

# 广东大峡谷河床壶穴形态的形成与发育

王为<sup>1</sup>, 黄山<sup>1</sup>, 梁明珠<sup>2</sup>

(1. 华南师范大学地貌与第四纪环境研究所, 广州 510631;

2. 暨南大学旅游研究所, 广州 510631)

**摘要:** 对广东中新世夷平面上大布河强烈下切的广东大峡谷源头河段的 227 处壶穴形态特征进行详细测量并做统计分析, 结合野外观测结果从统计学的角度定量地描述壶穴的形成和发育过程。研究得出以下结论: 壶穴的形成与发育只与河床局部的地质、地貌、流水特征有关, 其形成始于河床床面薄弱处和三角(撞击)坑; 壶穴形态受构造节理控制; 壶穴发育过程中, 深度与口径间有很强的(对数)正相关关系; 壶穴发育过程中, 其形态和流水作用的形式不是固定的; 在下切强烈的河段, 作为河床下切的侵蚀形式之一, 壶穴形成既不需要很长时间, 也不能充分发育, 而且难以长期保留。以统计方法定量地研究河流壶穴有助于解决广东第四纪环境的有关争论。

**关键词:** 广东大峡谷; 河床壶穴; 形态特征; 统计学

壶穴(Pothole)有多种成因: 河水侵蚀、冰水侵蚀、冰融水滴蚀、冰压刻、风蚀、浪蚀、风化乃至圆砾铸模<sup>[1, 2]</sup>, 任一种成因的坑穴都可称之为 "Pothole"<sup>[2]</sup>。根据已有文献, 我国河蚀壶穴见于广东、黄山、黄河壶口、香港等地河谷<sup>[1-6]</sup>, 浪蚀壶穴在台湾花莲、野柳、香港及广东等地海岸均有发现<sup>[3, 6]</sup>, 而河北丰宁、内蒙赤峰则有风化风蚀型壶穴形成<sup>[4, 5]</sup>。值得一提的是, 广东的河蚀壶穴, 河北、内蒙的风化风蚀壶穴被个别学者认为是冰融水侵蚀的冰臼<sup>[7, 8]</sup>。

壶穴是研究人类生存环境变化的良好载体<sup>[1]</sup>, 壶穴的研究不仅有其形成过程中的地貌学意义, 更重要的是其背后的环境学意义, 对壶穴形成不同的见解会导致完全不同的地球环境演化方向结论。壶穴是广东地区现代山区河流中常见的河床微地貌, 如果广东地区河床上的壶穴是河成壶穴, 那是再普通不过的事情, 但如果是冰臼(冰川壶穴), 则广东地区必定出现过冰川, 壶穴研究的意义不言而喻。

壶穴研究在国外有很长的历史, 与壶穴研究相关的文献最早可追溯到 19 世纪中叶<sup>[6]</sup>。我国直到近年来由于与大冰盖理论相关的冰臼引起的争论, 才直接或间接地导致较多专门研究壶穴的文献出现<sup>[1-3, 5, 7-11]</sup>, 国外上世纪初也出现过类似的争论<sup>[12]</sup>。目前我国与壶穴相关的研究描述成分居多, 相比之下, 国外相关研究有较高的定量程度<sup>[12-14]</sup>。本文以广东北部山区乳源瑶族自治县西南 68 km 的大布河峡谷(成为旅游景点后称广东大峡谷)瀑布潭到黄龙潭段的壶穴为对象, 对其形态特征进行详细的测量并做统计分析, 将计算结果与野外观测结合, 定量地探讨河成壶穴的形成和发育过程。

收稿日期: 2007-03-23; 修订日期: 2007-05-10

基金项目: 广东省自然科学基金项目(031529); 华南师范大学科技冲顶计划项目(844032)资助 [Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong, No.031529; Fund from South China Normal University, No.844032]

作者简介: 王为(1956-), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 地貌与第四纪; 海岸环境与管理。

E-mail: wangw@scnu.edu.cn

通讯作者: 黄山(1961-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 地貌与沉积。E-mail: shanhuang@scnu.edu.cn

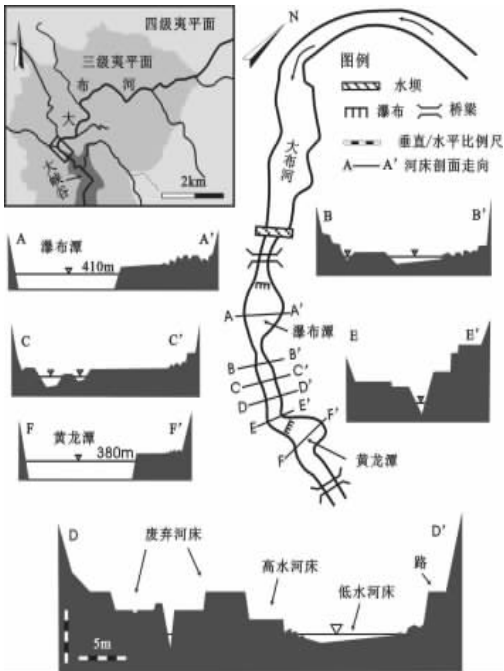


图 1 广东大峡谷河段河床剖面

Fig. 1 Location of the study area and cross-sections along the study reach of the Dabu River

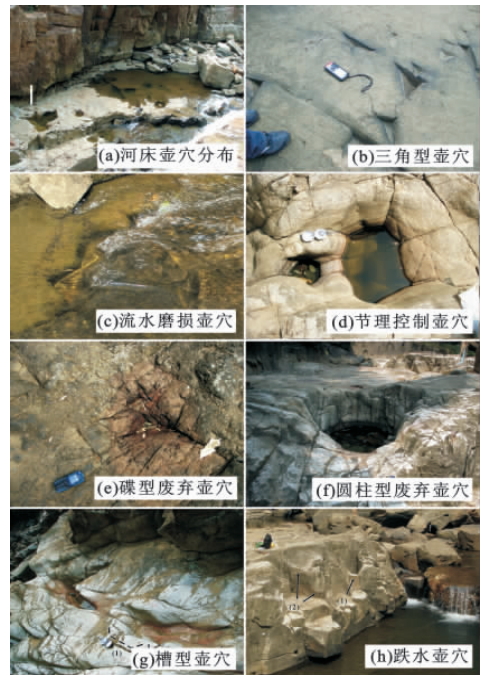


图 2. 壶穴形态特征

Fig. 2. Morphological features of potholes including triangular pits and groove holes.

## 1 研究区位置及地质背景

该地区基岩为泥盆纪砂页岩，倾向北北西，倾角约  $5^\circ$ ，个别部位可超过  $10^\circ$ 。大布河发育于大布镇以北海拔 1100~1200 m 的京坑坳，向西南流经海拔 650~750 m 保存完好、面积约 202 km<sup>2</sup> 平坦的夷平面，在大布圩东南约 3 km 折向东南突然下切 200 余 m，成为峡谷，河水呈瀑布流入峡谷，然后在群山中向南延伸 20 多 km 后进入 100~200 m 海拔的丘陵地带，峡谷谷坡陡峻，常显隘谷形态 (图 1)<sup>[4]</sup>。

观测地点在峡谷源头瀑布潭到黄龙潭段，长约 400 m，河床海拔从 410 m 降到 380 m (气压计测量)。由构造作用产生的垂直节理主要有 5 组，实测走向分别为： $5^\circ\sim 20^\circ$ 、 $35^\circ\sim 50^\circ$ 、 $60^\circ\sim 70^\circ$ 、 $270^\circ\sim 280^\circ$ 、 $315^\circ\sim 335^\circ$ ，倾角  $70^\circ\sim 88^\circ$  之间，实测结果与前人研究基本一致<sup>[5]</sup>。河床形态为典型的山区侵蚀性基岩河床，河床落差大，表现为纵向多跌水、瀑布，所以其石质床面纵向坡度并不大；横剖面石质深槽、浅滩交错 (图 1)，石质深槽、石质浅滩又分别称低水河床和高水河床<sup>[4]</sup>。

## 2 野外记录及计算方法

大布河谷壶穴平面形态多样，有圆形、椭圆形、三角形、四边形、多边形乃至长条形 (图 2)。三角形壶穴记录其深度，三条边的长度及走向，其口径按三条边的平均值计算。其他壶穴记录其深度，长短轴长度和相应的长轴走向 (短轴走向按与长轴走向正交计算)，其口径大小按长短轴之和的平均值计算，其中长短轴比超过平均值 2 个标准差作为槽型壶穴，其他作一般壶穴；为知道各壶穴所在的上下游位置，记录从瀑布潭开始向下游顺序进行，并对每个壶穴编号，一直到黄龙潭，共测量壶穴 227 个，其中三角形壶穴 56 个、一般壶穴 153 个，槽型壶穴 18 个。

按标准统计方法计算各指标的统计参数 (平均值、方差等)、分布特征等; 对有关数据进行分布类型对比, 相关分析和回归分析, 必要时对非线性数据进行线性转换, 并按标准统计方法对各种计算结果进行统计检验<sup>[6]</sup>。

### 3 壶穴形态的影响因素

#### 3.1 壶穴形态与产出部位

大布河谷的低水河床 (在考察时仍有水流) 上壶穴并不多见, 大部分壶穴形成于高水河床基岩面上或形成于跌水背水一侧。壶穴的平均直径、深度、长短轴比沿测量河床上下游段的变化无明显的规律, 即大小, 深度和形态不同的壶穴可同时出现在河床的某一段 (图3)。这意味着壶穴由小变大的发育过程与该河段的平均水量和流速无直接关系, 而与该河段河床局部的地质、地貌、流水特征有关。

一般壶穴深度多 < 10 cm, > 25 cm 的约占 15% (图 4a), 而且多形成于河床基岩面上的。壶穴的垂直剖面形态可分碟形和圆柱形, 没有发现口小肚大者。碟形壶穴深度小, 口径远大于深度; 圆柱形壶穴深度相对较大, 有较明显的桶壁, 大部分圆柱形壶穴也是口径大于深度。形成于跌水背水一侧的壶穴深度则多为圆形壶穴, 深度大于或接近口径, 其桶壁上游高、下游低, 两者高度相差甚大 (图 2h)。

#### 3.2 壶穴形态与河床岩石节理

野外观测发现河床基岩面上 (包括槽型壶穴) 或跌水背水一侧的壶穴底部多为构造裂隙 (节理或节理交汇处)。一般壶穴长短轴比等于 1 (正圆) 的并不多, 不到 1%, 等于 1.5 的占 40% (图 4b), 但长短轴走向是有选择性的, 主要有两个方向, 大部分在 315°~335° 之间, 并与河流 (谷) 走向平行, 另一组与之正交, 在 40°~50° 之间 (图 5a)。以上说明壶穴起源于河床的软弱处, 其形态受构造节理控制。

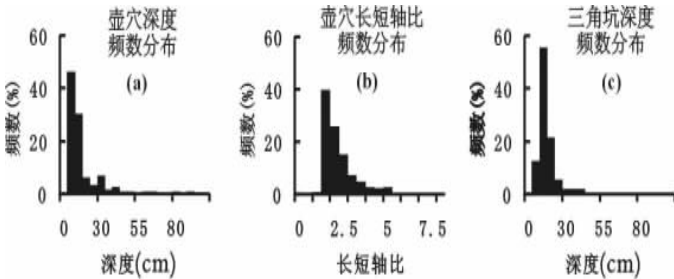


图 4 壶穴深度(a), 长短轴比(b)及三角坑深度(c)频数分布

Fig. 4 Histograms of depths and ratios of long to short axes of potholes, and triangular pit depths

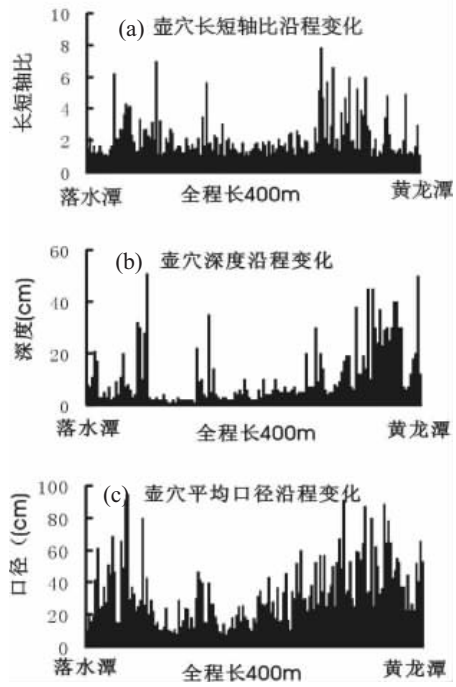


图 3 壶穴形态、深度、口径的沿程变化  
Fig. 3 Changes in pothole shapes, depths and sizes along the study reach of the Dabu River

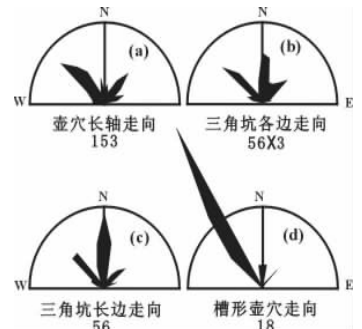


图 5 壶穴长轴、三角坑各边、三角坑长边、槽型壶穴走向 (图中数字为样本数)

Fig. 5 Directions of long axes of potholes, each edge and the longest edge of triangular pits, and groove holes

大部分三角壶穴(坑)虽然也发育于基岩河床面上,但并非发育于软弱处。这些三角坑形态特征与电镜下石英砂表面的撞击三角坑十分相像(图2),而且壶穴的三条边的走向不是随机的,而是比较固定地分布在3个方向,与岩石主要垂直节理中的几组走向一致(图5b),显然是被撞击后沿节理破碎而成,这只能是洪水带动的石块对河床面基岩撞击后留下的凹坑,其形态也受构造节理控制。

长短轴比超过平均值两个方差的槽形壶穴的长轴多与河流走向一致(图5d),这些长条形的壶穴往往不是简单的槽形,而是串珠状的槽形,其剖面 and 侧面形态表明它们是由多个壶穴沿同一节理发育,最后连通而成(图2g),显然是流水沿纵向节理侵蚀的结果。

### 3.3 壶穴形态与发育过程

壶穴的长径和短径作对数变换后有很强的正相关关系( $R = 0.82$ ),其最佳回归方程是幂 $<1$ 的函数曲线(图6a, d)。这说明壶穴在发育过程中口径不断扩大,但长轴增长快于短轴,不容易形成正圆形壶穴,这进一步说明节理的控制作用。

尽管三角坑的三条边走向多在三个方向上(图5b),但长边可位于三方向的其中之一,即三角坑的方位不是固定的(图5c)。然而,不管其方位如何,三角坑向下游的一边被磨蚀程度总比上游的强或者三角坑的上游边仍然尖锐而下游边已被磨损(图2b)。根据流体力学原理(沿流向物面半径越小,流体越容易分离<sup>[17]</sup>),将各边的磨损程度与三角坑水流特征对比(图2b-e)可以推断,流水在上游边因床面边界突然改变产生分离形成回流,所以流水对三角坑下游边的侵蚀强于上游边,下游边被磨圆向下游后退,上游边回流减弱,侵蚀增强,也被侵蚀向上游后退。三角坑在各条边都被磨蚀后,口径扩大、变圆(图7)。野外还可以观测到上层为圆碟形,下部仍为三角形的壶穴(图2e)。

三角坑的深度与口径的线性相关系数为0.74,其最佳回归曲线是系数 $>1$ 的线性曲线(图6b),表明在三角坑发育过程中,口径扩大快于深度,这与上述野外观测现象是一致的。一般壶穴的深度与口径间的线性关系不明显( $R = 0.49$ ),做对数变换后有较高的线性相关关系( $R = 0.72$ ,图6b)。反变换后,壶穴的最佳回归曲线是幂 $<1$ 的幂函数曲线(图6d)。这表明壶穴发育初期,也是口径大深度小,口径扩大快于深度,但最终深度变大快于口径,随深度增加壶穴可形成桶壁。

从壶穴所处的位置可知,位于跌水处的壶穴的形成始于垂直水流对基岩河床面跌水下的软弱处(节理或节理交汇处)的冲刷。深度大于直径的形态特征表明,垂直水流对这类壶穴底部的向下侵蚀远大于对水平方向或侧向(桶壁)的侵蚀,因此节理对壶穴形态的控制不如前类壶穴明显,壶穴初始形态(既还没有形成桶壁时)也相对简单,多为圆形或椭圆形。

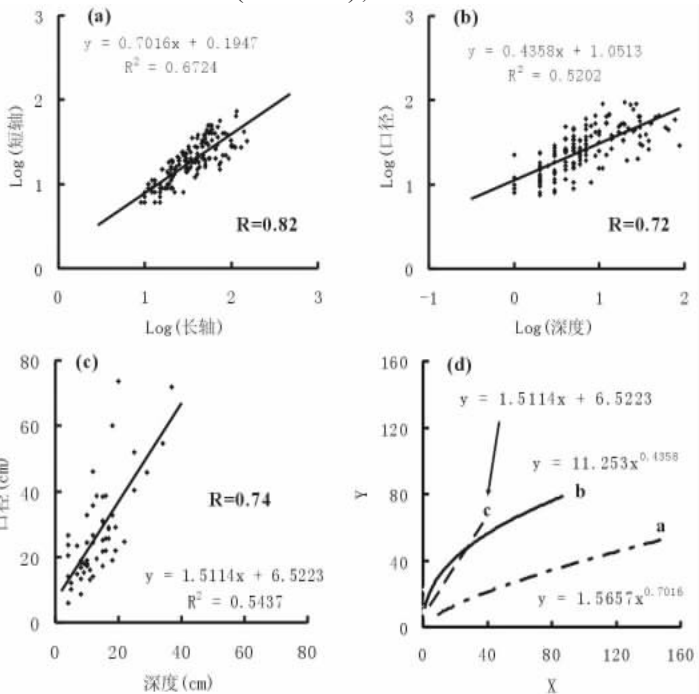


图6 壶穴及三角坑深度/口径、壶穴长径/短径相关与回归分析

Fig. 6 Plots of long-axis versus short-axis for potholes and triangular pits, depth versus size for triangular pits, correlation coefficient and regression lines

### 3.4 壶穴形态与壶穴消亡

废弃河床形成于河谷下切使原来的高水河床相对抬升<sup>[5]</sup>, 当其高于洪水位时, 原来床面上的壶穴因不再受流水作用而停止发育, 成为废弃壶穴。又由于河床基岩节理丰富, 废弃壶穴的边缘、底部、桶壁因受风化作用总是坑坑洼洼(图 2e, f), 并最终要被风化掉。正受流水作用的壶穴的底部、桶壁、边缘则是光滑的(图 2h), 与前者明显不同。

野外随时可见跌水下游壁上半边壶穴的痕迹(图

2h)。可见形成于跌水下方壶穴的出水沿也会因为跌水的下游河床向上游后退最终被侵蚀掉, 壶穴随之消失, 跌水下游河床也因此被下切, 所以壶穴发育过程是溯源侵蚀的作用方式之一。另外, 上述多个壶穴沿节理连通后合并成槽形壶穴, 使原有壶穴消失(图 2g)。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 河成壶穴的形成与河床岩石节理有无关系, 壶穴论者本身就有不同的发现: 汀江上游花岗岩河床发育的壶穴与节理无关<sup>[4]</sup>。揭西石肚溪花岗岩河床发育的河流壶穴则与裂隙有关<sup>[5]</sup>, 冰川论者认为这些壶穴是冰臼, 并认为与裂隙无关<sup>[7]</sup>。内蒙和河北花岗岩上的风成壶穴是气候地貌, 其长轴也是有选择性的, 但与气候因素有关<sup>[2]</sup>。还有研究认为岩臼形成的寄主岩石应为均匀的易风化岩石<sup>[8]</sup>。我们的统计数据极其明显地表明, 寄主岩石为并不均匀的砂页岩河床中不仅会产生流水壶穴, 而且其形态和形成发育都受河床岩石节理控制, 而且我们有足够的样本量说明这一点。

(2) Springer 等的研究认为壶穴深度与口径间存在对数线性关系, 其最佳回归曲线也是幂  $< 1$  的函数曲线, 但在不同的岩石地区方程具有不同的系数和幂<sup>[13, 14]</sup>。我们的研究也得到类似的方程, 说明方程表达的可能是壶穴发育的普遍规律。我们的回归方程的判定系数超过 0.5(图 6), 说明有超过 50% 的被观测壶穴是服从这样的规律的。但 Springer 等的方程有更高的判定系数。Springer 等认为壶穴在发育过程中口径不断增大, 不会变小, 但深度则有可能因为河床降低而减小, 并使数据分布的(对数)正态程度减弱<sup>[14]</sup>。是否是因为峡谷河床下切强烈还是其他原因造成我们的方程的判定系数偏低还有待进一步研究, 但在我们的研究中深度超过 25 cm 的壶穴只有 15%, 说明研究河段的壶穴不能充分发育。

(3) 大布镇所在的第三级夷平面, 即所谓的阳山面形成于晚渐新世到中中新世<sup>[4, 18]</sup>。研究河段是峡谷切入夷平面的切入端, 其下切强烈, 夷平面与河床相差 200 多米。在强烈下蚀的峡谷河段, 壶穴作为河床下切的侵蚀形式之一<sup>[19, 20]</sup>, 其形成肯定不需要很长的时间, 否则, 河床下切就会很慢。国外曾报道过 60 年就能形成的壶穴<sup>[21]</sup>。另一方面, 壶穴也不会保留很久, 野外观测到的废弃壶穴即有碟形的也有圆柱形的现象(图 2e, f), 说明有些壶穴还没有充分发育成圆柱形就成废弃壶穴了。试想从中新世到现在, 在下切 200 多米的过程中, 有过多少高水河床转化为废弃河床, 有过多少跌水后退和壶穴连通。由于强烈的侵蚀, 更不可能有壶穴形成后被埋藏, 等到今天才被流水冲刷出来。总之, 在这种侵蚀强烈的峡谷源头, 河床上的壶穴不断出现, 不断地消亡, 现代河床上的壶穴就是现代壶穴。

(4) Alexanda 根据形成壶穴的水流特征将壶穴分为三类, 1) 旋转流壶穴(eddy holes), 由旋转轴垂直的旋转水流冲刷形成的壶穴; 2) 半圆凿壶穴(gouge holes), 纵向水流从壶穴上游向下游冲刷形成的壶穴, gouge holes 的长轴有时可以几倍于短轴; 3) 跌水壶穴

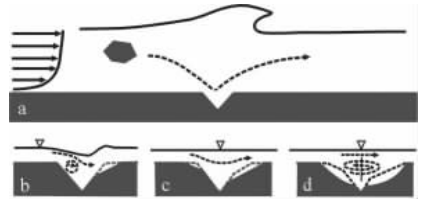


图 7 三角坑成因及发育过程示意图  
Fig. 7 Schematic illustration for development of a triangular pit

(plunge holes), 由垂直水流冲刷打击形成的壶穴<sup>[12]</sup>。根据 Alexanda 的实验, 当有桶壁形成时才能形成旋转水流<sup>[12]</sup>, 旋转水流对壶穴边缘的冲刷使壶穴趋向圆形, 深度变大后, 垂直剖面呈圆柱形。

(5) 三角坑发育过程的最佳回归曲线是系数  $> 1$  的线性方程, 显然不同于一般壶穴发育过程的幂函数曲线 (图 6 c, d), 但深度大于 25 cm 的三角坑只占 5% (图 4c), 既三角坑深度发育到一定程度就很难再加大了 (图 6d)。所以三角坑只能是壶穴早期发育的形式之一。从野外观测到的三角坑水流特征看, 三角坑属于 gouge holes。

(6) 两个回归模型 (图 6d 中回归曲线 c 和 b) 对比表明, 无论是形成于三角坑还是河床面薄弱处的壶穴锥形深度都很小, 此阶段回归曲线比较陡, 表明壶穴的宽度增加明显快于深度 (图 6d), 没有明显的桶壁, 属碟形壶穴, 按流水作用方式划分属 gouge holes。随后, 壶穴深度加大, 最终要形成桶壁, 转化为圆柱形壶穴, 成为 eddy holes。当发育于同一节理上的壶穴扩大连通后, eddy holes 又转化为槽型壶穴, 此时又成 gouge holes。所以壶穴发育过程中, 流水作用的形式也不是固定的。

## 4.2 结论

(1) 壶穴的形成与发育只与河床局部的地质、地貌、流水特征有关;

(2) 壶穴形成始于河床床面薄弱处和三角 (撞击) 坑, 其形态受构造节理控制;

(3) 壶穴发育过程中, 深度与口径间有较强的正 (对数) 相关关系, 其回归曲线是幂  $< 1$  的幂函数方程;

(4) 壶穴发育过程中, 其形态和流水作用的形式不是固定不变的;

(5) 壶穴是河床下切的侵蚀形式之一, 在下切强烈的河段, 壶穴形成不需要很长时间, 但不能充分发育, 也难以长期保留, 现代河床上的壶穴就是现代壶穴。

致谢: 华南师范大学彭亚非、张智霖、李乾坤等参加了野外工作。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhong Jianhua, Ni Jinren, Shen Xiaohua. Study of potholes in the lower reaches of the Yellow River. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 280-260. [钟建华, 倪晋仁, 沈晓华. 黄河下游壶穴的研究. *地质学报*, 2002, 76(2): 280-286.]
- [2] 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. *Chinese Science Bulletin*, 1999, (7): 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. *科学通报*, 1999, 44(13): 1429-1434.]
- [3] Li Hongjiang, Cui Zhijiu, Zhao Liang. Origin of pots in Inner Mongolia and northern Hebei. *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. *地理学报*, 2001, 56(2): 223-231.]
- [4] Zeng Zhaoxuan. A preliminary study on landform in the upper reaches of the Hanjiang River. *Journal of South China Normal University*, 1958, (3): 121-165. [曾昭璇. 韩江上游地形略论. *华南师范学院学报*, 1958, (3): 121-165.]
- [5] Zhu Zhaoyu. A preliminary investigation on landform and weathered horizon in river valley in Jiexi County, Guangdong Province. *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. *热带地理*, 2000, 20(4): 331-336.]
- [6] Hsi-Lin Tschang. An annotated bibliography of pothole forms. *Chung Chi Journal*, 1974, 12(1/2): 15-53.
- [7] Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. A discussion on the origin of moulins in South China (2). *Tropical Geography*, 2001, 21(2): 189-194. [韩同林, 劳雄, 郭克毅. 关于南国冰臼群成因的商榷之二. *热带地理*, 2001, 21(2): 189-194.]
- [8] Zhao Guolong, Zhu Hongsen, Li Boyang et al. Quaternary glacial geology and origin of glacial pothole swarm in Inner Mongolia. *Regional Geology of China*, 2001, 20(2): 200-206. [赵国龙, 朱洪森, 李泊洋 等. 论内蒙古第四纪冰川和冰臼群的成因. *中国区域地质*, 2001, 20(2): 200-206.]
- [9] Editorial Department of Tropical Geography. A talk with fluvial and glacial potholes by Shi Yafeng, Academician of Chinese Academy of Sciences. *Tropical Geography*, 2002, 22(1): 1-2. [热带地理编辑部. 中国科学院院士施雅风谈“冰臼”与“壶穴”. *热带地理*, 2002, 22(1): 1-2.]
- [10] Zhou Shangzhe. Are all potholes markers of quaternary glaciations? *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 117-125. [周尚哲. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗? *第四纪研究*, 2006, 26(1): 117-125.]

- [11] Liu Shangren, Qin Chaofeng, Peng Hua. The discussion on the condition for glacier whether developed in Guangdong. *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. *地理科学*, 2000, 20(4): 376-380.]
- [12] Alexander H S. Pothole erosion. *Journal of Geology*, 1935, 40(4): 305-337.
- [13] Springer G S, Tools T, Wohl T T. Dynamics of pothole growth as defined by field data and geometrical description. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, F04010 (DOI: 10.1029/2005JF000321).
- [14] Springer G S, Tools T, Wohl T T. Theoretical modeling of stream potholes based upon empirical observations from the Orange River, Republic of South Africa. *Geomorphology*, 2006, 82(1/2): 160-176.
- [15] Zeng Zhaoxuan, Huang Weifeng. *Physical Geography of Guangdong*. Guangzhou: Guangdong People's Press, 2001. 385. [曾昭璇, 黄伟峰. *广东自然地理*. 广州: 广东人民出版社, 2001. 385.]
- [16] Chen Guiming, Qi Hongyu, Pan Wei. *MATLAB (6.X) for Mathematical Statistics*. Beijing: Science Press, 2002. 424. [陈桂明, 戚红雨, 潘伟. *MATLAB 数理统计(6.X)*. 北京: 科学出版社, 2002. 242.]
- [17] Li Jiqi, Ma Suzhen. *Elements of Fluid Mechanics*. Beijing: Science Press, 1985. 232. [李翼祺, 马素贞. *流体力学基础*. 北京: 科学出版社, 1985. 232.]
- [18] Zhang Ke, Huang Yukun. Researches on the planation surfaces in north Guangdong. *Tropical Geography*, 1995, 15(4): 295-304. [张珂, 黄玉昆. 粤北地区夷平面的初步研究. *热带地理*, 1995, 15(4): 295-304.]
- [19] Whipple K X, Snyder N P, Dollenmayer K. Rates and processes of bedrock incision by the Upper Ukak River since the 1912 Novarupta ash flow in the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *Geology*, 2000, 28(9): 835-838.
- [20] Whipple K X, Hancock G S, Anderson R S. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 490-503.
- [21] Kale V S, Joshi V U. Evidence of formation of potholes in bedrock on human timescale: Indrayani River, Pune district, Maharashtra. *Current Science*, 2004, 86(5): 723-726.

## Formation and Development of the Potholes Formed in a Gorge River in Guangdong

WANG Wei<sup>1</sup>, HUANG Shan<sup>1</sup>, LIANG Mingzhu<sup>2</sup>

(1. *Geomorphology and Quaternary Environment Institute, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;*

2. *Tourism Institute of Jinan University, Guangzhou 510632, China)*

**Abstract:** Pothole geometries were measured in a reach of Dabu river bed at the head of a gorge that more than 200 m deeply incised into a 650-750-m high planation surface formed in the middle Miocene in northern Guangdong, China. Geometric and derivative data of the potholes obtained from the field study were interpreted using standard statistical methodologies. The statistical analysis combining with related field observations revealed the origins of river potholes and the processes of pothole formation and development. The study shown that the formation and development of a river pothole were only related to the localized conditions, such as geology, geomorphology and water fluid styles at a spot where the pothole occurred; the weaknesses, which were usually intersected fractures, typically interconnected vertical joints, or triangular pits generated by hitting of rock fragments during floods, initiated pothole development on a river bed at this site; the geometrical dimensions of the potholes were controlled by the features of the tectonic joints developed in river bed rock; the radius and the depth of potholes were strongly (log) positive correlated; the shape of a pothole and the style of stream flows forming the pothole were not always the same in the processes of pothole growth; as an important role for channel incision, a pothole could create quickly in a gorge river undergoing powerful vertical erosion, but did not have enough time to fully develop and could not be maintained for a long time as well.

**Key words:** Guangdong gorge; river pothole; morphological feature