀到基准面的高地的岩石组成和相对比例。显而易见, 这些成果不是轻而易举能够获得的。归根到底, 物源区问题是要求沉积岩石学家来解决的最复杂和最困难的问题之一 (Pettijohn, 1972)。

本文主要根据国外有关的经典文献和最新资料, 论述了砂岩中主要碎屑成分——石英、长石和岩屑的成因特征和量比关系的物源区意义和研究方法。

二、物源区母岩

砂岩中的主要碎屑成分——石英、长石和岩屑在恢复物源区母岩的研究中具有极为重要的意义, 尤其岩屑是砂岩母岩的最直接证据。鉴于岩屑作为一种直接的母岩证据, 在我国应用比较广泛, 因而这里不再赘述。下面主要介绍基于石英和长石成因特征的恢复母岩方法。

(一) 碎屑长石的成因特征

长石是一种极有用的母岩标志, 这是因为在许多沉积盆地中长石极为丰富, 而且在物理和化学性质上长石也具有一定的成因意义。近年来发展起来的长石化学成分、双晶、环带和构造状态的定量分析, 是目前根据长石恢复母岩的主要方法。

1. 长石的化学成分

虽然在 60 年代以前人们就试图根据化学成分来恢复长石的母岩, 但冗长的湿化学分析流程使沉积岩石学家最终失去了耐性。60 年代电子探针的问世使这一方法恢复了生机。Trevena 和 Nash (1981) 在搜集了 5000 多个结晶岩中长石的电子探针分析数据后, 发现钾含量是确定钾长石和斜长石成因的有用参数。从火山、深成到变质环境中, 斜长石的最大钾含量逐渐减少, 钾长石中的钾含量也有明显变化, 其中:

火山岩中钾长石: $A_{6.74}Al_{0.13}O_{1.13} - A_{6.12}Al_{0.87}$

深成岩中钾长石: $A_0.43A_1.00O_1.56-A_0.2A_1.00O_1.98$

变质岩中钾长石: $A_0.47A_1.20O_1.51-A_0.2A_1.00O_1.98$

Trevena 和 Nash (1981) 在钠长石 (A_0)-钙长石 (A_1)-正长石 (O_1) 三角图解中圈出了八个物源区组, 即火山岩长石, 深成岩长石, 变质岩长石, 火山岩或花岗岩长石, 火山岩或深成岩长石, 深成岩或变质岩长石, 火山、深成或变质岩长石, 深成、变质或自生长长石 (图解见 Trevena 和 Nash, 1981; 或 Helms, 1985 文章中) 这些物源区组可以作为确定砂岩中碎屑长石来源的参考图解, 尤其适用于具有混合物源的长石质砂岩的母岩类型解释。Trevena 和 Nash (1981) 曾用这种方法成功地确定了新墨西哥西北和亚利桑那东北的 Chuska 砂岩的母岩组合。

2. 长石的环带

虽然钾长石和斜长石均有环带, 但目前只是把斜长石的环带视为母岩的标志。Pittman (1963) 曾鉴定了 90 个深成岩、火山岩、浅成岩和变质岩样品, 以确定渐近环带 (progressively-zoned)、振荡环带 (oscillatory-zoned) 和不具环带的斜长石在上述四种岩石中的相对丰度。结果表明, 环带是火成岩斜长石的普遍标志, 其中具振荡环带的斜长石不是来自火山岩就是来自浅成岩。变质岩中几乎不出现环带斜长石。但不具环带的斜长石亦可能在某些浅成岩和火山岩中出现。这种方法在砂岩中, 尤其是在细砂岩中的应用有一定的局限性, 因为碎屑长石通常是原生晶体的碎屑, 此外, 粗粒的环带火成岩斜长石在搬运过程中也会由于破碎和磨蚀而不具环带。

3. 长石的双晶

许多工作者曾讨论了斜长石双晶与其宿主岩石的关系。Corai (1951) 的工作奠定了这方面研究的基础。他鉴定了来自各种深成岩、火山岩 (包括浅成岩) 和变质岩 (包括片岩、片麻岩和角闪岩) 中 1500 多个斜长石的双晶律。他把双晶划分为 A 双晶 (聚片双晶, 包括钠长石律、肖钠长石律和阿克律) 和 C 双晶 (除 A 双晶外的其他双晶)。A 双晶产于所有的岩性中, 但在角闪岩中通常含量较低。C 双晶除在角闪岩中以微量产出外, 仅限于火山和深成岩中。

Pittman (1970) 在北加利福尼亚 Mohawk 湖沉积物 (更新世) 的物源研究中, 把斜长石的双晶和环带的出现相对频率作为判别母岩的主要标志。该沉积物的母岩是已知的, 主要由安山岩和少量的流纹岩、玄武岩、变质岩和花岗岩组成。研究表明, 砂中的斜长石大约 20—25% 具有 C 双晶, 说明其母岩主要为火山岩和深成岩。显然这与其已知的母岩组合的岩性组成是一致的。此外, 在具环带的斜长石中, 渐近环带的斜长石为 68—79%, 振荡环带占 21—32%。而且 Pittman (1970) 还注意到, 既无双晶又无环带的斜长石极为少见 (0—1%), 说明变质岩不是该沉积物的主要母岩, 这与实际情况也是吻合的。

钾长石中的双晶也可用于母岩分析。Plymate 和 Suttner (1983) 利用钾长石网格双晶的产出频率成功地确定了蒙大拿州西南部全新世河流沉积物的母岩。

4. 长石的构造状态

尽管所有的长石都可以测定构造状态, 但由于斜长石的数据难以获得, 因而目前只是把钾长石的构造状态作为母岩的标志。控制碱长石构造状态的主要因素是原子结构的平衡温度、固相线下冷却率和水活动的情况。高平衡温度导致 Al-Si 无序, 有利于无序构造的碱长石形成。低平衡温度有利于形成完全有序的长石。适当的水存在也促进了有序构造的形

成。

Suttner 和 Basu (1977) 利用全新世河流砂中碎屑钾长石的构造状态, 检验了它作为母岩标志的应用价值。该河流砂的物源是已知的, 由深成岩、火山岩和变质岩组成。来自火山的碎屑钾长石具无序构造, 这反映了火山岩的高平衡温度和快速冷却。来自年轻深成岩中的碎屑钾长石相对无序, 而来自较老的深成岩中的钾长石则完全有序。所有来自变质岩的碎屑钾长石都是完全有序的端员微斜长石 (maximum microcline)。Suttner 和 Basu (1977) 注意到, 这一鉴定结果与 Barth (1969) 关于端员微斜长石是区域变质岩中最常见的构造状态的结论是一致的。

综上所述, 长石的化学成分、双晶环带和构造状态可以用来推测砂和砂岩的母岩。然而需要说明的是, 长石是一种在物理上和化学上不稳定的矿物。在应用上述方法时, 要充分考虑到搬运磨蚀和成岩作用的影响。

(二) 碎屑石英的成因特征

由于碎屑石英是砂岩中含量最多的矿物, 并且由于它在风化、搬运和成岩过程中的相对稳定性, 因而沉积岩石学家一直在寻求碎屑石英的类型和特征与母岩的关系。早在 1986 年, Mackie 就把石英中的包裹体作为母岩的标志。本世纪 40 年代, 克里宁 (1940, 1946) 建立了区别石英成因类型的光学性质标准, 该标准包括石英的消光类型, 多晶颗粒中子颗粒的接触性质, 颗粒的形状以及包裹体的种类。尽管今天对碎屑石英的研究已取得了长足的进展, 但仍是克里宁“标准”的完善和发展。

1. 石英的波状消光性和多晶性

石英的波状消光性和多晶性主要是石英晶体中晶格位错的外在表现 (Basu 等, 1975)。Conolly (1965) 和 Blatt (1967, a, b) 的工作使我们认识到石英的波状消光性和多晶性与碎屑石英的粒径有关; 而 Basu 等 (1975) 的研究使其成为判断母岩普遍应用的方法。与前人不同的是, Basu 等 (1975) 首先选择一定粒径范围 (中砂) 的碎屑石英作为研究对象, 其次研究碎屑石英总体的波状消光和多晶性质。通过对已知物源的全新世砂里边的中粒 (0.25—0.50mm) 碎屑石英的研究, 他们发现, 来自变质岩尤其是低级变质岩中的单晶石英大多以中—强波状消光 (波状消光值 $> 5^\circ$), 多晶石英大多以含有四个以上子颗粒为特征。而深成岩则往往提供非波状消光和弱波状消光 (波状消光值 $< 5^\circ$) 的单晶石英, 和仅有 2—3 个子颗粒的多晶石英。在此基础上, 他们建立了双三角图判别图解 (图解详见 Basu 等, 1975)。

值得说明的是, 这种图解仅适用于中粒的第一旋回 (?) 砂和砂岩; 仅能提供主要母岩类型的线索 (如低级变质岩, 高级变质岩和深成/麻粒岩)。此外, 成岩作用和构造作用也可能会引起一些问题。

2. 石英的形状

现在越来越多的沉积岩石学家 (如 Blatt, 1967; Basu, 1985 和其他人) 认识到, 传统的碎屑石英颗粒形状概念 (如克里宁的广义形状概念和包克曼的石英延长比值) 并不是母岩的可靠标志。然而, Fhrlich 和 Weinberg (1970) 提出的傅里叶颗粒形状分析 (Fourier grain shape analysis) 则赋予石英颗粒形状一种新的物源区含意。这种方法实际是一种用花瓣或三叶草叶形状的曲线来表示颗粒边缘的方法。对于颗粒的二维投影或薄片颗粒的产出形式而言, 这种方法易于公正地用计算机处理。

Ehrlich 和他的学生们的工作业已证实,砂和砂岩中石英颗粒总体的傅里叶颗粒形状分析,能够成功地确定一个砂体中的物质是否来自不同的物源,或者来自相似物源的物质是否经过不同的搬运机制和介质而沉积下来的。遗憾的是,这种方法不能确定母岩类型,并且只能用于石英颗粒。

3. 其他

石英中的包裹体是应用比较广泛的母岩标志之一,但定量的研究比较少见。石英中的微量元素分布是母岩的潜在标志。虽然一些研究者已做了一些探索性的工作,但现在尚不能证实碎屑石英中微量元素的分布与母岩的确切关系。石英的阴极发光性质在恢复母岩方面,可能具有较大的意义,但目前的应用尚不广泛。

三、物源区古气候

近十几年来,许多工作者致力于研究明显不同气候条件下形成的全新世砂的碎屑成分特征。他们的研究提供了气候对于砂成分成熟度控制的定量证据。因此,全新世的研究成果使根据古代砂岩的碎屑成分资料来推测古气候成为可能。

气候是通过控制成土作用进而影响砂或砂岩成分的。成土作用把较大的岩石碎块分解成若干个较小的岩石碎块和单矿物颗粒。Young 等(1975)和 Basu (1976)的研究表明,如果同样的显晶质母岩,在可比的地形条件和在潮湿和干燥两个截然不同的气候条件下风化,那么这两个气候条件下产生的砂的主碎屑成分比值将截然不同。他们认为多晶石英/长石+岩屑或石英总含量/长石+岩屑是敏感的气候标志。然而,这种气候信息得以保留的前提是,砂未经过长距离的搬运,未遭受滨岸环境的机械分异作用改造(Suttner, 1981)。在成岩作用过程中,不稳定组分(如长石和岩屑)的溶解和蚀变,肯定会不同程度地影响碎屑颗粒的相对丰度和比值。因此,在进行古气候分析前准确评价成岩作用对碎屑颗粒的改造程度是完全必要的。Sutter 和 Dutta (1986)认为,在浅埋成岩作用中,砂岩仍能保留它所携带的气候信息,这已为他们工作所证实。

Suttner 和 Dutta (1986)研究了科罗拉多的 Cutler 组(二叠系), Fountain 组(二叠—宾夕法尼亚系)和印度半岛的冈瓦那超群(二叠—三叠系)的第二旋回河流砂岩成分成熟度的系统变化。他们发现这种变化反映了沉积过程中气候的变迁,气候是控制成分成熟度的关键因素。在这三个地层单元的沉积过程中,古气候的变化都有可靠的证据。母岩(花岗岩,花岗片麻岩)和构造-环境(与基底核心地块隆起有关的冲积体系)是类似的,并且在这三个单元沉积过程中相对未发生变化。冈瓦那超群由五个砂岩相组成,其主要碎屑成分比值(石英:长石:岩屑)由老到新为:54:42:4→88:10:2→62:34:4→82:16:2→99:1:0。这五个砂岩相沉积时相应古气候为:冰川干旱→温和潮湿→温暖半干旱→温暖半潮湿→温暖潮湿。Fountain 砂岩的主要碎屑成分比值变化为(由下部到上部):65:26:9→54:36:10,相应的古气候为潮湿温暖→半干旱温暖。Cutler 砂岩是在干旱气候条件下沉积的,因而其砂岩成分成熟度最差(49:44:7)。他们在石英总量/长石+岩屑和多晶石英/长石+岩屑双对数图解上,成功地区分开了干旱、半干旱、半潮湿和潮湿四种气候条件(图解详见 Suttner 和 Dutta, 1986)。

他们的研究具有深远的意义。首先,他们率先把全新世气候对砂成分影响的研究,扩

展到古代砂岩;其次,他们的研究结果支持了在张性板块构造背景中,特征气候在砂成分上留下烙印和保存下来的最佳条件的经验和理论分析。该构造背景以粗粒结晶母岩、低序河流短距离搬运、非海相沉积和浅埋成岩作用为特征。但是,既使在这样的最佳背景中,在砂岩成分的控制因素方面,只有在很少的情况下气候的作用才超过构造作用而处于支配地位。

应该说明的是,上述研究涉及的母岩毫无例外地都是花岗岩或变质岩。Mack 和 Jerzykiewicz (1989) 则研究了以安山岩为母岩的砂和砂岩的气候意义。他们的研究表明,气候对于以安山质岩石为母岩的砂和砂岩碎屑成分的控制作用也是明显的,并且指出火山岩岩屑/斜长石+火山岩屑(RFP 指数)在潮湿气候地区较低。

从以上的实例不难看出,根据砂或砂岩碎屑成分的比值关系推断干旱和潮湿两个极端的气候条件是可能的。但应该强调的是,当构造活动强烈时,气候对于砂岩成分的影响将是微弱的。此外,非海相沉积,短距离搬运和浅埋成岩作用是气候信息得以保存的最佳条件。在研究气候与砂或砂岩碎屑成分的关系时,应按照传统的点计法统计砂或砂岩中各种碎屑成分的相对含量。

四、物源区的构造背景

Dickinson 等人(如 Dickinson 和 Suczek, 1979; Dickinson 和 Valloni, 1980; Lickinson, 1985)业已建立了砂质碎屑的实际矿物成分与不同成因类型的物源区地块之间的系统关系,并根据大量的统计数据绘制了经验差别图解(Q_{FL} , Q_{mFL} , Q_{L+L_s} 和 Q_{mPK})。物源区划分和判别图解的样式在国内的教科书中已有介绍(如曾允孚、夏文杰, 1986), 这里不再重复。下边主要讨论一下根据砂岩碎屑成分进行构造背景分析时应注意的问题。

虽然国内外许多地质工作者根据上述判别图解成功地解释了许多砂的物源区构造背景,但也有不少工作者注意到,根据判别图解解释的物源区构造背景与所研究地区的实际地质情况不符,其原因可能有以下三种。

1. 混合物源区

Dickinson 等建立的判别图解仅仅根据了极为一般的情况,即只是说明了沉积物通过直接和短途搬运进入邻近盆地而形成的砂岩相的物源区地块性质。这种简单的对应关系既不包括过渡的构造背景,也不适用于那些把沉积物搬运到盆地中的复杂的和在区域上分布广泛的散布体系。实际上,在许多沉积盆地中砂岩岩相都是具有多元物源的,这些物源与盆地有着复杂的古构造和古地理关系。沿碰撞缝合带,各种各样的构造单元可能并列在一起,并且一起抬升遭受剥蚀。如具有上覆冒地槽或地台沉积物的变形的大陆基底,具有下伏火山成因洋壳的叠瓦状深海沉积物,具有火山岩盖层和深成岩基的岩浆弧形的部分变质地台可能共生在一起,因而形成的砂岩相必然具有混合物源区的性质。沿活动的大陆边缘,也有类似的情况。此外,流经性质极不相同构造单元的大的水系也会形成混合物源区岩相。

2. 次生影响因素

风化、搬运和成岩作用不可避免地要破坏不稳定碎屑颗粒,从而影响物源区解释。构造稳定的克拉通地块往往会提高母岩的风化和改造程度,形成富石英的砂,尤其是在热带地区往往形成第一旋回的石英砂岩。与其相反,暴露于干旱或冰川地区的克拉通则形成长

石砂岩相。前已述及,在母岩具有可比性的条件下,来自潮湿地区的砂比干旱地区的砂富含石英质。因此,任何只涉及石英含量变化的岩相差异可能是古气候引起的,而不是构造作用的结果。搬运过程中的磨蚀作用也会降低不稳定颗粒的丰度,但从目前的研究来看,似乎对物源区构造背景的判别影响不大。在成岩作用过程中,碎屑颗粒的溶解和交代作用会相对提高石英质颗粒的丰度。一般而言,遭受强烈的溶解和交代作用的砂岩不适宜进行物源区分析。

3. 统计方法

Dickinson 等建立的物源区判别图解,要求按照 Gazzi-Dickinson 点计法统计碎屑成分的相对含量,否则不具有可比性。与传统统计方法不同, Gazzi-Dickinson 点计法把较大的岩屑内出现的单晶矿物晶体和其他砂粒级的颗粒 ($>0.0625\text{mm}$) 都作为单矿物统计,并且把岩屑的基质部分和矿物晶体或颗粒 ($>0.0625\text{mm}$) 分别计入相应的岩屑和矿物成分中去(方法详见 Zuffa, 1985)。精度高的研究尚需对长石进行染色。

显而易见,在进行物源区构造背景分析时,应选择成岩作用轻微的样品,严格按照 Gazzi-Dickinson 点计法统计,这样取得的数据才具有可比性。物源区判别图解有助于物源区的构造背景分析,但只有结合其他地质证据时才能得出恰当的结论。

结 语

以上简单地论述了砂岩中主要碎屑成分的物源区意义及重建物源区的一些基本方法。详细考察这些方法可以发现,它们或是从已知物源区到未知物源区,或是由现代沉积到古代沉积这一比较沉积学的途径发展起来的,因而具有很大的实用性。每一种方法都有局限性,因而在进行物源区分析前应根据研究的问题和实际地质情况仔细地选择研究方法,以避免得出不恰当的结论。最后应当强调,虽然有许多新技术业已引进到物源区分析领域,但薄片观察仍然是最基本和有效的方法。王东坡教授审阅全文,校阅部分引用的英文文献中译段,提出修改意见,在此深表谢意。

主要参考文献

- Basu, A., 1985, Influence of climate and relief on compositions of sands released at source areas: in Zuffa, G. G., ed., *Provenance of Arenites*; Dordrecht, Holland, D. Reidel, pp. 1-18.
- Basu, A., 1985, Reading provenance from detrital quartz: in Zuffa, G. G., ed., *Provenance of Arenites*; Dordrecht, Holland, D. Reidel, pp. 231-247.
- Dickinson, W. R., 1988, Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins, in Kleinspehn, K. L., and Paola, C., eds., *New perspectives in Basin Analysis*, New York, Springer-Verlag, pp. 3-25.
- Helmold, K. P., 1985, Provenance of feldspathic sandstones—the effect of diagenesis on provenance interpretations a review, in Zuffa, G. G., ed., *Provenance of Arenites*; Dordrecht, Holland, D. Reidel, pp. 139-163.
- Mack, G. H., and Jerzykiewicz, T., 1989, Detrital modes of sand and sandstone derived from andesitic rocks as a paleoclimatic indicator: *Sediment. Geol.* Vol. 65, pp. 35-44.
- Suttner, L. J., and Dutta, P. J., 1986, Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy: *Jour. Sed. Petrology*, pp. 329-345.