

张家界甘溪砾石沉积物粒度的空间变化及其原因

王随继, 闫云霞, 颜 明, 贺 莉, 方海燕, 王彦君

(中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要:以往研究沉积物粒度分布规律时,主要局限于砂质沉积物,至多涉及细砾,对于卵砾、卵石、漂石等粗大砾石沉积物的粒度分布规律很少涉及。以张家界山地河流甘溪现代砾石沉积物为研究对象,样品的颗粒粒径介于23~663 mm,分析了河床、心滩和河岸沉积物样品的累积频率分布曲线。结果表明,这些河流砾石沉积物具有较好的统计规律和空间变化趋势,其分布特征可以用累积频率曲线来表达,一般呈现出清晰的两段式或三段式分布特征,是对不同水位洪水动力的响应。粒度参数反映出这些砾石沉积物具有较好的分选性和球度。河道砾石的中值粒径沿程变小,反映了河流水动力沿程变小的规律。岩壁崩塌的砂岩块体短期难以受到流水的充分改造,使河流沉积物的峰态呈现多样化;漂石及卵石缝隙间拦截了低水位洪水所携带的部分较细砾石,引起河道砾石沉积物呈现负偏。该项研究对于山地河流巨大碎屑沉积物的定量研究具有启示作用。

关 键 词:山地河流;沉积物;砾石;卵石;漂石;粒度分布;张家界甘溪

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.01.004

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

1 引言

对于张家界砂岩峰林地貌的特征及成因,目前已有一些相关研究工作。例如,胡慧萍(2011)利用遥感影像数据,估算石峰高度并统计石峰数量;Yang等(2011)通过张家界景区河流阶地样品的测年分析认为,该区砂岩峰林地貌景观出露于中更新世中期,是地壳上升、气候变化等引起河流下蚀作用而形成。显然,地壳上升以及气候变化分别提供了河流侵蚀的地貌条件和水流条件,而河流侵蚀和物质搬运则是形成峰林地貌的必要条件。倪志云等(2011)的研究表明,张家界砂岩峰林地貌的水流切割开始于第四纪初期,与地壳的隆升相伴。河流侵蚀是这些峰林地貌形成的主要外营力,而该区现代河道中砾石物质的区域分布及其规律性则是反映河流动力变化的依据之一。因此,本文研究主要针对张家界典型山地河流的碎屑沉积物的空间变化,以揭示碎屑物的粒度分布规律,及其对水动力环境的反映。

沉积物粒度及其分布特征是沉积学研究中的

重要研究对象,常常用于判断流水动力大小及沉积环境的差异。过去的工作多是对于古沉积环境中形成的岩石及现代沉积物的研究(Kristin et al, 2004; Lisle, 1995; Marion et al, 2003),碎屑物粒级基本局限于较细砾石及其以下。Udden(1914)和Wentworth(1922)的粒度分类多年来广泛应用在沉积物粒度的分析中,但其分类的最大粒级在-5 ϕ (32 mm),未能包含一些更大的碎屑物。因此,该分类难以用于山地河道巨型碎屑物的定量研究。

近期,一些粒度分类工作对特殊沉积环境中的巨型碎屑物分布的研究需要,将上述分类进行了拓展(Blair et al, 1999; Simon et al, 2001)。通常,粒度大于2 mm的碎屑物被称作砾石(gravel),Blair等(1999)将砾石细分为以下几类:

① 细砾(granule, 2~4 mm/-1~-2 ϕ); ② 卵砾(pebble, 4~64 mm/-2~-6 ϕ),进一步分为以下四组:细卵砾(fine pebbles, 4~8 mm/-2~-3 ϕ)、中卵砾(medium pebbles, 8~16 mm/-3~-4 ϕ)、粗卵砾(coarse pebbles, 16~32 mm/-4~-5 ϕ)和巨卵砾(very coarse pebbles, 32~64 mm/-5~-6 ϕ); ③ 卵石(cobble, 6.4~

收稿日期:2013-10;修订日期:2013-12。

基金项目:张家界世界地质公园地质遗迹保护专项基金项目。

作者简介:王随继(1966-),男,甘肃静宁人,博士,副研究员,主要从事河流沉积学、地貌学及流域地表过程等研究,

E-mail: wangsj@igsnrr.ac.cn。

25.6 cm/-6~-8 ϕ), 可细分为以下两类: 小卵石(fine cobbles, 6.4~12.8 cm/-6~-7 ϕ)和大卵石(coarse cobbles, 12.8~25.6 cm/-7~-8 ϕ); ④ 漂石(boulder, 25.6~409.6 cm/-8~-12 ϕ), 进一步分为四类: 小漂石(fine boulders, 25.6~51.2 cm/-8~-9 ϕ)、中漂石(medium boulders, 51.2~102.4 cm/-9~-10 ϕ)、大漂石(coarse boulders, 102.4~204.8 cm/-10~-11 ϕ)和巨漂石(very coarse boulders, 204.8~409.6 cm/-11~-12 ϕ)。

大于4.1 m的巨型碎屑物统称为巨岩块(megaclasts), 因为河道中的巨岩块常常是岩壁崩塌的产物, 已与水流的大小无关, 因此在河流的侵蚀和沉积物研究中已经没有再细分的必要。

上述拓展了的碎屑颗粒分级标准, 为对山地河流中的巨大碎屑沉积物如卵石、漂石的定量研究提供了方便。

以往关于沉积物粒度分布特征的研究主要集中在砂级颗粒以下, 最大达到细砾级别, 而对于包含卵石甚至漂石的沉积物粒度分布规律的研究迄今还不多见。本文选取张家界砂岩峰林地貌区甘溪(也称干溪)碎屑沉积物为例, 系统研究包含卵砾、卵石、漂石在内的山地河流砾石沉积物分布规律, 不仅对河流沉积物粒度分布规律研究方向有所拓展, 而且也未来对山地河流巨型碎屑沉积物的进一步定量研究提供参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

位于湖南省西北部的张家界景区以其独特的砂岩峰林地貌而著称于世, 而这些号称“奇峰三千”的峰林主要分布在张家界国家森林公园、水绕四门和天子山景区等范围内(胡慧萍, 2011), 即张家界向斜轴部向南倾伏端的周围(中国科学院地质研究所, 1958), 正好位于景区主要河流索溪及支流金鞭溪、甘溪、鸳鸯溪和龙尾溪等的河谷带(图1a)。这里多年平均降水量1382~1427 mm, 年无霜期267~275天(武陵源区志编纂委员会, 2006), 丰沛的地表径流是河流侵蚀下切及砂岩峰林形成的前提。在峰林之间是深切河谷, 切割深度200~400 m, 谷底海拔400~500 m, 谷底宽10~50 m, 最宽100 m(吴忱等, 2002)。除了支流入汇处等个别地方外, 都属于“V”形峡谷, 是典型的山地河谷。

砂岩峰林地貌体主要由中泥盆系云台观组的600 m厚的海相紫红—灰白色厚层石英砂岩夹薄层粘土岩构成(图1a), 岩层倾角平缓(3~5°), 发育三组垂直节理(70°、250°、340°)(吴忱等, 2002); 下伏志留系页岩, 上覆二叠系灰岩。该地区新生代以来处于地壳抬升中, 其中第四纪抬升幅度为790~938 m, 抬升速度0.47 mm/a; 第四纪以来, 干湿及冷暖交替的

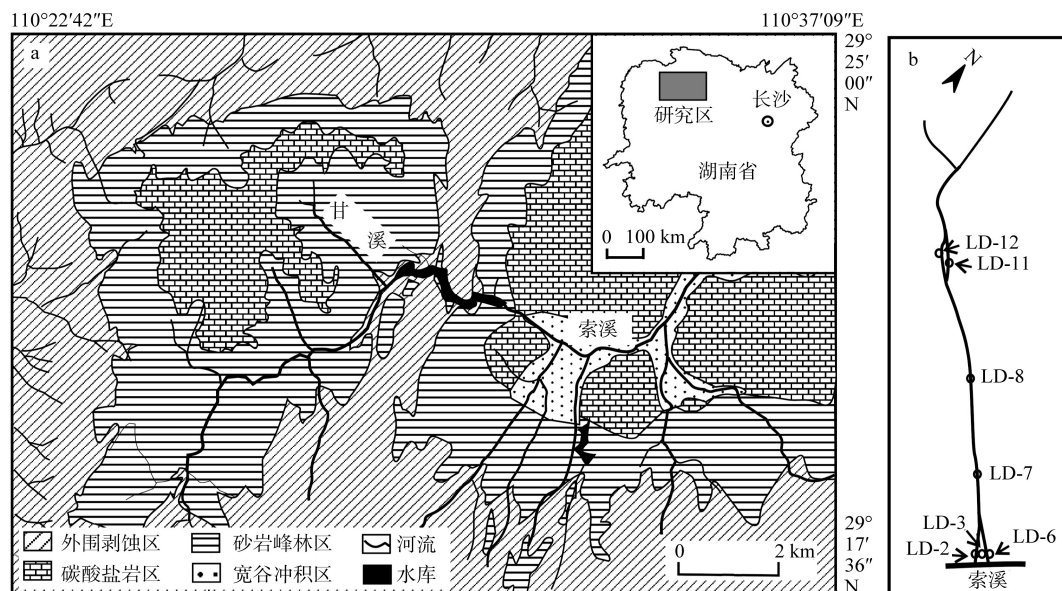


图1 研究区地质地貌特征(a)(引自 Yang et al, 2011, 有修改)及甘溪粒度样品采样位置(b)

Fig.1 Lithology and geomorphological features surrounding the Ganxi Stream (a) (modified after Yang et al, 2011) and the sampling locations (b)

波动气候,硬软相间互层的石英砂岩和页岩层,加上垂直节理及裂隙的切割,以及持续的重力崩塌及流水侵蚀作用,形成了“柱峰砂岩地貌”景观,而在峰林之间则形成了深切河谷(陈长明等, 1994)。

甘溪(图 1a)是长江的五级支流,直接流入索溪,是索溪典型的一级支流,其中下游地区均为碎屑沉积物,未出露基岩节点,这与索溪其他支流如龙尾溪、鸳鸯溪等常见基岩节点完全不同。由于节点的出现常常导致局部的小型瀑布,因而引起水流形态的改变,而不出现节点的甘溪没有这方面的影响,因此,对研究张家界景区碎屑沉积物粒度的沿程变化十分有利。

甘溪河谷深切,形成长约 5 km 的深切峡谷,沟谷两旁为狭窄的堆积坡地,坡地边是如笋柱峰,沿山梁排列。沟谷平均比降高达 0.05,如此高比降的河谷在洪水期必然具有很强水动力,使得粒径在砂以下的碎屑物均被流水搬运走,沟谷残留的沉积物基本都是砾石,主要为细砾至卵石,最大可达中漂石级别。在甘溪采集的有效样品有 7 个(采样位置见图 1b),其中河道样品 5 个,河口区心滩样品(LD-3)和河岸样品(LD-6)各 1 个。河道样品的采集考虑纵向大致等距,覆盖主河道整个河段,并且相距较远,可充分反映粒度纵向变化特征。分汉段的断面具有典型性和不可替代性。总之,断面的选取完全可以满足研究工作的需要。

2.2 研究方法

甘溪河道宽度很小,一般为 10~20 m 左右,而且砾石大小区域分布相差悬殊,以往常用的划定直径(或边长)为 1 m 或 2 m 的圆形或正方形区域内采样的方法在此不适用。因此,本研究对于河道砾石样品的采集,采用沿河道横断面逐一采集的方法,即一个河道断面所采集的所有碎屑物为一个样品。根据研究工作的需要,在河道的不同断面处采集不同的样品(图 1b);为了与河道碎屑物样品进行对比,在甘溪河口的心滩(LD-3)和河岸(LD-6)上也用相同方法进行了取样。这样所得到的砾石样品由于砾石大小不同、河道宽窄不同而相差较大,在对所有样品测量后,在绘制图件的过程中,剔除了那些测量数量过少的样品,符合需要的样品的采样位置见图 1b。

各个砾石样品的粒度值通过测量每个砾石的 a 轴、b 轴和 c 轴的长度(单位:mm),并分别表示为 d_a 、 d_b 和 d_c 。研究者常将砾石样品中每个砾石的三轴各

自平均值相乘并开三次方,直接求得砾石样品的平均粒径(陈长明等, 1994; 韩建恩等, 2005)。在非图解法求值时,用此计算公式可以方便求值,但对众多砾石颗粒同一轴长进行平均显然不具有明确的物理意义。因此,本文首先计算单个砾石的粒径(d_m , 单位 mm),其他粒度参数根据样品中砾石粒度的累积频率分布曲线由图解法求得,粒径计算公式如下:

$$d_m = \sqrt[3]{d_a d_b d_c} \quad (1)$$

甘溪流域采集到的有效样品有 7 组,共测量砾石 330 个,其中粒径大于 600 mm 的 3 个,500~600 mm 的 3 个,400~500 mm 的 10 个,300~400 mm 的 23 个,200~300 mm 的 26 个,100~200 mm 的 102 个,小于 100 mm 的 163 个;最大粒径 663 mm,最小粒径 23 mm。

上述样品的自然粒级难以反映沉积物的客观分布规律,因此需要将自然粒级转换为自然对数粒级(φ 值),然后可以分析其粒度的分布规律及流水动力学响应机制。利用伍登—温德华(Udden, 1914; Wentworth, 1922)经典公式(2)可将每个砾石的粒径 d_m 转换为 φ 值,借鉴 Blair 等(1999)的分级,对样品颗粒进行定级。因为样品的颗粒都是砾石(>2 mm),所以得到的所有 φ 值均为负数。

$$\varphi = -\log_2 d_m \quad (2)$$

对一个样品中所有砾石的粒度 φ 值,根据测量颗粒多少,以 0.25 φ 或 0.5 φ 的间隔对其分级,统计各个粒级中颗粒的个数并求得其在所有颗粒中所占的比例(单位:%),然后绘制出每个样品的粒度分布曲线。这里采用在概率累积曲线上求取不同百分位的 φ 值,利用已有公式(3, 4, 5, 6)(刘宝珊, 1980)来分别计算样品的平均粒径(M_z)、标准偏差(σ_1)、偏度(SK_1)、峰态(K_G):

$$M_z = \frac{(\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})}{3} \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \quad (4)$$

$$SK_1 = \frac{\varphi_{84} + \varphi_{16} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_{95} + \varphi_5 - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (5)$$

$$K_G = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (6)$$

式中: φ 表示粒径,下标表示百分位。利用图解法读取不同百分位的 φ 值,即得到样品的粒度参数。

中值粒径(D_{50})直接读取概率累积曲线上 50 分位(即 50%)所对应的粒度值。

分选系数(S)计算公式如下:

$$S = \sqrt{\varphi_{75}/\varphi_{25}} \quad (7)$$

每个样品的平均球度(O_m)计算公式如下:

$$O_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_n = \sqrt[3]{(d_b \times d_c)/d_a} \quad (8)$$

式中: n 为样品中的颗粒数。

3 砾石粒度分布特征及其水动力响应

3.1 河道砾石沉积物的自然粒度分布特征

甘溪河道沉积物5个样品的颗粒自然粒度分布范围如图2所示,所有样品都以卵石及卵砾为主,这是山地河流河床质的主要特征。河口区的LD-2样品不含漂石,越向甘溪上游,其样品中的漂石数量越多,河道沉积物的这一分布特征除反映上游更强的水动力外,还与中上游砂岩峰林崩塌的岩壁块体增多有关。

同时,每个样品中的颗粒粒度变化范围较大,越往上游变化幅度越大。由于每个样品的颗粒测量采用沿河道断面方向逐个进行,因此,样品中颗粒粒度的悬殊差异除了反映岩壁崩塌的砂岩块体滞留物外,也表明洪水期河流水动力在河道横断面方向存在明显差异。

3.2 砾石样品的累积概率分布特征及水动力效应

甘溪砾石的概率累积曲线分布基本呈现出二段式或三段式类型(图3)。

图3a所示的甘溪河口区心滩表层砾石沉积物为三段式,这与砂质河流的心滩表层沉积物为悬移质沉积特征不同,它反映了不同级别大洪水时来自

心滩上游河道的推移质在心滩表面的沉积作用,以及洪水涨落对这些沉积物的改造作用。

图3b所示的甘溪左汊道左岸的沉积物分布形式显示,超过-8 φ 的漂石与其他粒级的砾石之间缺乏连续性,这显然是河岸中滞留了岩壁崩塌的碎屑物所致,而非流水分选的结果。如果剔除了这些崩塌的碎屑物,该样品的粒度分布则呈现明显的两段式,而这两个粒度段反映了特大洪水期的泥石流漫滩沉积和平滩以下的洪水裹挟砾石的滞留沉积。像砂质颗粒物样品一样,砾石样品的概率累积曲线呈现出的不同斜率的线段,同样可以反映不同大小的水动力及其对沉积颗粒结构的影响。

以甘溪河床样品LD-7(图3c)和LD-12(图3d)为例,其粗颗粒和细颗粒的界线分别为-6.5 φ 和-6.0 φ ,仅从该界线来看,并未反映出河道粗细颗粒的分界粒度有明显的沿程变小趋势,尽管二者相差不大。但是,其粗颗粒组分所占的比例分别为24.83%和65.96%,表明上游河道沉积物中的粗颗粒组分优势明显,反映河道沉积物总体上具有明显的沿程变细现象,也与上游河道具有更强的水动力条件相一致。

从甘溪河床、河岸及河心滩砾石沉积物的粒度分布来看,山地河流包括漂石在内的河道粗颗粒沉积物也有一定的统计关系,并且可以用累积频率曲线来表示其分布特征,由此显示不同大小的水动力作用的区段。对于山地河流的河道砾石沉积物,剔除崩落岩块的影响,其颗粒组构依然具有沿程变小的趋势,这同样是对水动力沿程变小的响应。

4 砾石粒度参数特征及砾石运移机制

表1中的河道砾石样品甘溪LD-2至LD-12是沿甘溪逆流而上分布(图1b),其中LD-11和LD-12分别为同一个断面的左右汊道。除了河口区河床砾石样品LD-2外,其他的河道砾石沉积物的中值粒径 D_{50} (同 φ_{50})具有明显的沿程变小特征,这与水动力沿程变小的客观机制相一致。LD-2样品因为位于甘溪进入索溪的河口,因索溪水流对甘溪河口区的淘蚀造成甘溪河口段的河道比降变大,一些相对小的砾石容易被带入索溪、滞留沉积的砾石明显偏大,从而表现出其中值粒径大于其他河道砾石样品的反常现象。

按照弗里德曼根据标准偏差(σ_1)判别分选性

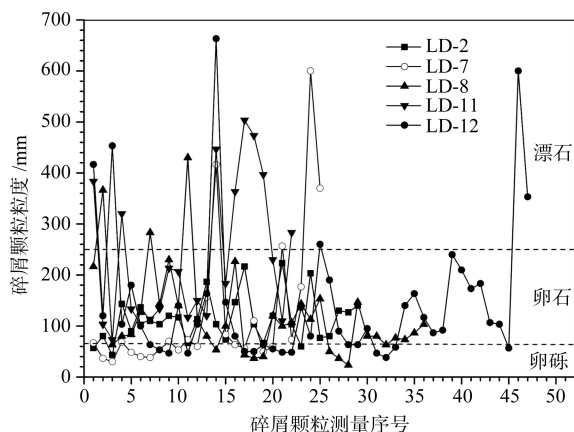


图2 甘溪河道样品自然粒度分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of natural granularity of the gravel samples in the Ganxi Stream

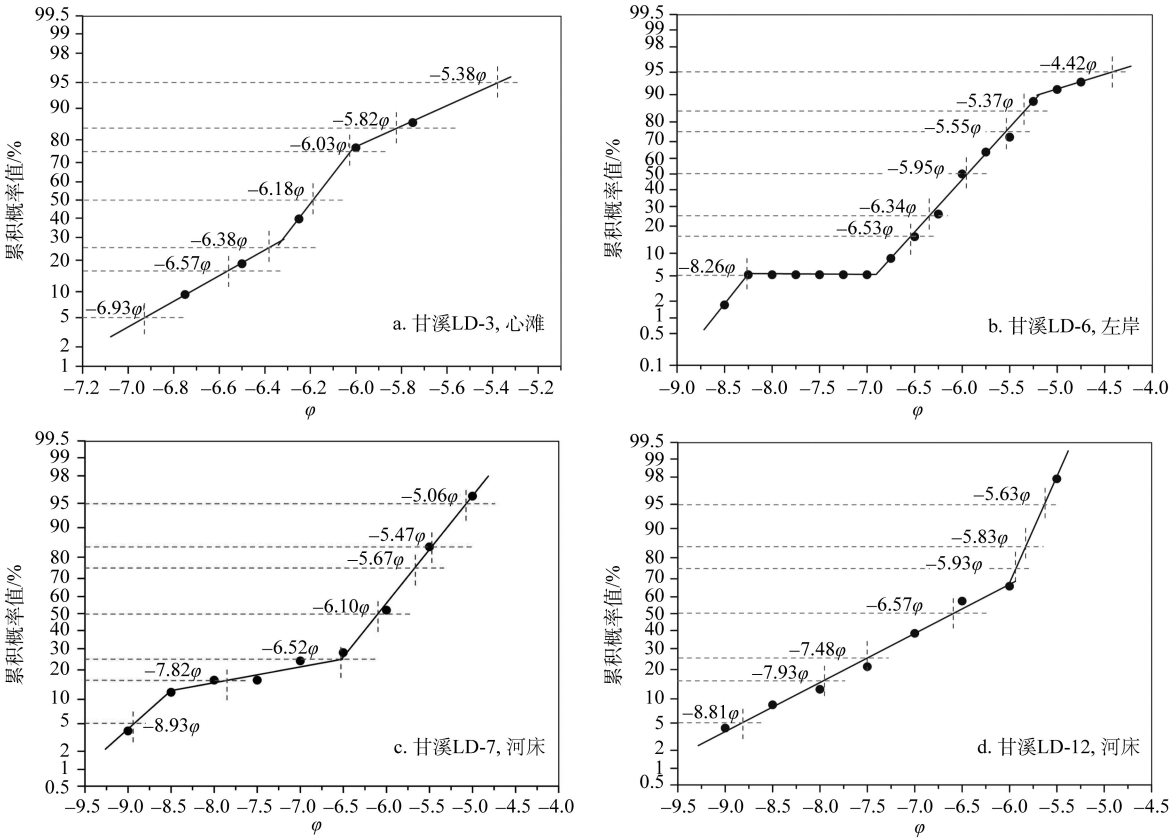


图3 甘溪代表性砾石样品的累积频率曲线

Fig.3 Cumulative probability curves of the gravel samples in the Ganxi Stream

表1 甘溪砾石样品的粒度概率累积曲线上不同百分位上的粒度值

Tab.1 Granularity at different percentile in the cumulative probability curves of the gravel samples in the Ganxi Stream

样品号	沉积相	砾石个数	$D_{3/φ}$	$D_{16/φ}$	$D_{25/φ}$	$D_{50/φ}$	$D_{75/φ}$	$D_{84/φ}$	$D_{95/φ}$
甘溪LD-2	河床	29	-8.15	-7.24	-7.07	-6.72	-6.38	-6.21	-5.88
甘溪LD-3	心滩	43	-6.93	-6.57	-6.38	-6.18	-6.03	-5.82	-5.38
甘溪LD-6	河岸	58	-8.26	-6.53	-6.34	-5.95	-5.55	-5.37	-4.42
甘溪LD-7	河床	25	-8.93	-7.82	-6.52	-6.10	-5.67	-5.47	-5.06
甘溪LD-8	河床	36	-8.50	-7.51	-7.12	-6.55	-5.98	-5.69	-5.11
甘溪LD-11	河床	22	-9.95	-9.06	-8.56	-7.60	-6.92	-6.78	-6.50
甘溪LD-12	河床	47	-8.81	-7.93	-7.48	-6.57	-5.93	-5.83	-5.63
平均		37.14	-8.50	-7.52	-7.07	-6.52	-6.07	-5.88	-5.43

等级的指标(刘宝珺, 1980),表2所示的甘溪河口区心滩砾石样品甘溪LD-3为分选好(0.35~0.50),河口区右汊道河床砾石样品甘溪LD-2为分选较好(0.50~0.80),其他所有河道样品都属于分选中等(0.80~1.40)等级,但河道样品的分选性仍然具有沿程相对变好的趋势。这与分选系数(S)这一指标反映出河道样品的分选性相一致。

偏度(SK_1)可用来度量频率曲线的不对称程度(Folk et al, 1957; 刘宝珺, 1980),可以判断沉积物样品粒度的平均值(M_2)与中值(D_{50})的相对位置。与

其对频率曲线形态的划分指标对比,在表2中的砾石沉积物样品中,甘溪LD-2、LD-6和LD-8属于近对称分布(SK_1 介于-0.10~+0.10之间),LD-3虽然属于正偏但接近对称分布,而LD-7、LD-11和LD-12属于负偏(SK_1 介于-0.30~-0.10之间)。负偏表示平均粒径偏向于中值粒径为界的细粒一侧,即样品中相对较细颗粒占优势。甘溪河道样品中的负偏现象揭示了相对低水位洪水时期,由其上游搬运而来的较细颗粒受漂石或卵石所阻而在其空隙间的相对富集,如图4a所示。低洪水位时大的漂石显著

出露水面而难以移动,只有水下的较细砾石才能被水流从上游推移而来,其中一部分受到漂石或砾石的阻挡,并在漂石或砾石的缝隙中相对富集,使得河道颗粒物出现负偏现象。近对称分布表明,砾石在经过相互磨蚀及流水的搬运分选等过程中,形成了一种相对稳定的粗细颗粒组合较优的规律性分布。

峰态(K_G)是用来描述分布曲线与正态曲线($K_G=1$)相对比时峰的宽窄及尖锐程度(Folk et al, 1957; 刘宝珺, 1980)。表2中的沉积物样品中,LD-11和LD-12属于典型的宽峰态($0.67<K_G<0.90$);LD-2和LD-8属于窄峰态($1.11<K_G<1.50$)类型,而LD-3、LD-6和LD-7属于典型的尖峰($1.50<K_G<3.00$)形态。

表2 甘溪河流砾石样品的粒度参数

Tab.2 Granularity parameters of the gravel samples in the Ganxi Stream							
样品号	沉积相	M_z	σ_i	SK_i	K_G	S	O_m
甘溪 LD-2	河床	-6.72	0.60	-0.05	1.35	0.90	0.72
甘溪 LD-3	心滩	-6.19	0.42	0.12	1.81	0.95	0.70
甘溪 LD-6	河岸	-5.95	0.87	-0.02	1.99	0.88	0.72
甘溪 LD-7	河床	-6.46	1.17	-0.19	1.87	0.87	0.70
甘溪 LD-8	河床	-6.58	0.97	0.00	1.22	0.84	0.75
甘溪 LD-11	河床	-7.81	1.09	-0.21	0.86	0.81	0.69
甘溪 LD-12	河床	-6.78	1.01	-0.24	0.84	0.79	0.71
平均		-4.57	0.59	-0.08	1.26	0.93	0.71

甘溪中LD-11和LD-12样品的宽峰态表明,一些河床砾石未经过流水的充分改造而滞留于河道。甘溪作为砂岩峰林重重包围的山地河流。沟谷两旁常见砂岩峰林的崩塌面(图4b),砂岩峰林的崩塌物可以直接滚落河道。这些以漂石级别为主的碎屑物在进入河道的较短时间内难以受到流水的充分改造,与经过流水充分分选的河道推移质有着本质的区别。同时,这两个样品位于甘溪上游部分,而上游河道沉积物的分选性本身较差。上述因素导致这两个河道砾石沉积物样品呈现宽峰态特征。甘溪LD-3、LD-6和LD-7样品的尖峰态表明,其频率分布曲线上中部的样品分选性很好、经过了流水的充分改造;与这些样品分布在甘溪中下游的环境相一致。窄峰态的样品(LD-2和LD-8)所经历的流水改造作用介于前两者之间。

此外,甘溪河道颗粒样品的分选系数(S)具有沿程逐渐变好的趋势,符合流水分选作用变化规律;大部分样品的平均球度介于0.69~0.72之间,仅LD-8样品的相对较大,为0.75。纵观甘溪河道的砾石样品,球度高者往往在砂岩砾石为主的样品中含有较多的石灰岩砾石,而石灰岩砾石抗蚀性较弱、易于磨蚀变圆,因此球度值较大(图4c、4d);而石灰岩颗粒较少的样品其砾石的平均球度较小。如前所述,这些石灰岩颗粒的母岩位于高出河道600 m以上的二叠系灰岩层;因此河道中的石灰岩颗粒是



图4 低洪水位期的漂石(a)、峰林崩塌面(b)及砾石球度差异(c、d,砂岩为主,黑圈中为石灰岩)

Fig.4 Boulders at low flooding stage (a), falling surfaces of the sandstone cliff (b), and sphericity difference (c and d, sandstone dominates, the gravels in the circles are limestones)

该层岩体崩落后通过较远程输送的产物。数量更多的砂岩颗粒,除部分来自河床的剥蚀外,有相当多数也是砂岩柱峰、岩壁的崩塌物。这些大块砂岩崩塌物在流水裹挟的沙石长期撞击下逐渐破碎变小,也在流水的磨蚀中逐渐圆滑,只因其硬度比石灰岩大,因此磨圆程度及球度相对较小。总之,河道砾石沉积物的球度大致具有沿程变小的变化趋势,图3中的甘溪LD-8样品的球度最大,与该河道断面处的石灰岩颗粒相对富集有关。

4 结论

(1) 不同于砂质为主的冲积河流,作为典型的山地河流,甘溪河道沉积物颗粒粗大,以卵石及卵石为主;除河口区不含漂石外,中上游河道的沉积物中均含有漂石,且向上游漂石含量增多,这一方面是对水动力沿程变小的响应,另一方面也反映中上游砂岩峰林岩壁的块体崩塌物相对较多。从河道断面的碎屑沉积物分布看,其粒度差异悬殊,除了说明岩壁岩块的坠落之外,也反映出河道横断面水上水动力的差异性。

(2) 与冲积河流的沉积物一样,甘溪河床、河岸及心滩的碎屑沉积物粒度分布都具有明显的统计规律,并且可以用累积频率曲线来进行表示。在累积频率分布图上,呈现出清晰的两段式或三段式分布特征,这是对不同水位洪水动力的响应。

(3) 就不同粒度参数而言,标准偏差揭示了甘溪河道沉积物的分选性为中等到较好,且具有沿程变好的趋势;偏度显示甘溪河道沉积物以负偏为主,这是低洪水位时期搬运而来的较细颗粒受漂石或卵石所阻而在其空隙间的相对富集;峰态呈现多样化,反映山地河流除了流水搬运的沉积物外,还有岩壁坠石的混合作用;分选系数具有沿程变好的趋势,河口区心滩沉积物分选最好。

(4) 甘溪河道沉积物的球度介于0.69~0.75之间,属于中等到较好磨蚀级别,且总体上差别不大。但是,不同母岩的碎屑沉积物球度差别较大,其中石灰岩母岩的砾石球度明显大于砂岩母岩。

本文研究结果表明,包含大型碎屑物如漂石的山地河流的砾石沉积物,同样具有明显的统计规律,可以用累积频率曲线等方法对其进行定量研究,从而可找出砾石响应不同水位洪水动力的粒级范围。

参考文献(References)

- 陈长明, 谢丙庚. 1994. 关于建立“张家界柱峰砂岩地貌”类型的探讨. 湖南师范大学自然科学学报, 17(4): 84-87.
- [Chen C M, Xie B G. 1994. Study for establish of new type of pillar peak sandstone geomorphy in Zhangjiajie, Hunan, China. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 17(4): 84-87.]
- 陈建成, 柏道远, 李长安, 等. 2010. 洞庭盆地中更新世洞庭湖组砾石特征及其意义. 华南地质与矿产, 26(4): 16-22. [Chen J C, Bai D Y, Li C A, et al. 2010. Statistics of gravel particle size and shape features of middle Pleistocene Dongtinghu Formation in Dongting Basin, and its tectonic and environmental significances. Geology and Mineral Resources of South China, 26(4): 16-22.]
- 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 等. 2005. 西藏阿里地区札达盆地第四纪砾石统计及其意义. 地质通报, 24(7): 630-636. [Han J E, Yu J, Meng Q W, et al. 2005. Analysis of Quaternary gravels in the Zhada Basin, Ngari Area, Tibet, China. Geological Bulletin of China, 24(7): 630-636.]
- 胡慧萍. 2011. 张家界石英砂岩峰林地貌奇峰三千之遥感佐证. 国土资源导刊, (11): 50-52. [Hu H P. 2011. Remote sensing evidence of the three thousands sandstone peaks in Zhangjiajie. Land and Resources Herald, (11): 50-52.]
- 刘宝珺. 1980. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社. [Liu B J. 1980. Sedimentological lithology. Beijing, China: Geological Press.]
- 倪志云, 杨桂芳, 张绪教, 等. 2011. 张家界地区风化壳的性质与夷平面形成环境. 现代地质, 25(4): 789-795. [Ni Z Y, Yang G F, Zhang X J, et al. 2011. Characteristics of weathering crust and formation environment of planation surface in Zhangjiajie. Geoscience, 25(4): 789-795.]
- 吴忱, 张聪. 2002. 张家界风景区地貌的形成与演化. 地理学与国土研究, 18(2): 52-55. [Wu C, Zhang C. 2002. The form and evolvement of the physiognomy of the beauty spot in Zhangjiajie. Geography and Territorial Research, 18(2): 52-55.]
- 武陵源区志编纂委员会. 2006. 武陵源区志. 长沙: 湖南人民出版社. [Redaction Committee of the Records of Wulingyuan District. 2006. The records of Wulingyuan District. Changsha, China: Hunan People Press.]
- 中国科学院地质研究所. 1958. 中国大地构造纲要. 北京: 科学出版社. [Institute of Geology, CAS. 1958. Geotectonic program of China. Beijing, China: Science Press.]
- Blair T C, McPherson J G. 1999. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research: Section A, 69(1): 6-19.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimen-

- tary Petrology, 27(1): 3-26.
- Kristin B, Steven R, Fasce J P, et al. 2004. Measurement of coarse gravel and cobble transport using portable bedload traps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9): 879-893.
- Lisle T E. 1995. Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. *Water Resources Research*, 31(4): 1107-1118.
- Marion D A, Weirich F. 2003. Equal-mobility bed load transport in a small, step-pool channel in the Ouachita Mountains. *Geomorphology*, 55(1-4): 139-154.
- Simon J B, Pye K. 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1237-1248.
- Udden J A. 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25: 655-744.
- Wentworth C K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30(5): 377-392.
- Yang G, Yang Z, Zhang X, et al. 2011. RS-based geomorphic analysis of Zhangjiajie sandstone peak forest geopark, China. *Journal of Cultural Heritage*, 12(1): 88-97.

Spatial variations of gravel sediment granularities and their causes in Ganxi Stream of Zhangjiajie

WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, HE Li, FANG Haiyan, WANG Yanjun

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Cumulative probability curve of particle granularities is one of the methods to study the sediments. However, the sediments in the studies were mainly sands/sandstone and silts/siltstone, and granule at most in the past. Recently the rivers with large gravel bed materials including pebbles, cobbles and boulders in mountainous regions have been studied more and more. But the distribution pattern of the granularities of coarse gravels such as pebbles, cobbles and boulders has yet to be well studied. In this study, taking the modern gravel sediments of the mountainous Ganxi Stream in Zhangjiajie scenic spot as an example, the cumulative probability curves of gravel granularity were studied for the sampling on the channel bed, mid-channel bar and channel bank. The granularities of these gravel sediments ranged from 23 mm to 663 mm, with most of them being pebbles, cobbles and boulders. The results showed that these fluvial gravel sediments followed a statistical pattern very well and exhibited a spatial variation trend that reflected the river flow hydrodynamics. For each sample the gravel granularities could be expressed by a cumulative probability curve clearly with two or three sections. The gravels in different sections reflected different fluvial power in different flooding stages. Granularity parameters showed that the gravel sediments have higher degree of sortability and sphericity. The median diameters of the gravels on channel bed have a decreasing trend downstream, reflecting the decrease of stream power in that direction. The reason for the various kurtosis of the gravels is that the blocks that fell to the river from the cliffs of "the sandstone forest" had not been modified sufficiently by the stream flow. The fine gravels intercepted in the apertures of cobbles and boulders in low flooding stages resulted in negative deflection of granularity distribution of the channel gravel sediments. By comparing the sphericity among different lithological gravels one can find that the gravels composed of carbonate rocks have the highest level of sphericity while the gravels composed of quartzose sandstone have lower level of sphericity. This phenomenon suggests that the quartzose sandstone gravels have higher ability to resist the flow erosion while the carbonate rock gravels have lower ability. This work is a useful attempt to study the distribution pattern of fluvial gravels including boulders, and has a revelatory significance to the quantitative studies of the coarse gravel sediments such as cobbles and boulders in mountainous fluvial rivers with steep gradients.

Key words: mountain river; sediment; gravel; cobble; boulder; granularity distribution; Ganxi Stream of Zhangjiajie