

文章编号: 1008 - 2786 - ( 2013 ) 6 - 723 - 08

## 川中丘陵区河成壶穴的形态对比及成因

刘晓娇<sup>1</sup> 徐娟<sup>2</sup> 张斌<sup>1\*</sup> 刘守江<sup>1</sup> 覃发超<sup>1</sup> 罗明良<sup>1</sup>

( 1. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637009; 2. 保山学院资源环境学院, 云南 保山 678000 )

**摘 要:** 河成壶穴是记录流域地貌演化过程、水流与河床边界条件相互作用的关键性证据之一。以川中丘陵区两类岩性区(砂岩、泥岩)的河成壶穴为研究对象,定义壶穴形态规模与比例两类参数,对比两地壶穴形态差异性,并分析其成因。结果表明:在规模上,砂岩壶穴的密度和深度较泥岩壶穴偏大,而长、短轴则较之偏小;在平面形态上,砂岩壶穴的扁率较泥岩壶穴偏小;在垂直断面形态上,砂岩壶穴多呈倒“Ω”型、“U”型,口径深宽比偏大,泥岩壶穴多呈“V”型,口径深宽比偏小。这与两地水动力、构造、推移质、基岩与时间等因素相关,并建立壶穴概念模型。本研究将丰富与完善壶穴地貌的非地带性特征及区域代表性,为川中丘陵区河流地貌演化过程提供科学依据。

**关键词:** 川中丘陵区; 河成壶穴; 形态; 对比; 成因

**中图分类号:** P931.1

**文献标志码:** A

河成壶穴是现代河流常见的微地貌形态,是记录流域地貌演化过程、水流与河床边界条件相互作用的关键性证据之一。壶穴研究不仅具有其形成与演化的地貌学意义,还促进了地貌学和冰川地质学的研究向纵深发展<sup>[1]</sup>,对壶穴形成的不同见解会导致不同的地球环境演化方向结论<sup>[2]</sup>。

研究壶穴最早可以追溯到十九世纪中叶<sup>[3]</sup>,一百多年来壶穴研究已取得了显著进展,从初期的以定性分析<sup>[1,3-15]</sup>为主,发展到现在已深入到以定量<sup>[2,16-24]</sup>研究为主的阶段。在壶穴形态方面,主要通过刻画壶穴的形态参数<sup>[2,17-18,22]</sup>,模拟壶穴的几何增长模型<sup>[21]</sup>,分析壶穴形态与水动力条件<sup>[16]</sup>、岩性<sup>[24]</sup>、构造等多因素的关系,探讨壶穴形态与空间分布特征<sup>[22]</sup>。其中,通过实地测量并定量描述壶穴深度、长、短轴长度,拟合了壶穴发育过程中长轴与短轴、深度与口径间的二维关系函数<sup>[2]</sup>;通过分析壶穴深度、长轴长度与方向、内凹大小与方向,揭示

了壶穴三维立体的演化模式<sup>[17]</sup>。此外,Zen<sup>[16]</sup>描述并区别竖直壶穴和侧旁壶穴的异同,分析并探讨两类壶穴的起源位置及水动力影响;Springer<sup>[21]</sup>通过壶穴的半径(平均值)、深度的统计参数分布特征来模拟壶穴的几何形态;Sengupta<sup>[24]</sup>以河谷横断面为基础选择样方,测量每个样方壶穴的深度、长度、下覆岩床节理交汇点密度和岩石硬度,定量评估壶穴形态与下覆河床岩性的关系。

在壶穴成因方面,争论非常激烈,目前对壶穴的成因认识可以归纳为多成因论<sup>[14,17-19,25]</sup>和流水侵蚀<sup>[1,4-13,15]</sup>。其中,在肯定壶穴多成因论的同时,主要有以下三种划分方案:流水型(流域型、冰水型、海浪型)、风化-风蚀型、风化型<sup>[18]</sup>;流水侵蚀、风蚀、圆砾铸模、冰压刻、冰融水滴蚀及泄气侵蚀<sup>[19]</sup>;河谷流水、冰水、溶蚀、风化、风蚀与浪蚀<sup>[25]</sup>。然而,吕洪波强调壶穴是高速旋转水流侵蚀的结果,建议壶穴仅仅用于表示快速旋转水流(无需携带砾石等

收稿日期(Received date): 2013 - 04 - 21; 改回日期(Accepted): 2013 - 07 - 30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41101348),四川省科技厅项目(2012JY0121)和四川省教育厅科研项目(13ZB0008)。[Supported by the Natural Science Foundation of China(41101348), science & technology department of Sichuan province project (2012JY0121) and of education department of Sichuan province research project (13ZB0008).]

作者简介(Biography): 刘晓娇(1988-),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事侵蚀地貌学研究。[Liu Xiaojiao(1988-), female, born in Handan, Hebei province, master candidate, research in Erosion Geomorphology.] E-mail: liuxiaojiao210@sina.com

\* 通信作者(Corresponding author): 张斌(1975-),男,四川省南部县人,博士,教授,主要从事侵蚀地貌学研究。[Zhang Bin(1975-), male, born in Nanbu County, Sichuan province, Ph D, professor, major research in Erosion Geomorphology.] E-mail: envgeo@163.com

的作用)在基岩表面形成的近圆筒型的圆坑,以口小肚大底平为典型的形态特征<sup>[11]</sup>;但在研究广东范围内“冰臼”与“壶穴”之争<sup>[1,4-10,12,15]</sup>和浙江磐安大盘山<sup>[13]</sup>时,壶穴均被认为是高速旋转的水流挟带砂砾石旋转磨蚀河床形成的流水侵蚀地貌。流水侵蚀是最普遍的壶穴类型,可分为河成壶穴、冰川外缘的冰水河流壶穴和海成壶穴<sup>[26]</sup>,壶穴的形成与发育与河床局部的地质、地貌、流水特征有关<sup>[2]</sup>,趋向形成于软弱带(节理、断裂、层面),但形成软弱带的具体位置却是随机的<sup>[22]</sup>。

综上,在壶穴形态和成因方面已取得了重要进展,但还存在三方面的不平衡:一是主要从单一岩性对壶穴形态进行成因分析,缺少不同岩性间的形态及成因的对比;二是从岩性来看,对花岗岩、砂页岩、粉砂岩等岩性区壶穴的研究较丰,而对泥岩区的壶穴研究还鲜有报道;三是从区域分布来看,广东、内蒙、河北等地壶穴研究较多,而对西南地区壶穴的研究成果还极少。本文以川中丘陵区两类岩性区(越溪河高坑砂岩、西溪河天心桥泥岩)的河成壶穴为研究对象,分别对两类岩性区的河成壶穴进行详细测量和统计分析,定义壶穴形态规模与比例两类参数,比较两类岩性区壶穴形态差异性及其原因。

## 1 研究区简介

研究区位于四川盆地中部丘陵区,区域地层属扬子区南充小区,侏罗系广布,厚 2 400 ~ 3 700 m,中下统为湖相泥岩夹砂岩、介壳灰岩,厚 35 ~ 570 m,中统及上统均为陆相红色砂岩、泥岩。砂岩与泥岩是川中丘陵区最典型、分布最广泛的两类岩性。如图 1 所示,岳池县坪滩镇越溪河高坑瀑布河床岩性为侏罗系中统上沙溪庙组( $J_2sx^2$ )砂岩,长石含量高,多为长石石英砂岩或长石砂岩。该处断裂较为发育。南充市顺庆区新复乡西溪河右岸、天心桥附近河床岩性为侏罗系上统遂宁组下段( $J_3s^1$ )棕紫色泥岩,较为破碎,普遍含钙质,有冲刷、虫蛀、干裂、波状层理。区内节理较为发育。

## 2 数据与方法

### 2.1 主要参数

#### 2.1.1 壶穴形态规模参数

一般壶穴为正圆的并不多,以理想状态下典型

的椭圆形壶穴为例进行说明(图 2)。壶穴形态的规模参数包括长轴长度( $L_l$ )、短轴长度( $L_s$ )、深度( $h$ )、平均口径  $L_m = [1/2(L_l + L_s)]$ 、颈径( $L_n$ )、肚径( $L_b$ )。

#### 2.1.2 壶穴形态比例参数

##### 1. 扁率

在数学中,扁率是长短半轴的差值,再与长半轴的比值,其值介于 0 和 1 之间,扁率反映了椭球体的

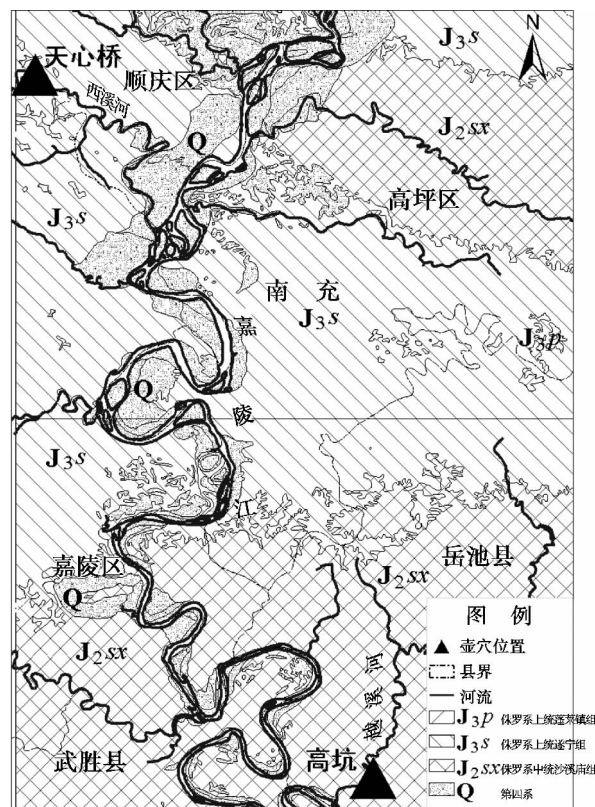


图 1 研究区略图(▲为壶穴分布位置)

Fig. 1 The sketch map of study area

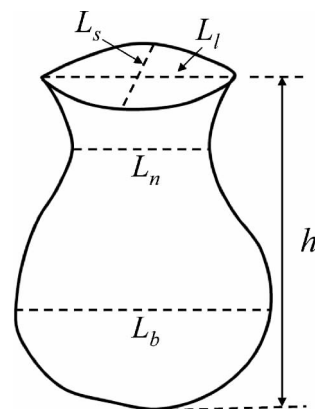


图 2 壶穴参数示意图

Fig. 2 Parameters of pothole

扁平程度。因此,本文试图借鉴扁率来刻画壶穴平面形态特征。 $e$ 为壶穴扁率,可用下式计算

$$e = [(1/2L_l) - (1/2L_s)] / (1/2L_l) = (L_l - L_s) / L_l \quad (1)$$

式中  $L_l$  为长轴长度,  $L_s$  为短轴长度,  $e$  是壶穴扁率。当  $e=0$  时,为圆形壶穴;当  $0 < e \leq 0.1$  时,为近圆形壶穴;当  $0.1 < e \leq 0.4$  时,为椭圆形壶穴;当  $0.4 < e < 1$  时,为极椭圆形壶穴。

## 2. 垂直剖面形态

河曲平面几何形态直观地简化为  $V$ 、 $U$  和  $\Omega$  型 3 种基本类型<sup>[27]</sup>,类似的,壶穴垂直剖面形态也可简化为:倒“ $\Omega$ ”型、“ $U$ ”型和“ $V$ ”型 3 种基本类型。以理想状态下典型的正圆形壶穴为例,当  $L_m > L_n < L_b$  或  $L_m \approx L_n < L_b$  时,壶穴的垂直剖面形态为倒“ $\Omega$ ”型;当  $L_m \approx L_n \approx L_b$  时,壶穴的垂直剖面形态为“ $U$ ”型;当  $L_m > L_n > L_b$  或  $L_m > L_n \approx L_b$  时,壶穴的垂直剖面形态为“ $V$ ”型。

壶穴发育过程按垂直剖面形态可分为 3 个阶段:幼年期(碟状壶穴)、青年期(“ $U$ ”型壶穴)、成年期(倒“ $\Omega$ ”型壶穴)<sup>[13]</sup>。其中,碟状壶穴实际为极浅“ $V$ ”型壶穴。

## 3. 深宽比

深宽比为壶穴深度与口径的比值,可用下式计算

$$r = h/L_m \quad (2)$$

式中  $h$  为壶穴深度,  $L_m$  为壶穴口径,  $r$  为壶穴口径深宽比。当  $0 < r \leq 0.5$  时,为极浅型壶穴;当  $0.5 < r \leq 1$  时,为浅型壶穴;当  $1 < r \leq 1.5$  时,为深型壶穴;当  $r \geq 1.5$  时,为极深型壶穴。

## 2.2 数据来源

本文选取了越溪河高坑瀑布砂岩河床和西溪河右岸、天心桥附近泥岩河床的壶穴为研究对象,用米尺、罗盘分别对两类岩性区河成壶穴的长轴、短轴、深度及长轴走向进行测量,测量时依次对每个壶穴进行编号、记录测量数据,并逐一观测、记录每个壶穴的垂直剖面形态,如直筒状(“ $U$ ”型)、口小肚大(倒“ $\Omega$ ”型)、口大肚小(“ $V$ ”型),共测量了 184 个壶穴。其中,高坑瀑布处砂岩河床上测量了 156 个壶穴,天心桥附近泥岩河床上测量了 31 个壶穴(泥岩河床上壶穴相对较少,研究区内共 31 个)。

## 2.3 处理方法

按标准统计方法计算各指标的统计参数、分布特征等,对这些数据进行对比和相关分析,数据的处

理软件主要为 Microsoft Excel。

# 3 结果与分析

## 3.1 壶穴形态对比

### 3.1.1 壶穴规模

两地壶穴规模有明显差异,主要表现在壶穴密度的多寡,长轴、短轴和深度的整体差异性。

高坑瀑布处砂岩河床上壶穴密度较大(在面积为 89.92 m<sup>2</sup> 的岩坎上,通过取样计算约有 1 158 个壶穴);天心桥附近泥岩河床上壶穴密度相对较小(面积为 78.66 m<sup>2</sup> 的河床上,总共 31 个壶穴)。

两地壶穴的长轴、短轴最明显的差异表现在长、短轴范围上。如图 3 所示,两地壶穴的长轴、短轴分布范围可划分为 A ( $6 \leq L_l \leq 80$ ,  $5.5 \leq L_s \leq 60$ ) 和 B ( $80 \leq L_l \leq 120$ ,  $40 \leq L_s \leq 90$ ) 两个区域,天心桥附近泥岩河床上壶穴在 A、B 区域均有分布,而高坑瀑布处砂岩河床上壶穴仅分布在 A 区域。

对壶穴深度进行统计分析(图 4),可知高坑瀑布处砂岩河床上壶穴深度范围为 2.5 ~ 56 cm,以深度 20 ~ 30 cm 居多,约占 52.56%,整体呈正态分布;天心桥附近泥岩河床上壶穴深度为 7 ~ 37 cm,以深度 7 ~ 10 cm 居多,约占 41.94%,整体呈逐渐减少的趋势。

### 3.1.2 壶穴平面形态

两地壶穴的平面形态有显著差异,主要体现在壶穴扁率和长轴走向的不同。

由表 1 可知,高坑瀑布处砂岩河床上壶穴近圆形壶穴最多,占 46.79%;其次为椭圆形壶穴、极椭圆壶穴,分别占 31.41%、20.51%;正圆形壶穴所占比例最少,仅为 1.28%;而天心桥附近泥岩河床上壶穴椭圆形壶穴最多,占 58.06%;其次为极椭圆壶穴,占 29.03%;无正圆形壶穴,仅有 12.9% 的接近正圆壶穴。

对比图 5 可知,高坑瀑布处砂岩河床上壶穴长轴走向均在 157.5° ~ 202.5°(中心为 180°) 间波动(图 5a);天心桥附近泥岩河床上壶穴长轴走向有两组,一组取值范围为 180° ~ 202.5°,另一组以 112.5° 为中心左右波动(图 5b)。

### 3.1.3 壶穴垂直断面形态

两地壶穴的垂直断面形态也有显著差异,主要体现在垂直剖面组合和口径深宽比的不同。

高坑瀑布处砂岩河床上壶穴垂直剖面组合以倒

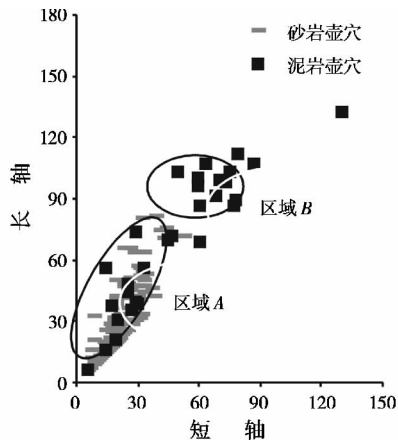


图 3 壶穴长、短轴分布图

Fig. 3 Regional distribution of long and short axes of popotholes

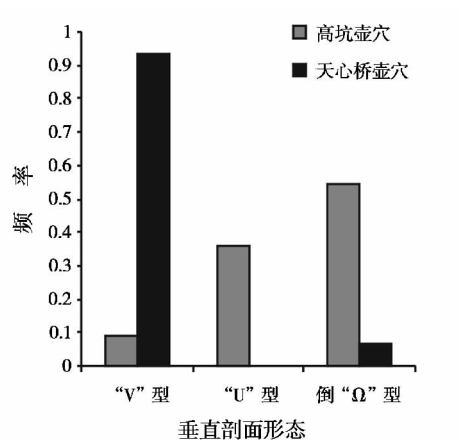


图 4 壶穴深度频率分布

Fig. 4 Frequency histograms of potholes depth

表 1 壶穴扁率统计表

Table 1 Statistic table of potholes oblateness

/%

地点	岩性	壶穴口径深宽比( r )			
		正圆形壶穴 ( e=0)	近圆形壶穴 ( 0<e≤0.1)	椭圆壶穴 ( 0.1<e≤0.4)	极椭圆壶穴 ( 0.4<e<1)
高坑瀑布处	砂岩	1.28	46.79	31.41	20.51
天心桥附近	泥岩	0	12.9	58.06	29.03

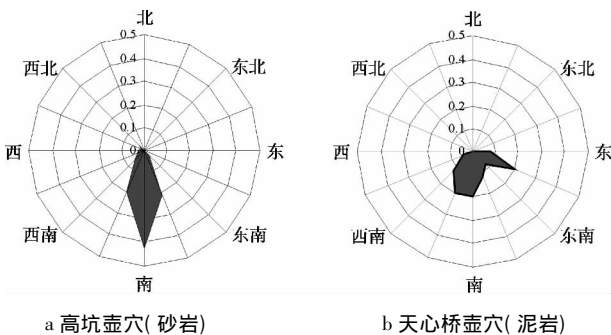


图 5 壶穴长轴走向

Fig. 5 Directions of the long axe of potholes

“Ω”型所占的比例最大,为 54.49 % ,其次是“U”型,为 40.38 % ,“V”型最少,仅有 4.49 % ;而天心桥附近泥岩河床上壶穴的垂直剖面组合仅 6.45 % 壶

穴呈倒“Ω”形,其余均呈“V”型壶穴,为 93.55 % ,详见表 2。

高坑瀑布处砂岩河床上壶穴以浅型壶穴和深型壶穴为主,分别占 46.15 %、41.67 % ,极浅型壶穴、极深型壶穴所占比例均较小,分别为 5.13 %、1.67 % ;而天心桥附近泥岩河床上壶穴以极浅型壶穴占绝对优势,高达 93.55 % ,其浅型壶穴、深度壶穴、极深壶穴所占比例均不足 5 % ,分别为 3.23 %、0 %、3.23 % ,详见表 2。

3.2 壶穴形态的成因

3.2.1 河成壶穴的概念模型

高坑壶穴和天心桥壶穴均为河成壶穴。河成壶穴是现代河流常见的微地貌形态,是水动力条件、推

表 2 壶穴垂直断面形态统计

Table 2 Statistic table of potholes vertical profiles

/%

地点	岩性	壶穴垂直剖面组合			壶穴口径深宽比( r )			
		倒“Ω”型 ( $L_m > L_n < L_b$ 或 $L_m \approx L_n < L_b$ )	“U”型 ( $L_m \approx L_n \approx L_b$ )	“V”型 ( $L_m > L_n > L_b$ 或 $L_m > L_n \approx L_b$ )	极浅型 ( $0 < r \leq 0.5$ )	浅型 ( $0.5 < r \leq 1$ )	深型 ( $1 < r \leq 1.5$ )	极深型 ( $r \geq 1.5$ )
高坑瀑布处	砂岩	54.49	40.38	4.49	5.13	46.15	41.67	1.67
天心桥附近	泥岩	6.45	0	93.55	93.55	3.23	0	3.23

移质、基岩、构造与时间等因素耦合作用的结果, 可以建立如下的壶穴概念模型

$$P = f(H, B, F, Bl) T$$

式中  $P$  为壶穴;  $H$  为水动力条件;  $B$  为基岩;  $F$  为构造;  $Bl$  为推移质;  $T$  为时间。

### 3.2.2 成因

#### 1. 水动力条件

河成壶穴的形成与发育与河床局部的流水特征相关<sup>[2]</sup>。越溪河高坑瀑布跌水坎上游河段比降大, 具有较大的水流速度, 在流经凹凸不平的岩坎上容易出现水流阻力, 使河床浅坑或岩石破碎处水流产生垂直轴漩涡流, 有利于壶穴的形成与发展, 故此处壶穴密度较大; 而西溪河右岸、天心桥附近处于河流转弯且变窄处易产生漩涡, 在一定程度上促进壶穴的形成, 但在河弯处单向环流作用下侧蚀加剧, 使河床的长度增加, 纵比降减小, 流速变低, 故天心桥壶穴密度较之高坑壶穴偏小。

越溪河高坑瀑布处河流水流方向接近正南 ( $180^\circ$ ) 方向, 而实地测得并拟合的风向玫瑰图(图 5a) 可知, 此处壶穴长轴方向多在  $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$  (中心为  $180^\circ$ ) 之间波动。西溪河右岸、天心桥附近位于河道转弯处, 水流方向复杂多变, 故长轴走向也相对较分散(图 5b)。

#### 2. 构造条件

壶穴趋向形成于软弱带(断裂、节理、层面等), 但形成软弱带的具体位置却是随机的<sup>[22]</sup>, 且有断裂或节理穿过的壶穴, 其长轴走向、长轴长度及扁率均会受到影响。如西溪河右侧、天心桥附近泥岩河床上节理比较发育, 实地测得天心桥 48.39% 的壶穴有节理穿过, 且有节理穿过的壶穴长轴走向与节理走向基本一致(图 6)。在挟带砂砾石的水流旋转磨蚀河床的过程中, 壶穴易沿节理冲切, 使其长轴变大, 故壶穴扁率也较大。因此, 节理发育是天心桥壶穴较之高坑壶穴长轴偏长、扁率偏大的另一因素。

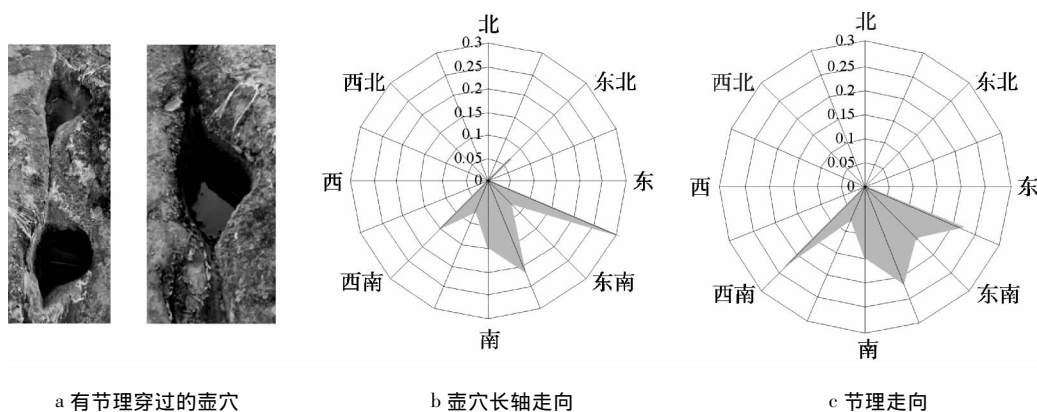


图 6 天心桥壶穴长轴走向与节理走向

Fig. 6 Directions of the long axis of Tianxingqiao potholes and joints

#### 3. 推移质特征

河成壶穴的发育与河床推移质相关, 在基岩裸露的河床, 适量的推移质(砂砾石)在水流带动下冲击磨蚀基岩的薄弱点, 使之成为洼坑; 洼坑里推移质在流水带动下旋转磨蚀, 逐渐形成壶穴。分别对高坑壶穴和天心桥壶穴内部的沉积物取样分析, 其粒径分析如图 7 所示。根据中国泥沙粒径分类标准, 高坑壶穴内部沉积物粒径以砾石、砂粒为主, 其中部分砾石磨圆度较好, 主要为砂岩, 还有少量石英岩、辉长岩和泥岩; 天心桥壶穴内部沉积物粒径以砂粒、粉砂为主, 主要为泥岩碎屑物, 还有部分砂岩、辉长岩和石英岩碎屑物。本研究主要从推移质的粒径大小、推移质的岩性的差异推测, 不同的推移质组合及

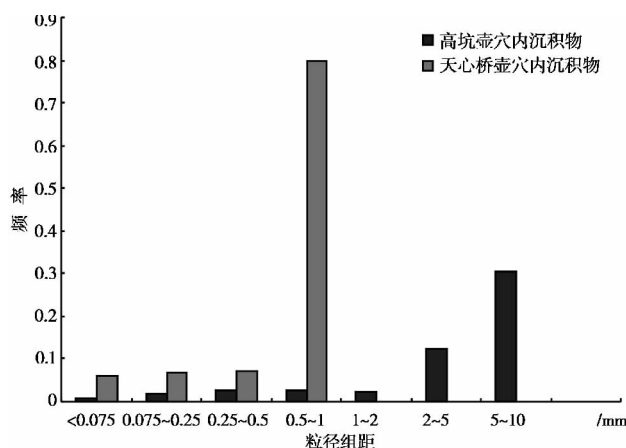


图 7 两地壶穴沉积物粒径分析

Fig. 7 Analysis of sediment grain size between two locations

岩性对壶穴形态有重要影响,但还需要做进一步的研究,才能更好的揭示推移质是如何对壶穴形态产生影响。

#### 4. 基岩性质与发育阶段

壶穴形成、发育和消亡均与河床基岩的岩性密切相关,基岩岩性不同影响壶穴形成的难易程度和保存程度,进而影响壶穴密度的多寡。一般而言,厚层致密,成分和结构比较均匀的岩性,在挟带砂砾石的高速水流旋转磨蚀河床薄弱点时,其周边不易冲切、破碎,利于壶穴的形成,而基岩河床的抗磨蚀性较好的岩性能使壶穴更好的保存。另外,两地壶穴的垂直剖面组合的差异性,主要与基岩性质及壶穴自身的发育阶段有关。

在高坑瀑布跌水坎上部河床出露的主要是侏罗系上沙溪庙组( $J_2sx^2$ )河流相砂岩,厚层致密,成分和结构比较均匀,同时其长石含量较高,矿物硬度较高,扩容速度相对较慢,易保存,故高坑壶穴形成壶穴密度大且不同发育阶段(碟状、“U”型和倒“Ω”型)的壶穴同时出现在岩坎上。而在西溪河右岸、天新桥附近,河床出露的主要是侏罗系上统遂宁组下段( $J_3s^1$ )河湖相棕紫色泥岩,泥岩较之成分均匀的致密块状砂岩,更易冲切、剥离难形成固定形状,且泥岩硬度相对较软,不易保存,故天心桥处一般只有雏形(碟状)壶穴出现,发育较成熟的壶穴(“U”型、倒“Ω”型壶穴)很少出现在泥岩上。

## 4 结论与讨论

1. 川中丘陵地区砂岩、泥岩壶穴的形态差异主要表现在规模、平面形态、垂直断面形态的不同。从规模讲,砂岩壶穴的密度和深度较泥岩壶穴偏大,而长、短轴则较之偏小;在平面形态上,砂岩壶穴的扁率较泥岩壶穴偏小;在垂直断面形态上砂岩壶穴的口径深宽比较泥岩壶穴偏大,且砂岩壶穴以倒“Ω”型、“U”型为主,泥岩壶穴极浅“V”型为主。这与两地局部的水动力条件、构造、推移质、基岩与时间等因素密切相关。

2. 我国壶穴研究多以北方及东南区域为主,而西南地区的壶穴还鲜有人涉猎。其中,内蒙、河北丰宁等地的壶穴多发育于花岗岩基岩上,被认为是风化风蚀地貌<sup>[18]</sup>;在研究广东范围内“冰臼”与“壶穴”之争时,壶穴被认为是高速旋转的水流挟带砂砾石旋转磨蚀河床形成的流水侵蚀地

貌<sup>[1,4-10,12,15]</sup>。流水侵蚀是最普遍的壶穴类型,可分为河成壶穴、冰川外缘的冰水河流壶穴和海成壶穴<sup>[26]</sup>。川中丘陵区内高坑壶穴和天心桥壶穴均为河成壶穴,是水动力条件、推移质、基岩、构造与时间等因素耦合作用的结果,并建立相关壶穴概念模型。本研究将丰富与完善壶穴地貌的非地带性特征及区域代表性,为川中丘陵区的河流地貌演化过程及机制增添新证据,为河流地貌学的发展提供推动力。

3. 壶穴可形成于花岗岩、砂岩、粉砂岩、泥岩中等各类岩石,但岩石的硬度不同将影响壶穴口径、深度的大小,形成的难以程度和保存程度<sup>[22]</sup>,玄武岩石上壶穴宽深比和单位面积壶穴密度都要小于火山凝灰岩和海滩岩<sup>[28]</sup>,砂岩上的壶穴易于保存<sup>[29]</sup>。而本研究中发现类似结论,泥岩上的壶穴深宽比和密度都小于砂岩上的壶穴,岩性较硬的砂岩壶穴较之岩性较软的泥岩壶穴更易保存。

4. 本文基于野外实地测量,从壶穴规模、平面形态、垂直断面形态等几个方面,比较了砂岩和泥岩区壶穴的形态差异性,并分析其原因,但仍存在以下三方面的不足:一是在泥岩河床上测量壶穴的数量有限,其规模、形态的分布特征可能有些偏差。二是由于受收集资料和野外采集数据类型不完整的限制,本文对垂直断面的划分尚属于定性,下一步需要对其垂直断面形态进行定量刻画;三是本研究着重研究了壶穴规模、壶穴形态比例,但对两地壶穴的空间格局未进行研究,这些都是以后需要深入的研究方向。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Chaoqun. A review of the controversy over the question of moulin and pothole [J]. Tropical Geography, 2001, 21(1): 86-93 [杨超群. 冰臼与壶穴之争述评[J]. 热带地理, 2001, 21(1): 86-93]
- [2] Wang Wei, Huang Shang, Liang Mingzhu. Formation and development of the potholes formed in a gorge river in Guangdong [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 691-697 [王为, 黄山, 梁明珠. 广东大峡谷河床壶穴形态的形成与发育[J]. 地理学报, 2007, 62(7): 691-697]
- [3] Alexander H S. Pothole erosion [J]. The Journal of Geology, 1932, 40(4): 305-337
- [4] Li Menghua, Xie Xiaokang. A Discussion "glacial-mortar" and "pot-hole" [J]. Tropical Geography, 1999, 19(4): 381-384 [李孟华, 谢小康. 冰臼与“壶穴”之争[J]. 热带地理, 1999, 19(4): 381-384]
- [5] Chen Huatang, Qiu Shijun, Huang Shan, et al. A discussion on the cause of formation of the pot-hole landform in Jiexi and Fengshun

- counites, Guangdong [J]. Tropical Geography, 1999, 19(4): 376-380 [陈华堂, 丘世钧, 黄山, 等. 揭西、丰顺“冰臼群”成因商榷[J]. 热带地理, 1999, 19(4): 376-380]
- [6] Zhu Zhaoyu. A preliminary investigation on landform and weathered horizon in river valley in Jiexi County, Guangdong Province [J]. Tropical Geography, 2000, 20(4): 331-336 [朱照宇. 广东揭西河谷地貌与风化层特征初步观察[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 331-336]
- [7] Liu Shangren, Qin Chaofeng, Peng Hua. The discussion on the condition for glacier whether developed in Guangdong [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(4): 376-380 [刘尚仁, 覃朝锋, 彭华. 关于广东有无冰川发育条件的讨论[J]. 地理科学, 2000, 20(4): 376-380]
- [8] Qiu Shijun, Chen Huatang, Huang Shang, et al. Re-discussion on moulins and pot-holes [J]. Tropical Geography, 2000, 20(3): 243-246 [丘世钧, 陈华堂, 黄山, 等. 与“冰臼论”再商榷[J]. 热带地理, 2000, 20(3): 243-246]
- [9] Editorial Department of Tropical Geography. A talk with fluvial and glacial potholes by Shi Yafeng, Academician of Chinese Academy of Sciences [J]. Tropical Geography, 2002, 22(1): 1-2 [热带地理编辑部. 中国科学院院士施雅夫谈“冰臼”与“壶穴”[J]. 热带地理, 2002, 22(1): 1-2]
- [10] Xie Xiaokang. A discussion about tourism exploitation of moulin and geologic vestige [J]. Tropical Geography, 2007, 27(1): 92-96 [谢小康. “冰臼”与地质遗迹旅游开发问题的讨论[J]. 热带地理, 2007, 27(1): 92-96]
- [11] Lu Hongbo, Ren Xiaohun, Xu Ming, et al. An argument on the genesis of potholes formed by differential weathering or wind deflation [J]. Geological Review, 2008, 54(2): 192-198 [吕洪波. 任晓辉, 许民, 等. 壶穴差异风化或风蚀作用成因质疑[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 192-198]
- [12] Wang Shaohong. No Quaternary glacier ever existed in Fujian [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(1): 83-88 [王绍鸿. 福建第四纪不可能有冰川活动[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(1): 83-88]
- [13] Gu Zhongliang, Feng Hangjian. Discussion of forming conditions and patterns in pan'an dapanshan geopark potholes group [N]. Land and Resources in Zhejiang Province, 2011, (7): 57-58 [顾忠良, 冯杭建. 磐安大盘山地质公园十八洞壶穴群形成条件和模式探讨[N]. 浙江国土资源, 2011, (7): 57-58]
- [14] Wu Zhen, Xu Quanhong, Zhao Yaoxia, et al. A study on multi-original potholes in north China mountain regions—a discussion on "glacial potholes" and other "glacial landforms" in north China mountain regions [J]. Geological Review, 2012, 58(2): 319-328 [吴忱, 徐全洪, 赵艳霞, 等. 华北山地多成因壶穴初步研究——对华北山地“冰臼”等“冰川地貌”的讨论[J]. 地质论评, 2012, 58(2): 319-328]
- [15] Wu Zhen. Pothole—a mark of fluvial erosion on ancient landform: discuss with Han T1 in about moul in of northern north China in the book of 《Moul in Discovery》 [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 74-77 [吴忱. “冰臼”是古地貌面上的流水侵蚀遗迹——壶穴——就韩同林《发现冰臼》一书中的资料谈华北北部的“冰臼”[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 74-77]
- [16] Zen E, Prestegard K L. Possible hydraulic significance of two kinds of potholes: Examples from the paleo-Potomac River [J]. Geology, 1994, 22(1): 47-50
- [17] Cui Zhijiu, Li Hongjiang, Nan Ling, et al. Discovery and environmental significance of Huge Pots of Hebei Province and Inner Mongolia and Chifeng Wind Route [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(13): 1429-1433 [崔之久, 李洪江, 南凌, 等. 内蒙、河北巨型壶穴与赤峰风道的发现[J]. 科学通报, 1999, 44(13): 1429-1434]
- [18] Li Hongjiang, Cui Zhijiu, Zhao Liang. Origin of pots in Inner Mongolia and northern Hebei [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(2): 223-231 [李洪江, 崔之久, 赵亮. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨——兼论壶穴成因分类[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 223-231]
- [19] Zhong Jianhua, Ni Jinren, Shen Xiaohua, et al. Study of potholes in the lower reaches of the Yellow River [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 280-260 [钟建华, 倪晋仁, 沈晓华, 等. 黄河下游壶穴的研究[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 279-286]
- [20] Springer G S, Tools S, Wohl T T. Wohl. Dynamics of pothole growth as defined by field data and geometrical description [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(F4): 4-10
- [21] Springer G S, Tools S, Wohl E E. Theoretical modeling of stream potholes based upon empirical observations from the Orange River, Republic of South Africa [J]. Geomorphology, 2006, 82(1): 160-176
- [22] Wang Wei, Xu Liubing, Wu Zheng, et al. Shape and spatial distribution features of marine potholes on the coast of Shenzhen, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(3): 320-330 [王为, 许刘兵, 吴正, 等. 深圳海岸壶穴的形态及空间分布特征[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 320-330]
- [23] Grab S, Svensen H. Rock doughnut and pothole structures of the Clarens Fm. Sandstone in the Karoo Basin, South Africa: Possible links to Lower Jurassic fluid seepage [J]. Geomorphology, 2011, 131(1): 14-27
- [24] Sengupta S, Kale V S. Evaluation of the role of rock properties in the development of potholes: A case study of the Indrayani knick-point, Maharashtra [J]. Journal of earth system science, 2011, 120(1): 157-165
- [25] Zhou S Z. Are all potholes markers of quaternary glaciations? [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 117-125 [周尚哲. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗? [J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 117-125]
- [26] Zheng Benxin. Discussion and analysis on the origin of rock pot, pothole and bingjiu—A perspective on genesis classification of the difference among rock pot, pothole and moulin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 498-504 [郑本兴. 石臼、壶穴、冰臼辩——论岩臼、壶穴和冰穴的成因分类[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 498-504]
- [27] Zhang B, Ai N S, Huang Z W, et al. Meanders of the Jialing River in China: morphology and formation [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 1-10

- 2008, 53(2): 267 – 281
- [28] Abbott A T, Pottratz S W. Marine pothole erosion, Oahu, Hawaii [J]. Pacific Science, 1969, 23(3): 276 – 290
- [29] Hsi – Lin T. Marine potholes of Hong Kong [J]. Chung Chi Journal, 1969, 6(1): 50 – 58

## Morphological Comparison and Cause of River Potholes in Sichuan Hilly Area

LIU Xiaojiao<sup>1</sup>, XU Juan<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, LIU Shoujiang<sup>1</sup>, QIN Fachao<sup>1</sup>, LUO Mingliang<sup>1</sup>

(1. Land and Resources College, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

2. School of Resources and Environment, Baoshan College, Baoshan 678000, Yunnan, China)

**Abstract:** River potholes, proving some records of the evolution of the drainage and geomorphological, is one of the crucial evidences of the interaction between water and riverbed boundary conditions. Therefore, we take river potholes from two kinds of rock properties area (sandstone and mudstone) in Sichuan Hilly Area of China as research objects. Based on the precise measurement of the field, this paper defines scale and the proportion of pothole morphologic parameter, compares the morphological of river potholes from the two kinds of rock properties and analysis of its causes. It is showed that the density and depth of potholes from sandstone bedrock is larger than potholes from mudstone bedrock in terms of scale, on the contrary, the long and short axis of potholes is smaller. As to plane morphologic of potholes, the oblateness of potholes from sandstone bedrock is smaller than potholes from mudstone bedrock. As to vertical profiles of potholes the depth and width ratio of the potholes from sandstone bedrock is larger than potholes from mudstone bedrock and potholes from sandstone bedrock dominated by inverted  $\Omega$  – and U – shape, however, potholes from mudstone bedrock dominated by V – shape. The above-mentioned is closely related to hydrodynamic conditions of river, fracture, bedload, lithology and time and establish conceptual model of the potholes. This study will enrich and improve the azonal characteristics and regional representation, provide a scientific basis for the evolution of fluvial geomorphology in Sichuan Hilly Area.

**Key words:** Sichuan Hilly Area; river potholes; morphological; compare; causes