

文章编号: 1671-1505(2017)01-0175-10 DOI: 10.7605/gdxb.2017.01.014

物源分析的一个误区: 砂粒在河流搬运过程中的变化*

胡修棉

南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

摘 要 长期以来, 中国沉积学界存在一个认识误区, 认为“碎屑物质在流水搬运过程中, 其不稳定成分逐渐变少, 粒度逐渐变小, 圆度逐渐变好”, 并把这一认识错误地运用到对砂岩的物源分析中。作者基于文献调研和现代河流砂研究成果, 评述了关于砂粒的不稳定矿物含量、磨圆度、粒度这 3 个重要参数的研究进展, 认为河流搬运过程中砂粒并没有向下游出现明显的不稳定矿物丢失, 粒度和磨圆度也没有明显变化, 这 3 个参数与搬运距离并无必然关系。因此, 根据长石、岩屑、不稳定重矿物的多寡以及粒度大小、磨圆度好坏来推测砂岩物源区的距离远近是缺乏科学依据的。

关键词 河流砂 搬运 物源分析 沉积学 磨圆度 碎屑矿物

作者简介 胡修棉, 男, 1974 年生, 博士, 南京大学教授, 博士生导师, 主要从事沉积地质学研究和教学工作。E-mail: huxm@nju.edu.cn。

中图分类号: P512.31 文献标志码: A

A misunderstanding in provenance analysis: Sand changes of mineral, roundness, and size in flowing-water transportation

Hu Xiumian

School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu

Abstract There is a big misunderstanding in the community of Chinese sedimentologists and was written into the textbooks since 1970s, that is, “during sediment transport in flowing water, unstable minerals will be eliminated, while the surviving minerals become rounded progressively, and minerals sizes get smaller”. This idea was wrongly applied in sandstone provenance analysis. This paper overviewed the literatures over one century on this topic, and introduced the research advances of modern river sand studies, especially on the physic controls of sand mineral, roundness, size during transportation. Numerous studies in big rivers sands in the world indicated that the unstable minerals such as olivine, pyroxene, amphibole, feldspars and lithic grains survive in thousands of kilometers transportation, while the sand size do not get smaller and sand roundness do not increase with distance downstream. Therefore, the idea to infer distance of provenance based on the amount of unstable minerals, size, and roundness of sand-

谨以此文祝贺冯增昭教授九十华诞。

* 国家杰出青年基金项目 (编号: 41525007) 和国家自然科学基金项目 (编号: 41472081) 共同资助。[Co-funded by the Chinese National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (No. 41525007) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41472081)]

收稿日期: 2016-12-02 改回日期: 2016-12-15

stones is not based on scientific investigation, and should be corrected in the textbooks.

Key words river sand, transportation, provenance analysis, sedimentology, roundness, detrital mineral

About the author Hu Xiumian, born in 1974, is a professor in Nanjing University. He is engaged in sedimentary geology, mainly in the Himalaya-Tibet areas. E-mail: huxm@nju.edu.cn.

物源分析是根据沉积岩(物)来推断物源区的岩石学特征、沉积作用发生时的气候条件和大地构造背景(Pettijohn *et al.*, 1975),可为古地理、古气候重建提供最基本的材料,对大到板块构造属性、小到区域断裂性质的判断均有重要的指示作用(王成善和李祥辉, 2003)。物源分析在当今沉积地质学的前沿领域如“源-汇系统”、沉积大地构造、构造古地貌、古气候、储集层预测与勘探等方面发挥着越来越重要的作用(Weltje and von Eynatten, 2004; 王建刚和胡修棉, 2008; 马收先等, 2014; Garzanti, 2016)。

物源分析的前提是了解沉积物在风化、搬运、沉积、成岩过程中所经历的变化(图 1)。然而,中国沉积学界对物源分析长期以来存在着一些误区,直接限制了该领域的发展。过去的一些研究没有充分考虑到沉积物从风化到埋藏成岩过程的复杂性。离开对沉积物所经历的各个阶段及其对碎屑组分、结构变化的具体影响的了解,精确物源分析的愿望就很难变为现实(Garzanti, 2016)。

基于笔者研究经历,在文献调研基础上,试图

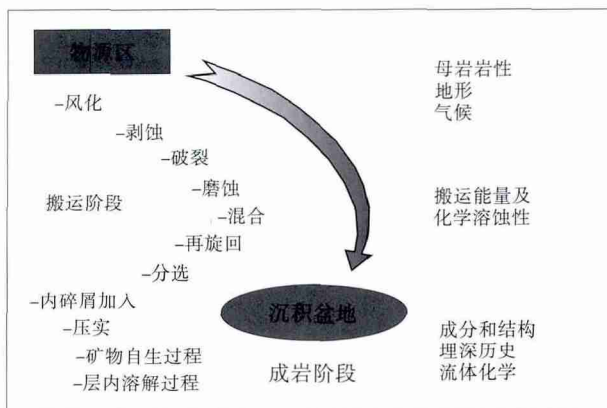


图1 碎屑物风化、剥蚀、搬运、沉积、成岩过程所经历的可能的变化和需要考虑的因素(据 Weltje and von Eynatten, 2004)

Fig. 1 Main steps in sediment evolution and principal processes that modify the composition of clastic sediments along the pathway from source area to sedimentary basin (after Weltje and von Eynatten, 2004)

对物源分析方面的一个误区: 河流搬运过程中砂粒的变化, 谈谈看法。由于笔者认识和水平有限, 错误和不当之处敬请学界同仁批评指正。

1 认识的由来

迄今为止, 国内《沉积岩石学》教材都无一例外地论述“碎屑颗粒在长距离的流水搬运过程中, 由于颗粒间的碰撞、摩擦, 流水对颗粒的分选以及继续着的化学分解和机械破碎, 使得它们在矿物成分、粒度、分选性和形状上都要发生变化”(刘宝珺, 1980; 曾允孚和夏文杰, 1985)。“总之, 碎屑物质在流水搬运过程中, 其不稳定成分逐渐变少, 粒度逐渐变小, 圆度逐渐变好, 这些是变化的总趋势。搬运的时间及距离越长, 这些变化就越明显。碎屑物质在流水搬运过程中的这些变化, 都会在碎屑沉积物及碎屑沉积岩的岩性特征上反映出来”(朱筱敏, 2008)。

在评述以上论述之前, 先来看看这个写进教材的“认识”是如何获得的。教材引用的图(图 II-17, 刘宝珺, 1980)来自 1941 年芝加哥大学克鲁宾(W. C. Krumbein)在期刊 *Journal of Geology* 以“The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments”(磨蚀作用对岩屑的大小、形状和圆度的影响)为题发表的论文(Krumbein, 1941)。他用 27 个直径 45~54 mm、棱角状的灰岩砾石(平均初始球度 0.65, 平均初始圆度 0.13, 平均重量 155 g)进行滚筒实验。实验进行了 20 h [滚筒转动的距离为 32.19 km (20 miles)], 连同初始值获得了 14 组数据(包括圆度、球度、粒度等 3 个变量)。正如 Krumbein 在文末所强调的: 本实验仅仅关注的是灰岩砾石的磨蚀情况, 限于实验材料、介质、时间等参数的选择, 其结果并不能代表自然界河流砂的实际情况; 并且, 滚筒实验方法背后单一的物理学原理也不足以解释和模拟自然界河流砂复杂的搬运过程。

事实上, 现代河流砂的大量研究也表明, 前述

认识仅仅局限在早期简单实验中的砾石颗粒,并不适用于砂和砂岩,但却以普适原理的形式进入1980年的教材中(刘宝珺,1980),并一直出现在中国现行的不同版本的《沉积岩石学》教材中(方邨森和任磊夫,1987;朱筱敏,2008)。原本针对灰岩砾屑在不充分模拟条件下磨蚀作用的研究结果,被泛化到砂岩,并以讹传讹,误导了中国几代沉积学和相关学科的师生和研究者。这一认识误区如不及时纠正,势必会继续误导中国砂岩物源分析工作的深入开展。

2 流水搬运过程中砂矿物成分的变化

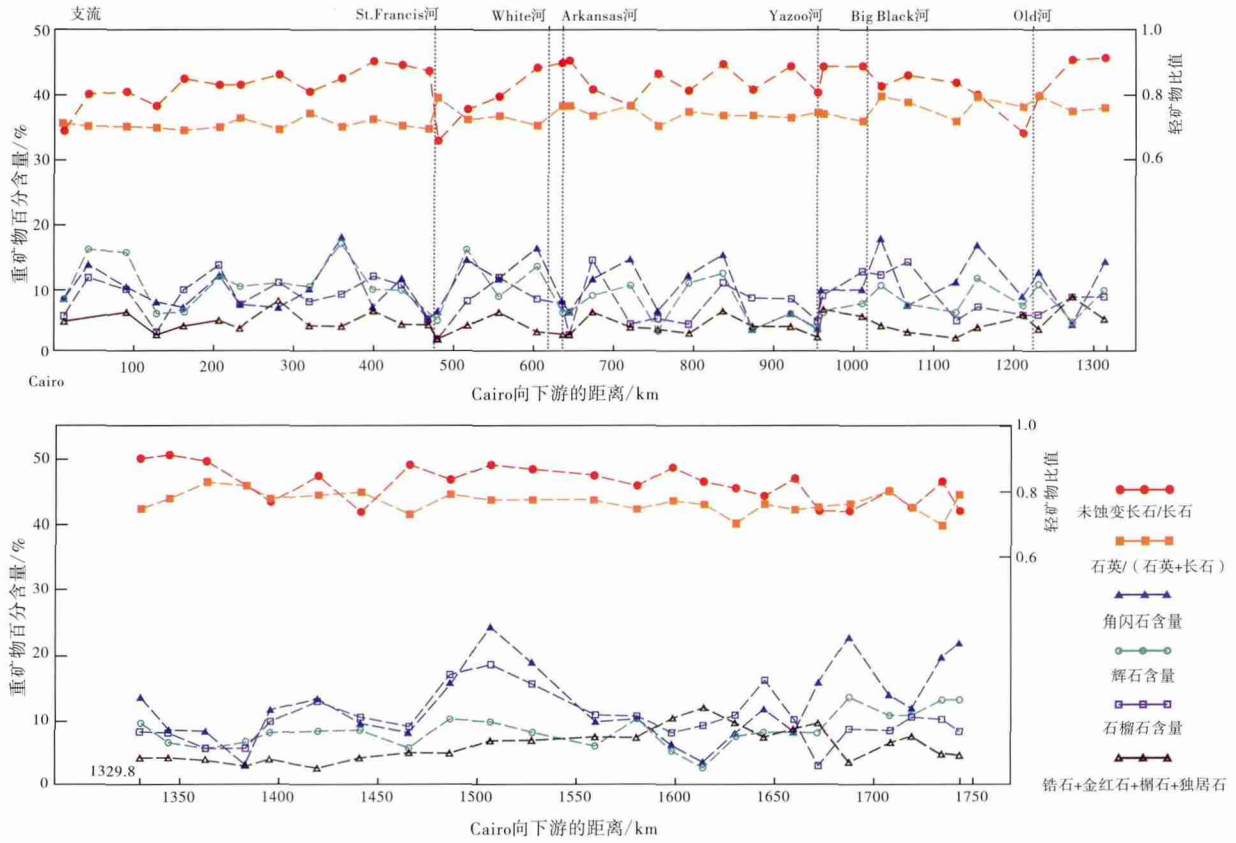
由于矿物硬度不一,脆性程度不一,早期地质学家根据土壤风化过程中矿物的稳定性,推测流水搬运过程中软的、脆性的矿物(长石、辉石、角闪石)会先磨蚀耗损,而石英、锆石、金红石、电气石等抵抗流水磨蚀的能力强。这一认识得到古老的沉积岩样品的支持,因为许多老的沉积岩中更富集抗风化能力强的矿物,而很少见到辉石、角闪石等抗风化能力弱的矿物。实际上,土壤风化过程主要为化学风化作用,与流水搬运过程中矿物的稳定性是2个不同的地质作用,除非流水搬运过程中也发生了明显的化学风化作用。

研究流水搬运过程中矿物的稳定性最好的方法是研究现代河流搬运过程中的矿物组成变化。早先,Mackie(1897)研究了苏格兰 Findhorn 河的长石,发现48.28~64.37 km(30~40 miles)的搬运距离长石含量从42%减少到21%;他在苏格兰 Spey 河也获得同样的研究结果。实际上,该研究并没有考虑样品的粒度、分选等因素,把矿物成分的变化完全归结于搬运距离这个因素。Martens(1931)研究海滩砂的长石,也发现随着搬运距离增大长石出现减少的现象。Pettijohn(1931)、Pettijohn 和 Ridge(1933)研究了湖泊沙滩的重矿物,发现重矿物系统性的变化是由于搬运介质的分选作用造成的,而不是磨蚀或其他因素。Russell(1936,1937)、Russell 和 Taylor(1937)对密西西比河流砂开展了详细研究,堪称该领域的经典工作。其研究对象为密西西比河下游,所采集的600余河床砂样品覆盖了从伊利诺斯州 Cairo 到墨西哥湾1770 km(1100 miles,平均梯度为1.76 m/km)的主干河流和支流。Russel(1937)的研究发现,

尽管搬运距离超过1770 km,但河流搬运过程对矿物组成的影响却极小(图2)。唯一成分变化明显的是在100目粒径(颗粒大小0.147~0.208 mm,细砂)中长石含量从25%减少到20%;而在全粒径统计中,长石含量基本不变,辉石和角闪石的含量没有变化,锆石、钛铁矿、电气石、独居石保持稳定,仅在临近入海下游289.68 km(180 miles)略有增加,石榴石含量基本保持稳定,向下游略有增加。Russell(1937)在文末忍不住感叹“沉积物中出现‘抗磨蚀弱’的矿物,尤其是长石和磁性矿物,通常被认为是近源的证据。反过来,人们据此推测,这些矿物的缺乏很可能是不超过几百千米搬运的结果。这个假说是没有事实基础的,就像 Werner 认为岩石都是诺亚洪水形成的一样,尽管曾经广为接受,但却是大众的一种可能的推测,而不是基于观察数据之上的。”

Van Andel(1950)对莱茵河(Rhine)、Whetten等(1969)对美国西北部 Columbia 河的研究都再次验证了 Russel(1937)的结果,即不稳定的砂矿物组分经过长距离的搬运并没有消失。相反,在河流的下游仍然存在大量的被认为“不稳定”的矿物,如长石、岩屑、斜方辉石、单斜辉石、角闪石等。Potter(1978)研究了除前苏联和中国之外的全球36条大河的砂组成,他发现其中的许多河流在入海之前的砂粒仍以富集岩屑为特征(如 Po, Fraser, Ebro, Rhone, Amazon 等)(图3-A),且又可以细分为富集沉积岩岩屑、变质岩岩屑和火山岩岩屑的河流(图3-B)。这进一步说明河流砂中的各类不稳定岩屑并没有由于长距离(超过几千千米)的搬运而消失。

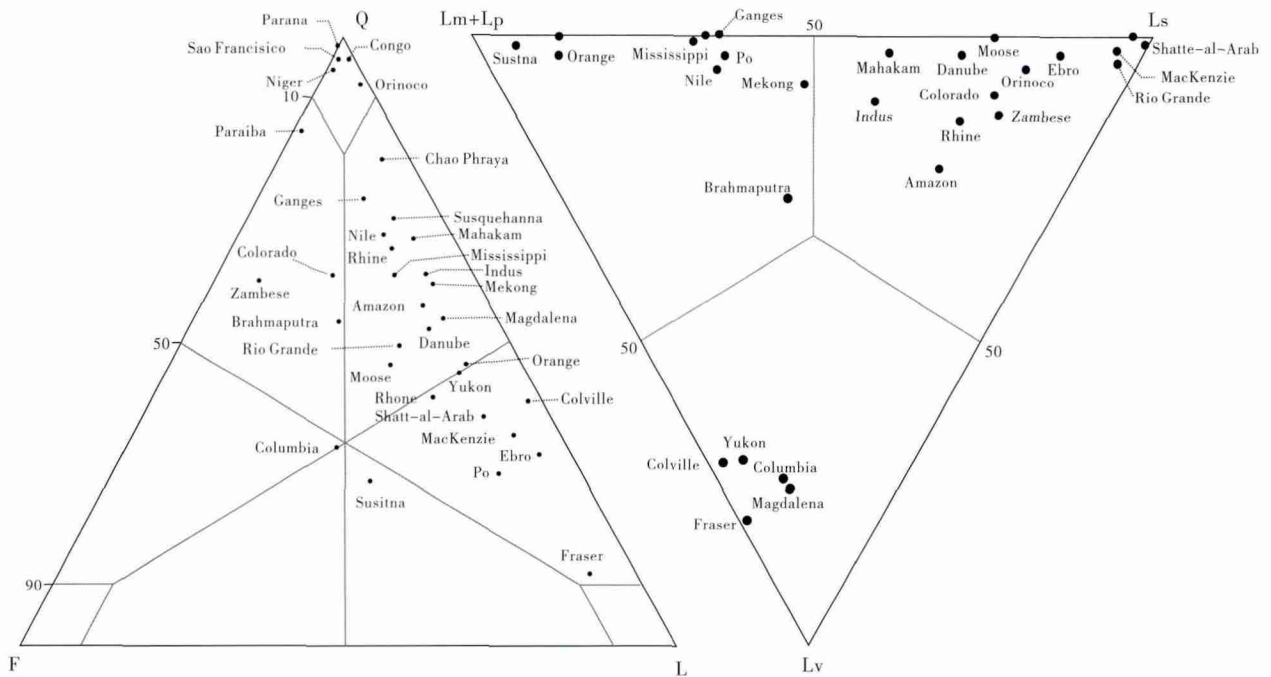
Shukri(1950)基于尼罗河(Nile)流域从上游到下游超过4500 km的河流砂中都出现新鲜的玄武岩岩屑、辉石、橄榄石等矿物而认为河流搬运距离对矿物组分的影响可以忽略不计。最近, Garzanti 等(2015a)针对尼罗河河流砂的系统性工作再次巩固了该认识。在上游苏丹地区,砂坝样品的岩屑/石英比值、辉石/角闪石比值分别为 0.35 ± 0.22 、 3.0 ± 0.7 ; 橄榄石含量占透明重矿物的 $1.7\% \pm 1.7\%$; 在下游埃及的 Aswan 高坝附近的砂坝样品中,岩屑/石英比值、辉石/角闪石比值 0.32 ± 0.19 和 3.4 ± 2.1 ; 橄榄石含量占透明重矿物的 $0.7\% \pm 0.7\%$; 非洲南部橘子(Orange)河流矿



“距离”为采样点距离采样起点位置伊利诺斯州 Cairo 的距离

图2 密西西比河下游河流砂矿物组成随搬运距离的变化 (据 Russel, 1937)

Fig. 2 Variations in the sands mineral composition with the distance downstream of Mississippi River (after Russel, 1937)



请注意, 统计方法区别于现今流行的 Gazzi-Dickinson 方法。原文统计 200 颗颗粒矿物组分; 对 100 颗岩屑颗粒进一步分类

图3 全球 36 条主要河流 QFL 图解 (A)、Lv-Ls-Lm+Lp 图解 (B) (引自 Potter, 1978)

Fig. 3 Triangular diagram of framework composition: A: QFL diagram; B: Lv-Ls-Lm+Lp (from Potter, 1978)

物成分也得到类似的结果, 从 Lesotho 到 Angolar 南部, 河流和高能波浪沿岸流搬运距离超过 4000 km, 同样出现物源区裂谷玄武岩岩屑和辉石矿物, 矿物组分基本没有变化 (Garzanti *et al.*, 2014, 2015b)。

在中国长江砂的重矿物中, 钙质角闪石、绿帘石、石榴石和普通辉石 4 种矿物的总含量在上游、下游、长江口砂中分别占全部重矿物的 41.9%、75.4%、65.9% (Yang *et al.*, 2009); 进一步研究发现, 长江砂中存在化学组成不同的 6 组角闪石, 占长江砂总重量的 $1.4\% \pm 0.7\%$ (Vezzoli *et al.*, 2016)。同样地, 黄河下游河流砂重矿物也富集角闪石、绿帘石和石榴石 (Nie *et al.*, 2015)。

关于搬运距离对矿物成分的影响, Pettijohn (1975) (中译本为佩蒂庄, 1981; 下同) 错误地采取“肯定”的认识, 他认为“关于砂级范围中矿物选择性磨损和消失的证据尚有些不清楚。可以想象, 较软的和更易劈开的终会因磨蚀而遭到破坏, 较坚硬和较耐久的组分自然具有完善的富集”。他列举了滚筒实验下不同矿物对磨损的抵抗力实验结果 (Thiel, 1940) 来支持他的论点, 实际上高估了滚筒实验方法对自然界河流流水搬运过程的代表性。推测中国早期《沉积岩石学》教材正是受到 Pettijohn (1975) 这一错误的倾向性观点的影响。

3 流水搬运过程中砂磨圆度的变化

早期对碎屑颗粒磨圆度与河流搬运之间的关系

的研究仍来自于滚筒实验。Daubrée (1879) 把由不同类型岩屑组成的不同粒径的砂放入滚筒, 发现颗粒的去棱角化速率非常低; 他还发现粒径小于 0.1 mm 的颗粒在滚筒中不会被磨圆。然而, 随后的研究否认了 Daubrée (1879) 的研究结果, 认为砂粒棱角化作用确实是存在的, 粒径大于 0.05 mm 的砂粒都会被磨圆 (Galloway, 1919; Anderson, 1926)。随后, 大量的针对砾石磨圆性的滚筒实验研究表明, 砾石在滚筒中的去棱角化速率远高于砂粒 (Wentworth, 1919; Plumley, 1948)。这些结果被用作砂在搬运过程中被磨圆的证据。然而, 砂和砾的水动力学行为相差悬殊, 自然界流水中砂的磨圆与滚筒实验的结果不一样。

Russell 和 Taylor (1937) 研究了从伊利诺斯州 Cairo 到墨西哥湾 1700 km 的密西西比河主干河流 17 个样品、支流 4 个样品的磨圆度。每个样品用筛析法分为从 10 目 (1.651 mm) 到 200 目 (0.074 mm) 依次变化的粒径。对每一粒径的颗粒统计几百颗 (平均 564 颗) 石英和长石矿物的相对磨圆级别, 进而计算获得磨圆指数。他们的研究发现(图 4): (1) 对于同一个砂样而言, 粒径粗的组分比细的组分磨圆指数高。(2) 砂岩中石英含量越高, 磨圆指数越低, 磨圆度越差。(3) 砂岩的粗粒粒径 (35 目、48 目、65 目) 向下游方向磨圆度降低, 而最细粒组分 (150 目、200 目) 基本恒定不变, 向下游仅出现极微小增加。中间粒径的组分磨圆度向下游忽高忽低, 规律不明显。(4) 全粒径统计, 向下游砂岩磨圆度变差, 主要

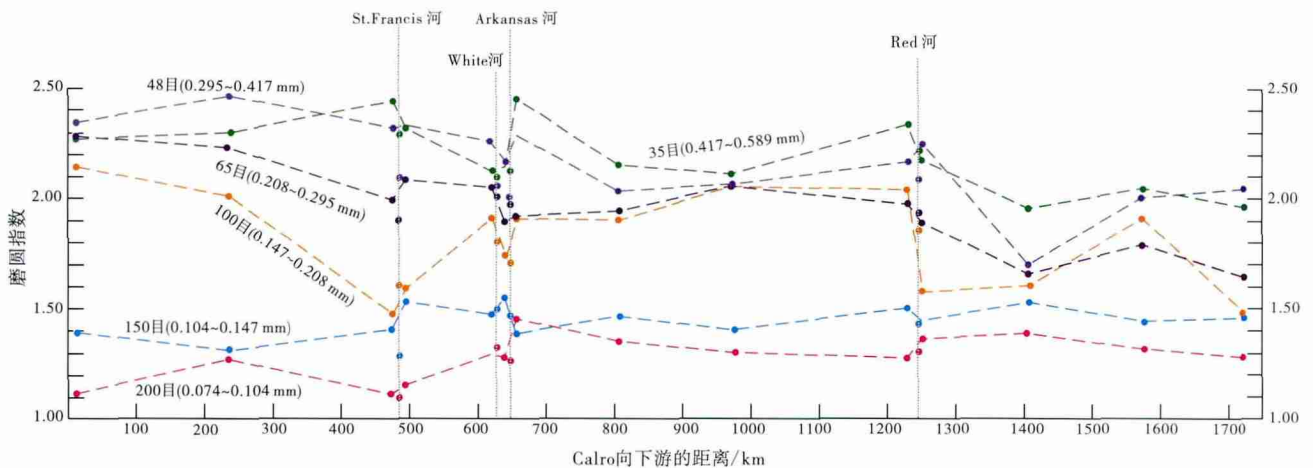


图 4 密西西比河下游河流砂磨圆指数随搬运距离的变化 (据 Russell and Taylor, 1937)

Fig. 4 Relationship between roundness number and distance downstream of the Mississippi River (after Russel and Taylor, 1937)

是下游砂岩中细粒径组分含量增加。(5) 支流输入前后密西西比河的砂岩磨圆度基本没有变化; 支流输入后的主干河流砂岩磨圆度并没有出现预想中的变差, 反而是变好。

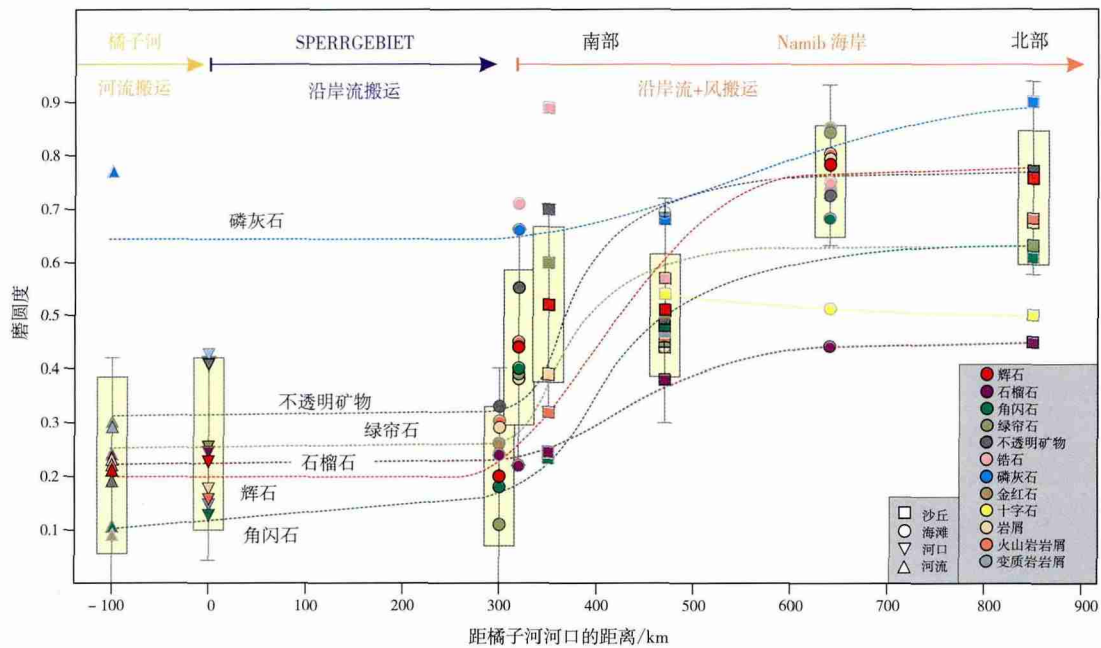
Garzanti 等(2012, 2015b) 系统追踪非洲橘子河一大西洋沿岸流搬运过程中砂的磨圆度变化。他们的研究发现, 从物源区南非和 Lesotho 到橘子河河口, 搬运距离超过 2000 km, 重矿物仍然以磨圆度差为主(图 5), 搬运距离对砂重矿物的圆化没有任何实质贡献。更令人惊讶的是, 从橘子河河口沿岸流搬运 300~350 km 距离, 也没有见到重矿物磨圆度的明显变化, 仍以棱角状为主。作者对前人海滩砂在反复波浪作用下磨圆度变好的认识 (Folk, 1980) 也提出了质疑。他们发现, 在图 5 中的 300~350 km 附近, 海滩砂进入南纳米比亚沙丘, 磨圆度显著变好(图 5), 由此证实风的搬运过程大大提高了砂粒磨圆度。

关于砂的圆化, Pettijohn (1975) 在《Sedimentary Rocks》教材中就曾清晰地表明“所有的野外和实验资料都表明, 砂的圆化与砾石的圆化不同, 那是一个很慢的过程。”他分别引用 Daubrée (1879)、Marshall (1927)、Thiel (1940)、Kuenen

(1960) 的室内滚筒或水槽实验结果, 认为自然界几百千米到几千千米的河流搬运不可能圆化砂粒。同时 Pettijohn (1975) 还引用 Russel 和 Taylor (1937)、Mazzoni 和 Spalletti (1972) 等对密西西比河砂、阿根廷 Rio Grande 河沙的研究, 说明河流搬运距离对砂的磨圆度影响甚小。同样, 国内《沉积岩石学》教材(刘宝珺, 1980) 对以上研究并没有给予充分的重视, 也没有正确对待 Pettijohn (1975) 的评述。

4 流水搬运过程中砂粒径的变化

早期对碎屑颗粒粒径与河流搬运之间关系的研究来自于对现代河流砾石的调查。Sternberg (1875) 测量了莱茵河谷 289.68 km 距离砾石的最大粒径和平均粒径, 发现砾石粒径向下游方向降低, 并提出水中砾石的重量和搬运的距离与砾石粒径成反比。之后, 大量的现代河流砾石的调查支持了向下游方向砾石粒径减少的认识, 如美国南达科他州 Black Hills 地区 3 条河流的阶地砾石(Plumley, 1948)、美国阿拉斯加州 Knik 河砾石(Bradley et al., 1972)、波兰 Dunajec 河(Unrug, 1957) 等。



磨圆度从河流到海洋环境变化极小, 均为磨圆度差;

在图中 300~350 km 附近海滩砂进入南纳米比亚沙丘, 磨圆度显著变好

图 5 非洲橘子河到南安哥拉河流—沿岸流搬运距离与矿物磨圆度变化趋势 (据 Garzanti et al., 2015b)

Fig. 5 Grain roundness trend along the complete south-north transect from the Orange River to southern Angola, Africa (after Garzanti et al., 2015b)

相比较砾石而言, 流水中的砂粒粒径向下游是否存在像砾石一样的变细现象则一直存在争论。Russell 和 Taylor (1937) 详细研究了密西西比河砂的粒径。他们系统筛析不同粒径的组分, 并称重获得其百分含量。从平均粒径来看, 河流砂的平均粒径与搬运距离之间没有必然的关系(图6), 主要取决于不同沉积环境下的水动力分选作用。另外, 4条支流输入前后粒径也没有明显的变化。

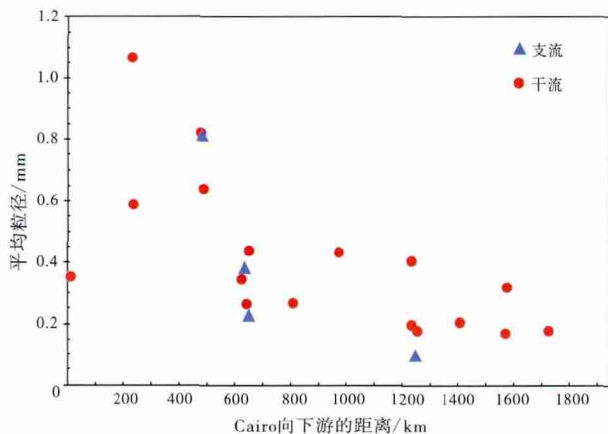


图6 密西西比河搬运距离与河流砂平均粒径图

(砂平均粒径据 Russell and Taylor, 1937, 原文表3计算获得)

Fig. 6 Variation of averaged grain size trends with the distance downstream of the Mississippi River (the average grain size of the sample is calculated from the data of the Table 3 from Russell and Taylor, 1937)

最近, 尼罗河河流砂研究再次证明了向下游方向砂粒粒径并没有减小 (Garzanti *et al.*, 2015a)。蓝色尼罗河点砂坝 (Sennar-Khartoum 段) 主要为细一中粒砂 ($1.8 \pm 0.7 \Phi$), 偶尔也出现粗粒砂坝 (图7)。Khartoum 之下砂主要为细一细中粒 ($2.2 \pm 0.4 \Phi$), 偶见几毫米粗砂。埃及 Aswan 高坝之前的砂为细砂 ($2.6 \pm 0.5 \Phi$), 坝下游的砂为粗砂 ($2.1 \pm 0.3 \Phi$), 局部出现细中粒。同样地, 与点砂坝一样, 悬浮组分也没有发现向下游明显变细的趋势(图7)。

关于流水搬运过程中砂粒径的变化, 佩蒂庄 (1975) 认为 “可能在大多数自然环境中很少或者没有因磨蚀作用造成的石英砂粒粒度的减小。简言之, 粒度的分布是水动力作用而不是磨蚀作用的产物, 通常, 实际的粒度是从母岩承袭下来的, 或者是岩石崩解的产物, 而不是搬运营力或作用过程的结果。” Pettijohn (1975) 引用的证据来自砂在

滚筒实验中的磨损情况, 发现 “砂的磨损是一个很缓慢的过程”。但是, 中文教材 (刘宝珺, 1980) 则对 Pettijohn (1975) 的论述没有引起足够的重视, 而是进行了演绎 “颗粒在河流中的长距离搬运, 由于河床或者颗粒彼此间的摩擦与碰撞作用, 使得颗粒的粒度逐渐变小, 一般地讲, 搬运距离越长越是这样” (刘宝珺, 1980)。

5 对砂岩物源分析的启示

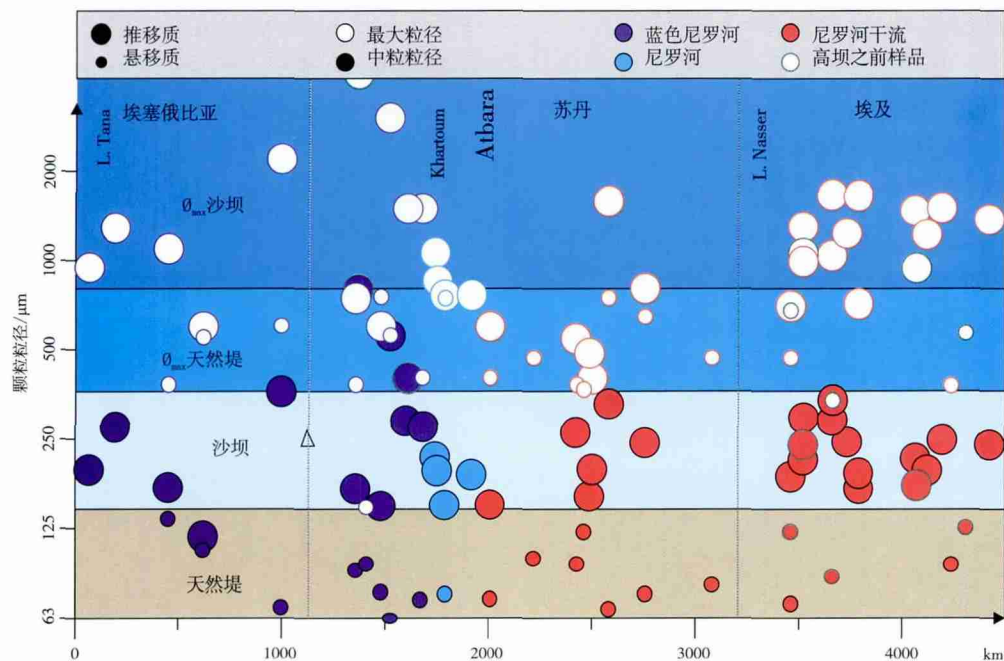
“碎屑物质在流水搬运过程中, 其不稳定成分逐渐变少, 粒度逐渐变小, 圆度逐渐变好, 这些是变化的总趋势” (朱筱敏, 2008)。该认识在河流沉积的物源分析方面具有以下几个潜在的推论: (1) 砂或砂岩中如果不稳定组分多, 则为近源, 不稳定组分少则为远距离搬运; 即富长石或岩屑的陆源碎屑岩为近源堆积; 富石英的陆源碎屑岩为长距离搬运的产物; (2) 磨圆度好的陆源碎屑岩经历了长距离的搬运, 反之磨圆度差的陆源碎屑岩为近源堆积; (3) 颗粒细的砂岩比颗粒粗的砂岩在流水中搬运的距离更长。根据前文论述, 以上这些推论是与现代河流观察数据相矛盾的。

基于前面的讨论, 对于砂粒而言, 影响成分成熟度的长石、岩屑、不稳定组分重矿物等的出现和消失, 与搬运距离没有必然的关系: 岩屑砂岩、长石砂岩也可以出现在长距离搬运的河流沉积中。影响结构成熟度的磨圆度与搬运距离也没有必然的关系, 河流搬运对砂粒的圆化没有实质性的贡献。砂岩的颗粒大小主要由水动力学分选作用造成的, 与搬运距离之间同样缺乏必然的关系。

砂岩中矿物成分变化主要由化学风化作用、成岩作用影响。成分成熟度高的砂岩是沉积物在强烈化学作用或者较高的成岩温度—压力下, 不稳定组分溶解消失掉之后的产物。另外, 砂岩的再旋回作用对于不稳定颗粒的消失、磨圆度也有非常重要的影响。经历一次砂岩的再旋回作用, 成分成熟度大大提高。砂粒的磨圆度由化学风化、风的搬运、成岩作用共同影响。

6 结束语

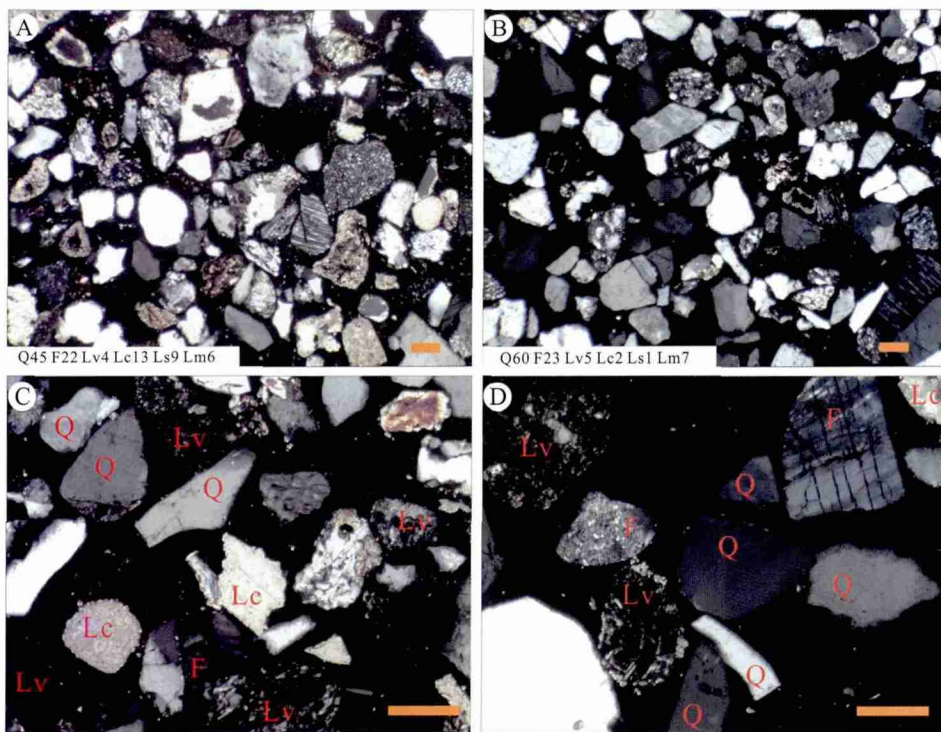
长期以来, 物源分析的一个瓶颈问题是流水搬运过程中是否有物质的损失? 根据现有的《沉积



图中显示从上游 Tana 湖到尼罗河三角洲 4500 km 搬运距离并没有发现粒径向下游变细的趋势

图 7 蓝色尼罗河和尼罗河河流砂粒度与搬运距离分布图 (据 Garzanti *et al.*, 2015a)

Fig. 7 Grain-size trends along the Blue Nile and main Nile from upstream of Lake Tana to the Delta with over ~4500 km distance (after Garzanti *et al.*, 2015a)



A—南京长江大桥长江河流砂组成, 正交偏光, 样品 4505; B—南京栖霞山北长江河流砂组成, 正交偏光, 样品 4759; C—样品 4759 放大照片, 显示碳酸盐亮晶颗粒和棱角状石英; D—样品 4759 放大照片, 显示火山岩岩屑、棱角状石英和长石颗粒。Q 为石英; F 为长石; Lv 为火山岩岩屑; Lc 为碳酸盐岩岩屑; Ls 为其他沉积岩岩屑; Lm 为变质岩岩屑;

图中短线长度为 250 μm。样品信息参见 Vezzoli 等 (2016), 照片由 Garzanti 提供

图 8 南京附近长江河流砂显微岩相学特征

Fig. 8 Micro-petrographical characteristics of river sand in Yangtze River near Nanjing

岩石学》教材, 碎屑物质搬运一定距离后, 不稳定的组分就会减少。这样, 下游的砂物质组成并不能全面反映物源的真实信息。事实上, 流水对砂粒的矿物组分、大小、磨圆都没有明显的改造作用, 那么, 河流下游砂是能够客观反映物源区信息的, 这也为最新的超长河流砂研究所证实 (Garzanti *et al.*, 2015a; Nie *et al.*, 2015; Vezzoli *et al.*, 2016), 这就为砂和砂岩的物源分析减少了一个“变量”。

最近, Vezzoli 等 (2016) 研究了长江河流砂的组成, 发现长江源头及上游河流砂以岩屑石英砂岩为特征; 四川盆地和三峡地区河流砂以出现来自华南峨眉山大火成岩省、古生代基底岩石的基性火山岩、单斜辉石、碳酸盐颗粒为特征; 长江下游为岩屑长石石英砂岩, 角闪石丰富, 并出现绿帘石、单斜辉石和石榴石。定量模拟计算表明长江河流砂主要来自左岸汇入、物源来自龙门山和秦岭的河流 (嘉陵江、岷江、汉江)。从源区搬运到下游南京地区, 河流砂仍然以棱角状、富岩屑为特征 (图8)。

现代河流砂研究表明, 机械破碎作用选择性地磨蚀未固结、耐磨性最差的沉积岩 (如页岩), 而对其他颗粒影响甚微 (McBride and Picard, 1987; Garzanti *et al.*, 2015a)。热、湿气候下化学风化作用对砂组成影响大 (Garzanti *et al.*, 2013); 对于更新世—上新世之前的砂岩, 由于埋藏成岩作用的持续进行, 许多不稳定矿物先后消失, 消失的次序为辉石、角闪石、绿帘石、钛铁矿、矽线石、石榴石 (Morton and Hallsworth, 2007)。因此, 古代砂岩重矿物组分实际上是经过选择性溶解作用残留下来的、不容易溶解的重矿物 (如锆石、电气石、金红石等)。从这个角度来讲, 沉积岩石学所强调的成分成熟度、结构成熟度的概念及其所反映的物源信息都需要重新认识 (Garzanti, 2017)。

随着单矿物 (如锆石) 同位素测年和同位素技术的迅猛发展, 物源分析可以深入到特定的矿物、特定的物源性质 (von Eynatten and Dunkl, 2012)。然而, 忽视对搬运沉积过程的研究, 会导致在实际的数据解释中出现这样那样的误区。例如, 磨圆的锆石、棱角状的锆石等重矿物是否能用来指示沉积地区距离物源区的距离? 不稳定重矿物比较富集的砂样是否一定来自于近源沉积? 从现代

河流砂研究来看, 利用不稳定矿物组分或磨圆度等证据来推测搬运距离是需要谨慎处理和讨论的。

中国有世界上最大的地形差, 发育有超长的世界级大江大河, 有复杂的地质历史。开展河流砂的深入研究具有特别重要的意义。然而, 中国开展的有关河流砂组成、结构等的研究, 直到最近才有零星的研究成果, 系统性的调查和研究工作仍然缺乏, 在这个阶段, 纠正一些长期存在的认识误区, 对于沉积学、物源分析及相关学科的发展都会产生积极的推动作用。

致谢 感谢合作者 E. Garzanti 教授帮助我了解现代河流砂研究的价值和意义, 与他的长期合作与讨论对于本文的撰写受益匪浅。感谢课题组毕业和在读的研究生安慰、王建刚、孙高远、赖文、马安林、许艺炜、李超等在实际研究过程中的有益讨论。感谢许艺炜、薛伟伟、李超对部分图件的清绘、文字核对等。

此文献给中国沉积学界前辈冯增昭先生。值冯先生 90 华诞, 对先生勤奋工作、身先士卒、鞠躬尽瘁的奋斗精神表达由衷的崇敬之意, 真乃我辈学习之楷模。

参考文献 (References)

- 方邝森, 任磊夫. 1987. 沉积岩石学教程. 北京: 地质出版社, 40-42. [Fang Y S, Ren L F. 1987. Sedimentary Petrology Course. Beijing: Geology Publishing House, 40-42]
- 刘宝珺. 1980. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 45-48. [Liu B J. 1980. Sedimentary Petrology. Beijing: Geology Publishing House, 45-48]
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2014. 轻矿物物源分析研究进展. 岩石学报, 30(2): 597-608. [Ma S X, Meng Q R, Qu Y Q. 2014. Development on provenance analysis of light minerals. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 597-608]
- 佩蒂庄, 著. 李汉瑜等, 译. 1981. 沉积岩. 北京: 石油工业出版社, 44-47, 54-59, 529-531, 550-554. [Pettijohn F J (author), Li H Y, *et al.* (translator). 1981. Sedimentary Rocks (Chinese version). Beijing: Petroleum Industry Press, 44-47, 54-59, 529-531, 550-554]
- 王成善, 李祥辉. 2003. 沉积盆地分析原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 86-116. [Wang C S, Li X H. 2003. Sedimentary Basin from Principles to Analysis. Beijing: Higher Education Press, 86-116]
- 王建刚, 胡修棉. 2008. 砂岩副矿物的物源区分析新进展. 地质论评, 54(5): 670-678. [Wang J G, Hu X M. 2008. Application of geochemistry and geochronology of accessory minerals in sandstone to provenance analysis. Geological Review, 54(5): 670-678]
- 曾允孚, 夏文杰. 1985. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 35-37. [Zeng Y F, Xia W J. 1986. Sedimentary Petrology. Beijing: Geology

Publishing House 35-37]

朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社, 23-24. [Zhu X M. 2008. Sedimentary Petrology (The 4th edition). Beijing: Petroleum Industry Press 23-24]

- Anderson G. 1926. Experiments on the rate of wear of sand grains. The Journal of Geology 34(2): 144-158.
- Bradley W, Fahnestock R, Rowekamp E T. 1972. Coarse sediment transport by flood flows on Knik River, Alaska. Geological Society of America Bulletin 83(5): 1261-1284.
- Daubrée A. 1879. Etudes synthétiques de géologie expérimentale. Dunod, Paris 828.
- Folk R. 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing CO., Austin, Texas, 185.
- Galloway J J. 1919. The rounding of grains of sand by solution. American Journal of Science 280: 270-280.
- Garzanti E. 2016. From static to dynamic provenance analysis: Sedimentary petrology upgraded. Sedimentary Geology 336: 3-13.
- Garzanti E. 2017. The maturity myth in sedimentology and provenance analysis. Journal of Sedimentary Research in press.
- Garzanti E, Andò S, Vezzoli G, Lustrino M, Boni M, Vermeesch P. 2012. Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. Earth-Science Reviews 112(3): 173-189.
- Garzanti E, Andò S, Padoan M, Vezzoli G, El Kammar A. 2015a. The modern Nile sediment system: Processes and products. Quaternary Science Reviews 130: 9-56.
- Garzanti E, Garzanti E, Resentini A, Andò S, Vezzoli G, Pereira A, Vermeesch P. 2015b. Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola). Sedimentology, 62(4): 971-996.
- Garzanti E, Padoan M, Andò S, Resentini A, Vezzoli G, Lustrino M. 2013. Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate: Sand petrology and geochemistry in the East African Rift. The Journal of Geology 121(6): 547-580.
- Garzanti E, Padoan M, Setti M, López-Galindo A, Villa I M. 2014. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). Chemical Geology 366: 61-74.
- Krumbein W. 1941. The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments. The Journal of Geology, 49(5): 482-520.
- Kuenen P H. 1960. Experimental abrasion of sand grains. 21st Session Int. Geol. Congr. Norden (10): 50-53.
- Mackie W. 1896. The sands and sandstones of eastern Moray. Transactions of the Edinburgh Geological Society 7(3): 148-172.
- McBride E F, Picard D M. 1987. Downstream changes in sand composition, roundness and gravel size in a short-headed, high-gradient stream, Northwestern Italy. Journal of Sedimentary Petrology, 57: 1018-1026.
- Marshall P. 1927. The wearing of beach gravels. Transactions of the Royal Society of New Zealand, 58(4): 507-532.
- Martens J H C. 1931. Persistence of feldspar in beach sand. American Mineralogists, 16: 526-531.
- Mazzoni M M, Spalletti L A. 1972. Sedimentología de las arenas del Río Grande de Jujuy. Rev. Mus. La Plata (ms.) Sec. Geol. 8: 35-117.
- Morton A C, Hallsworth C. 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. Developments in Sedimentology 58: 215-245.
- Nie J, Stevens T, Rittner M, Stockli D, Garzanti E, Limonta M, Bird A, Andò S, Vermeesch P, Saylor J, Lu H, Breecker D, Hu X, Liu S, Resentini A, Vezzoli G, Peng W, Carter A, Ji S, Pan B. 2015. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment. Nature Communications, 6: 8511. doi: 10.1038/ncomms9511.
- Pettijohn F. 1931. Petrography of the beach sands of southern Lake Michigan. The Journal of Geology, 39: 432-455.
- Pettijohn F. 1975. Sedimentary Rocks. 3rd. Harper & Row New York: 484.
- Pettijohn F J, Ridge J D. 1933. A mineral variation series of beach sands from Cedar Point Ohio. Journal of Sedimentary Research 3(2): 92-94.
- Plumley W J. 1948. Black Hills terrace gravels: A study in sediment transport. The Journal of Geology, 56(6): 526-577.
- Potter P E. 1978. Petrology and chemistry of modern big river sands. The Journal of Geology, 86(4): 423-449.
- Russell R D. 1936. The size distribution of minerals in Mississippi River sands. Journal of Sedimentary Research 6(3): 125-142.
- Russell R D. 1937. Mineral composition of Mississippi River sands. Geological Society of America Bulletin 48(9): 1307-1348.
- Russell R D, Taylor R E. 1937. Roundness and shape of Mississippi River sands. The Journal of Geology, 45(3): 225-267.
- Shukri N M. 1950. The mineralogy of some Nile sediments. Quarterly Journal of the Geological Society, 106(1-4): 511-534.
- Sternberg H. 1875. Untersuchungen über längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. Zeitschr. Bauwesen 25: 483-506.
- Thiel G A. 1940. The relative resistance to abrasion of mineral grains of sand size. Journal of Sedimentary Research, 10(3): 102-124.
- Unrug R. 1957. Recent transport and sedimentation of gravels in the Dunajec valley (western Carpathians). Acta Geologica Polonica 7: 217-257.
- van Andel T H. 1950. Provenance, transport and deposition of Rhine sediments: A Heavy Mineral Study on River Sands from the Drainage Area of the Rhine. H. Veenman en Zonen, Wageningen, Netherlands: 129.
- Vezzoli G, Garzanti E, Limonta M, Andò S, Yang S. 2016. Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets. Geomorphology, 261: 177-192.
- von Eynatten H, Dunkl I. 2012. Assessing the sediment factory: The role of single grain analysis. Earth-Science Reviews, 115(1-2): 97-120.
- Weltje G J, von Eynatten H. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: Review and outlook. Sedimentary Geology, 171(1): 1-11.
- Wentworth C K. 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. The Journal of Geology 27(7): 507-521.
- Whetten J T, Kelley J C, Hanson L G. 1969. Characteristics of Columbia River sediment and sediment transport. Journal of Sedimentary Research 39(3): 1149-1166.
- Yang S, Wang Z, Guo Y, Li C, Cai J. 2009. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. Journal of Asian Earth Sciences 35(1): 56-65.

(责任编辑 郑秀娟)