

乐山平羌小三峡河岸壶穴地貌发育条件及作用机制初探

李红英¹, 马 煜^{1,2}

¹成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山

²乐山市灾害防治与资源环境修复工程技术研究中心, 四川 乐山

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年9月3日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

壶穴是河流动力侵蚀塑造的典型基岩微地貌, 是反演河谷水动力演化与新构造活动的直观地貌标识。岷江乐山平羌小三峡岸坡广泛出露成群发育的河床壶穴, 为亚热带丘陵峡谷型河流壶穴研究提供了典型样本。本文以平羌小三峡干流两岸壶穴为研究对象, 采用野外测量、形态观察、岩性与水文调查及区域地质资料对比等手段, 对河岸壶穴的空间分布、形态特征、成因条件与演化过程进行了系统研究。结果表明: 研究区壶穴主要分布于常年洪水位与一级阶地前缘之间的水位变幅带岸坡基岩面上; 其形成与扩大以汛期涡流机械磨蚀为主导动力, 基岩节理裂隙提供了初始侵蚀突破口。红层砂岩的非均质性、软硬互层结构及节理裂隙系统共同控制了壶穴的初始位置与扩展方向。壶穴演化经历了微凹陷形成、涡流启动、加深扩径、相邻贯通和残余岩体改造等阶段, 最终形成联合壶穴、侵蚀槽沟及象形残丘(当地俗称“石鸭子”)等复合地貌。本研究可为岷江流域红层软岩河床差异侵蚀及复合地貌演化研究提供地貌学依据。

关键词

平羌小三峡, 壶穴, 涡流磨蚀, 形成机理

Development Conditions and Formation Mechanisms of Riverbank Potholes in the Pingqiang Small Three Gorges, Leshan

Hongying Li¹, Yu Ma^{1,2}

¹The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan Sichuan

²Leshan Disaster Prevention and Resource-Environment Restoration Engineering Technology Research Center, Leshan Sichuan

Received: July 15, 2026; accepted: September 3, 2026; published: September 14, 2026

文章引用: 李红英, 马煜. 乐山平羌小三峡河岸壶穴地貌发育条件及作用机制初探[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 645-653.
DOI: 10.12677/ojns.2026.145067

Abstract

Potholes are a typical bedrock micro-landform formed by fluvial erosional processes and serve as direct geomorphic indicators for reconstructing river hydrodynamic evolution and neotectonic activity. Numerous clusters of bedrock potholes are widely exposed along the riverbanks of the Pingqiang Small Three Gorges section of the Minjiang River in Leshan, providing an excellent case study for investigating pothole development in subtropical hilly gorge rivers. This study focuses on the riverbank potholes distributed along both banks of the Pingqiang Small Three Gorges reach. Field measurements, morphological observations, lithological and hydrological investigations, together with regional geological data, were employed to systematically examine the spatial distribution, morphological characteristics, formative conditions, and evolutionary processes of the potholes. The results indicate that the potholes are mainly distributed on exposed bedrock surfaces within the fluctuating water-level zone between the perennial flood level and the front edge of the first river terrace. Their formation and enlargement are primarily driven by mechanical abrasion induced by flood-season vortices, while bedrock joints and fractures provide the initial pathways for erosion. The heterogeneous nature of the red-bed sandstone, its alternating soft and hard strata, and the joint-fracture system jointly control the initial location and subsequent expansion direction of the potholes. The evolutionary sequence of the potholes involves the formation of shallow depressions, vortex initiation, deepening and lateral enlargement, coalescence of adjacent potholes, and modification of residual rock masses, ultimately producing compound erosional landforms such as coalescent potholes, erosional grooves, and zoomorphic residual rock forms locally known as "Stone Ducks" ("Shiyazi"). This study provides a geomorphological basis for understanding differential erosion of red-bed soft-rock riverbeds and the evolution of compound fluvial landforms in the Minjiang River Basin.

Keywords

Pingqiang Small Three Gorges, Potholes, Vortex Abrasion, Formation Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

壶穴是基岩河床最典型的河流地貌之一, 由流水裹挟碎屑在基岩凹坑内长期旋转磨蚀河床基岩形成的口小、腹阔、底平凹形微地貌, 是记录区域构造运动、气候变化与河流动力演变的天然地质档案[1][2]。长期以来学术界按照壶穴的流水作用将其划分为河流成因、冰川成因、海流成因三大类型, 不同地貌背景下主控动力差异显著[2]。红层分布区砂岩抗侵蚀能力弱、层理与节理发育, 极易发育连片壶穴与河床残丘复合地貌, 相较于坚硬岩性区, 红层壶穴演化速率更快、地貌改造更显著, 是研究河流差异侵蚀机理的理想载体[2][3]。

国外学者较早开展壶穴水动力模拟研究, 明确涡流剪切应力、推移质粒径、河床坡度是控制壶穴形态的核心因子[4][5], 证实冰下融水壶穴与河谷流水壶穴动力机理一致, 仅形成环境存在差异[6]。国内研究集中于广东、贵州、浙江等地的花岗岩、碳酸盐岩壶穴[7]-[9], 相关研究发现, 壶穴形态多样, 常呈圆形或椭圆形, 多发育于高水位河床基岩面、跌水和瀑布附近, 其长短轴比、深度、口径等参数虽存在差异, 但普遍与基岩性质、节理裂隙、局部地貌及流水条件密切相关[8][10]-[14]。部分研究指出, 节理裂

隙可能是壶穴形成和发育的重要控制因素, 基岩软硬差异及河流比降、跌水条件则进一步影响其规模和形态特征[11][12]。国内研究也逐渐由早期成因辨析转向形态测量、区域调查和演化机制分析。总体而言, 国内外关于壶穴地貌的研究已取得较大进展。现有成果普遍认为, 壶穴的形成受流水旋涡、砾石磨蚀、基岩性质、节理裂隙及局部地貌条件共同控制, 不同地区虽岩性背景不同, 但均表现出基岩河床、较大比降、跌水瀑布和构造弱面协同作用的规律[15][16]。现有研究仍多集中在南方典型点位, 针对四川盆地周山地河流特别是岷江流域特色景观型壶穴地貌的研究较少, 尤其是对红层松软砂岩壶穴的探讨明显不足; 同时, 多数研究孤立分析单一壶穴地貌, 忽略了壶穴连片侵蚀后河床残丘的次生演化过程。

本文以四川盆地西南缘岷江平羌小三峡段河岸壶穴为研究对象, 在野外地貌调查和实地测量的基础上, 综合运用形态参数分析、岩性与结构特征分析、空间对比及地貌演化推演等方法, 系统研究了该河段壶穴的形态特征、空间分布、岩性结构基础、水动力条件及其演化过程。构建了壶穴群-河床残丘复合地貌的演化模式。研究旨在为岷江流域河流地貌演化研究提供新的微观地貌证据, 并进一步深化对我国西南地区红层软岩河床差异侵蚀机制及复合侵蚀地貌演化规律的认识。

2. 研究区概况

平羌小三峡位于四川省乐山市市中区与青神县交界的岷江干流河段, 距乐山城区约 15 km, 河段全长约 12 km, 属于岷江中游丘陵峡谷过渡河段(图 1)。区域河谷走向整体与岷江干流流向一致, 河道平面形态较为曲折, 局部河段弯曲度较大, 峡谷段河面宽度仅 80~150 m, 两岸山体相对高差 120~180 m。受河道弯曲、峡谷束窄及两岸基岩山体约束, 研究区不同河段的水流条件存在明显差异。在河道转弯、岸线突出及局部河床起伏较大的部位, 水流方向和流速容易发生变化, 并形成局部回流、横向环流及旋涡等复杂水动力现象。河岸及河床基岩裸露较为广泛, 为流水侵蚀微地貌的形成和保存提供了良好的地貌基础。

岷江流域岷江干流洪峰流量大, 水位暴涨暴落, 汛期河岸淹没范围可达常年水位以上 3~6 m。在洪水期, 河道过水断面受到峡谷岸坡限制, 水流流速及紊动强度明显增大。河流经过弯曲、跌坎、基岩凸起和局部凹槽等部位时, 容易形成轴向旋涡、横向环流及局部回流。与此同时, 洪水可携带砂、砾石及其他碎屑物质沿河床运动, 运动碎屑通过冲击、刮擦和旋转研磨等方式持续作用于河岸及河床基岩。较强的水流剪切作用、复杂的局部流态以及较为充足的磨蚀物质, 共同构成研究区壶穴形成和扩展的重要动力条件。

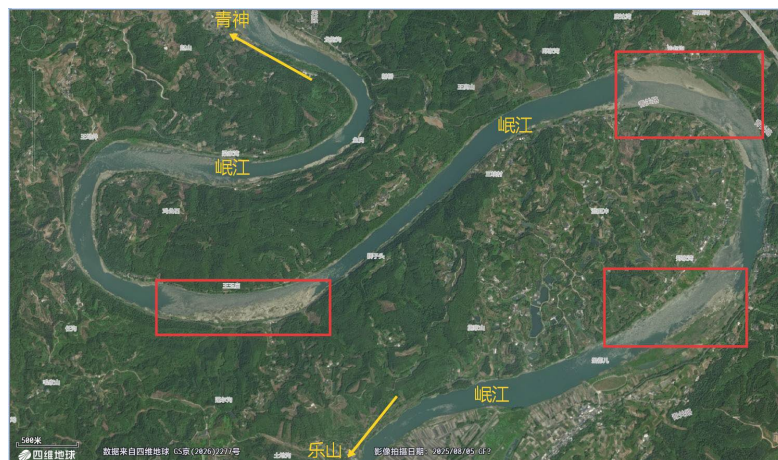


Figure 1. Location of the study area (the red-shaded area marks the zone where riverbank potholes are developed)
图 1. 研究区域(红色区域为壶穴地貌发育区)

平羌小三峡的壶穴地貌, 其地质构造根源于岷江对龙泉山脉的持续切割, 地处龙泉山断裂带南延分支影响区域, 龙泉山脉北起绵阳, 南抵乐山平羌峡, 绵延约 210 公里。正是岷江水流沿着这条山脉长期下切和侧蚀, 才塑造出今日长约 12 公里的平羌小三峡峡谷地貌, 区域地质构造以平缓褶皱与小型节理裂隙为主, 无大型活动断裂通过, 新构造运动以间歇性整体抬升为主。河岸广泛出露的红色砂岩——这些地层主要形成于侏罗纪上统遂宁组紫红色砂岩和白垩纪夹关组红色砂岩, 泥质砂岩互层为主, 河床基底以原生红色粉砂岩为主, 岩层产状平缓, 倾角 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$, 岩体内部垂直节理、水平卸荷裂隙发育, 岩石硬度中等, 抗流水侵蚀能力适中, 极易在流水作用下发育微侵蚀地貌。

3. 壶穴的空间分布和形态特征初探

经野外实地初步测量 38 处壶穴参数进行统计, 平羌小三峡河岸壶穴分布高度集中于岷江常年洪水位至一级阶地前缘之间的岸坡基岩面上, 高程集中在 365~372 m, 其中 365 m 和 372 m 处发育密度最高, 分别占总数的 22% 和 20%, 这说明该高程带受汛期洪水周期性淹没的频率最高, 水动力作用最为活跃, 是壶穴发育的最有利位置。少量壶穴受节理、裂隙或相邻坑穴干扰, 表现为不规则形、长槽形或复合形态, 相邻壶穴已开始贯通发育初见石鸭子特征。

对 38 个壶穴直径进行测量, 其形态参数统计如下: 长径 0.2~1.8 m, 平均 0.68 m; 短径 0.2~1.5 m, 平均 0.55 m; 深度 0.1~1.4 m, 平均 0.52 m, 深径比多集中在 0.2~1.1 之间。长短径比为 1.02~2.35 之间, 平均 1.24, 其中中长短径比介于 1.0~1.3 的占总数的 2/3, 表明研究区壶穴平面形态以近圆形和椭圆形为主(图 2); 深径比(深度/长轴)分布于 0.2~1.1 之间, 平均 0.49, 峰值区间为 0.4~0.6, 占总数的 52.0%, 反映研究区壶穴的垂向侵蚀与侧向扩展总体较为均衡说明研究区多数壶穴的垂向侵蚀与侧向扩展均较为显著, 但总体以中等深度、口部相对开阔的形态为主。不同壶穴在直径、深度和深径比等方面存在明显差异, 可能代表其形成条件和发育阶段有所不同。直径较小、深径比较大的壶穴可能处于以垂向磨蚀为主的早期发育阶段; 随着旋涡运动范围扩大及侧壁持续受到撞击和磨蚀, 壶穴口径逐渐增大, 平面形态趋于圆形或椭圆形。部分大型壶穴边缘已出现坍塌、缺口和侧向贯通, 反映其可能已进入侧向扩展及复合化演化阶段。



Figure 2. Plan-view morphology of representative potholes

图 2. 壶穴的平面形态图

多数壶穴内壁光滑, 可见螺旋状磨蚀痕, 部分穴底滞留有次浑圆—浑圆状石英砂岩砾石, 粒径 5~15 cm, 表面具擦痕与撞击坑, 是漩涡磨蚀的直接证据(图 2)。壶穴长轴方向与主流向(SE → NW)的夹角统计

显示优势方向为平行和垂直节理,揭示节理系统对初始凹坑定位与扩展的控制。相邻壶穴普遍出现贯通、侧蚀连通现象,壶穴相互贯通后残留的岩壁呈石墙、石柱状,进一步经风化剥落和流水修饰,形成一头圆钝、一头略尖或带有“脖颈”凹槽的象形石,三五成群地“浮”于基岩面上,酷似游水的鸭子,故称石鸭子。

4. 壶穴发育的控制因素

4.1. 地形和水动力条件

平羌小三峡河段位于岷江由丘陵河谷向峡谷河段过渡的部位,河道受两岸基岩山体约束明显,局部河段具有河谷狭窄、岸坡陡峻、河道弯曲及过水断面变化显著等特征。峡谷段河面宽度较小,洪水期大量水体被压缩至相对有限的过水断面内,形成明显的束流效应,从而提高了水流流速、紊动强度及近床剪切应力。研究区河道平面形态较为曲折,凹岸、凸岸及局部卡口交替出现。主流在河道转弯过程中受离心力影响向凹岸偏移,使凹岸附近水流冲击和侧向侵蚀作用增强;在岸线突出、河床凸起、基岩陡坎及局部收缩河段,水流方向和流速发生快速变化,容易形成回流、横向环流及局部旋涡。上述复杂流态为壶穴初始凹坑内闭合涡流的形成提供了有利条件。

河岸基岩面普遍存在浅槽、微坎、节理沟及不规则起伏。这些微地形能够改变近床水流结构,使局部水流发生分离、回流或能量集中,并促使砂砾物质在凹陷部位滞留。据区域水文资料,汛期(6~9月)洪峰流量可逾 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$,平均流速超过 3 m/s ,局部卡口段可达 $5\sim 8 \text{ m/s}$,水体动能大幅聚集。

由于缺乏断面同步流速剖面 and 坑穴内部流速实测,可利用现有洪水资料计算水动力参数,根据水流雷诺数 Re ($Re = V \cdot L / \nu$) (V 取代表流速 $U = 3\sim 8 \text{ m/s}$, L 为特征长度,以壶穴口径 $L = 0.2\sim 1.8 \text{ m}$ 作为特征长度; ν 为运动黏度,取 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$),计算可得峡谷段 $Re = 6.0 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^7$ 。远高于湍流临界值 ($Re > 4000$),表明如此高能的水流环境,为涡流生成及推移质启动提供了充足的动能。同时,该河段推移质以石英质砾石与砂岩碎屑为主,粒径集中于 $5\sim 20 \text{ cm}$,棱角分明,具有较高的磨蚀效能。因此,峡谷束流、河道弯曲、岸坡高程及基岩表面微地形共同控制了水动力的局部集中,是壶穴形成和群体化分布的重要地貌与动力基础。

4.2. 岩性与构造条件

平羌小三峡峡谷出露的地层以侏罗系-白垩系红色砂岩与砾岩为主,河床基底主要为原生红色粉砂岩。该类红砂岩属典型的陆相碎屑沉积岩,其矿物组成以石英、长石为主,胶结物以伊利石、高岭石、绿泥石等黏土矿物为主,胶结类型为孔隙式泥质胶结。这种矿物与胶结组合赋予红砂岩显著的非均质性和较低的力学强度。

红砂岩的软硬互层结构是壶穴发育最基础的岩性条件。碎屑颗粒(石英、长石)与泥质胶结物之间存在显著的硬度差异,形成“硬质骨架 + 软质胶结”的微观结构。水流首先沿胶结物薄弱带进行选择性的冲刷,泥质胶结物在水力作用下被优先剥离,使碎屑颗粒失去支撑而脱落,这一过程为涡流磨蚀提供了初始的微凹陷。此外,红砂岩泥质胶结具有水敏性,使其在岷江水位周期性变化中经历强度劣化,显著降低了河床基岩的抗蚀能力,促进了壶穴的加速发育。

5. 壶穴形成与演化机制

平羌小三峡河岸壶穴并非由单一水动力因素或单一岩性条件独立形成,而是峡谷地形、洪水动力、磨蚀介质、基岩岩性及岩体结构长期耦合作用的结果。地形条件控制水流能量的空间分配,岩性及结构面决定基岩抗侵蚀能力的差异,洪水和砂砾运动则构成壶穴形成与扩展的直接动力。各因素在不同发育

阶段的作用强度存在差异, 并通过正反馈机制推动壶穴由初始微凹陷逐渐演化为成熟壶穴、联合壶穴及残丘状复合地貌。

5.1. 岩 - 水耦合相应

研究区基岩岩性条件对水动力作用具有明显的选择性响应。软硬岩层、泥质胶结物及节理裂隙分别通过差异侵蚀、水敏弱化和定向破坏等方式, 控制壶穴的初始形成及后期扩展(表 1)。岩性和结构条件决定了水流侵蚀优先发生的位置与方向, 而水动力作用则不断强化基岩内部原有的不均一性。当局部侵蚀形成微凹陷后, 水流紊乱和砂砾滞留能力随之增强, 从而使原本微弱的岩性差异逐渐转化为显著的地貌差异。

Table 1. Relationships among lithological and structural factors, hydrodynamic response processes, and geomorphic effects
表 1. 岩性 - 结构要素、水动力响应过程及其地貌效应

岩性/结构要素	水动力响应过程	对应的地貌效应
砂岩、粉砂岩及泥质砂岩软硬互层	洪水对软弱层及泥质夹层进行选择性冲刷, 不同岩层抗冲刷和抗磨蚀能力的差异导致基岩表面不均匀退缩	形成基岩微凹陷、浅槽和陡坎, 为局部涡流形成及壶穴初始发育提供空间
泥质胶结物及其水敏性	基岩在洪水淹没和枯水出露过程中反复经历吸水软化、失水收缩及干湿循环, 水流冲击与砂砾磨蚀促使松动颗粒剥离	降低岩体表层强度和抗磨蚀能力, 加快壶穴底部下切及侧壁扩展
节理、层面及卸荷裂隙	水流沿结构面集中入渗和冲刷, 水压力及砂砾撞击促使裂隙扩展、岩块松动和剥落	控制壶穴初始位置、长轴方向和扩展边界, 促进相邻壶穴定向贯通
基岩表面微起伏及原生凹坑	近床水流在凹坑处发生分离和回旋, 砂砾进入凹坑后被旋涡捕获	形成相对稳定的旋磨空间, 启动壶穴发育的正反馈过程
壶穴间残余岩壁	相邻壶穴持续侧向扩展, 洪水沿薄弱岩壁两侧冲刷并沿裂隙实施水力破坏	岩壁逐渐变薄、破裂和贯通, 形成联合壶穴、侵蚀槽沟及孤立残石

5.2. 壶穴的启动机制

壶穴发育初期, 岩层中的节理交汇部位、层间软弱带、泥质夹层、胶结较弱区域及基岩表面原生凹坑, 通常首先受到水流冲刷和风化破坏。受基岩非均质性影响, 软弱部位的泥质胶结物和细粒物质被优先剥离, 形成尺度较小、形态不规则的微凹陷。

微凹陷形成后, 原有平顺的近床水流边界受到扰动。水流经过凹坑时可发生分离, 并在坑内形成回流或局部旋涡。同时, 洪水携带的砂粒、细砾和较大砾石容易在凹坑内短暂停留或被旋涡捕获。磨蚀介质在旋转水流驱动下与坑底、坑壁持续发生碰撞、摩擦和刮削, 使凹坑进一步加深和扩大。这一阶段可概括为以下正反馈过程:

基岩软弱部位优先侵蚀形成微凹陷→微凹陷扰动近床水流并诱发局部旋涡→旋涡捕获并驱动砂砾运动→砂砾撞击和研磨加剧基岩破坏→凹坑扩大并增强旋涡稳定性。

在该正反馈过程中, 初始凹坑既是水流结构变化的结果, 也是后续旋涡磨蚀得以持续发生的边界条件。随着坑穴尺度增加, 其对砂砾的捕获和保存能力增强, 壶穴由水流冲刷形成的普通凹坑逐渐转变为以旋涡和磨蚀为主导的侵蚀系统。

5.3. 壶穴的加深与扩径机制

壶穴形成后, 其垂向加深和侧向扩展通常同步进行, 但两者受到的主导作用存在一定差异。坑底主要承受下降水流、高惯性砾石撞击及颗粒旋转研磨, 因而垂向侵蚀较为集中。较大砾石在坑底滚动、跳

跃或绕坑轴旋转时，可产生较强的点状撞击和碾磨作用，促使坑底岩石发生破碎、颗粒脱落和逐步下切。壶穴侧壁则主要受到旋转水流剪切、粗砂和细砾刮擦以及砾石侧向碰撞作用。随着旋涡范围扩大，磨蚀介质沿坑壁运动的轨迹逐渐稳定，使壶穴口径不断增加，内壁趋于光滑。若坑壁存在节理、裂隙或软弱夹层，水流和砂砾会沿这些部位优先作用，导致局部侧壁后退速度加快，进而形成椭圆形或不规则形态。

当多个壶穴在相邻位置发育时，各壶穴的侧壁持续向外扩展，壶穴之间的残余岩壁逐渐变薄。洪水水流可沿残余岩壁两侧及其内部节理裂隙进行冲刷、渗透和水力劈裂，砂砾撞击及干湿循环则进一步削弱岩壁强度。当残余岩壁的承载能力降低至一定程度后，岩块发生剥落或坍塌，相邻壶穴由独立状态转变为局部连通或完全贯通。未被完全侵蚀的基岩则残留为低矮岩墙、岩脊、石柱或孤立残丘。此后，残余岩体继续受到洪水冲刷、旋涡磨蚀、砾石撞击及表层风化作用，其尖锐棱角逐渐磨圆，薄弱部位持续收缩，最终形成具有圆钝端、尖窄端或颈状凹槽的象形残石。因此，“石鸭子”地貌可视为壶穴群发育至后期，由壶穴侧向扩展和相互贯通造成基岩分割，并经后期流水修饰和风化改造形成的次生残余地貌。

5.4. 阶段性演化模式

根据研究区壶穴的形态、空间组合及贯通现象，可将其形成和演化过程初步划分为以下阶段，具体见表 2。

Table 2. Schematic illustration of pothole formation and evolution
表 2. 壶穴的形成和演化过程示意图

阶段	主要演化特征	演化示意图			
基岩弱化与微凹陷形成阶段	红层砂岩中的泥质胶结物、软弱夹层及节理裂隙在流水冲刷、干湿循环和风化作用下优先破坏，基岩表面形成微小凹坑。				
旋涡启动与单体壶穴形成阶段	微凹坑扰动近床水流并捕获砂砾，旋转水流驱动碎屑持续磨蚀坑底和坑壁，凹坑逐渐加深和规则化，形成独立壶穴				
单体壶穴加深、扩径与定向发育阶段	壶穴内部涡流趋于稳定，砾石撞击与砂粒研磨共同促进坑穴扩大；节理和层面控制壶穴侧壁后退方向，使部分壶穴形成椭圆形或不规则形态				
壶穴侧向扩展与相邻贯通阶段	相邻壶穴的边壁持续变薄，并在流水冲刷、水力劈裂、砂砾磨蚀和风化剥落作用下发生破坏，形成联合壶穴和复合侵蚀槽沟。				

6. 结论和不足

6.1. 主要结论

本文以岷江平羌小三峡段河岸壶穴为研究对象, 通过野外调查与地貌演化分析, 系统探讨了红层软岩区壶穴群的形成条件与演化机制, 得出以下主要结论:

(1) 平羌小三峡河岸壶穴集中分布于常年洪水位与一级阶地前缘之间的水位变幅带, 其空间分布受峡谷束流地形、局部复杂水动力条件及基岩微地形的共同控制。壶穴形态以圆形、椭圆形为主, 深径比多介于 0.2~1.1 之间, 反映了该区域垂向侵蚀与侧向扩展并重的发育特征。

(2) 红层砂岩的非均质性是壶穴发育的物质基础。泥质胶结物的水敏性弱化、软硬互层的差异侵蚀以及节理裂隙的定向导水作用, 共同决定了壶穴的初始定位与扩展方向。峡谷束流效应与汛期高能水流则为涡流生成及推移质磨蚀提供了充足的动力条件。

(3) 壶穴的形成与演化是一个“岩-水耦合”的正反馈过程, 可划分为微凹陷形成、涡流启动、加深扩径、相邻贯通及残余岩体改造五个阶段。壶穴群的侧向扩展与相互贯通导致基岩分割, 最终在流水修饰与风化作用下形成了“石鸭子”等象形残丘复合地貌。

(4) 本研究揭示了亚热带红层软岩区河流差异侵蚀的特殊机制, 丰富了我国西南山区河流地貌演化的微观证据, 对理解红层地区水动力-岩性耦合作用下的复合地貌演化规律具有重要的科学意义。

6.2. 不足和展望

本研究目前仍以野外形态测量和定性-半定量机制分析为主, 属于第一阶段初次调查成果。下一阶段应优先逐个补齐壶穴的长轴、短轴、深度、高程、方位、形态阶段及所在微地形位置等原始数据库, 并同步测量节理走向、间距与延伸长度。通过圆形统计、相关分析以及多元回归/广义线性模型, 可将“节理控制”“水位带控制”等认识从现象描述推进到统计检验阶段。技术上可采用无人机倾斜摄影与摄影测量获取厘米-分米级正射影像、点云和数字表面模型, 并对典型壶穴开展地面近景摄影或手持激光扫描, 以提取口缘面积、体积、深度、壁面曲率、长轴方位和相邻坑穴间距等三维指标。已有河流地貌研究表明, UAV-SfM 适用于复杂基岩峡谷的高分辨率地形建模和重复变化检测。研究区可在汛前-汛后开展重复航测, 通过 DEM of Difference 识别毫米-厘米级以上的侵蚀热点; 对于水下或湿润表面, 则需采用折射校正、地面控制点和独立检查点控制误差。

基金项目

2026 年度四川省大学生创新创业训练计划项目“乐山平羌三峡石鸭子滩壶穴地貌特征调查及形成机理研究”(S202613668006), 2026 年度乐山市哲学社会科学规划课题“从壶穴到‘石鸭’: 乐山特色地貌形成过程的科学解读与科普表达”(SKL2026C07), 乐山市灾害防治与资源环境修复工程技术研究中心(C322026007)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘晓娇, 徐娟, 张斌, 等. 川中丘陵区河成壶穴的形态对比及成因[J]. 山地学报, 2013, 31(6): 723-730.
- [3] 杨农, 张岳桥, 孟辉, 等. 川西高原岷江上游河流阶地初步研究[J]. 地质力学学报, 2003(4): 363-370.
- [4] Springer, G.S., Tooth, S. and Wohl, E.E. (2006) Theoretical Modeling of Stream Potholes Based Upon Empirical Observations from the Orange River, Republic of South Africa. *Geomorphology*, **82**, 160-176. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.023>

-
- [5] Pelletier, J.D., Sweeney, K.E., Roering, J.J. and Finnegan, N.J. (2015) Controls on the Geometry of Potholes in Bedrock Channels. *Geophysical Research Letters*, **42**, 797-803. <https://doi.org/10.1002/2014gl062900>
- [6] Piotrowski, J.A., Brennand, T.A., Clark, C.D. and Wysota, W. (2025) Subglacial Processes, Deposits and Landforms—introduction. *Boreas*, **54**, 484-487. <https://doi.org/10.1111/bor.70037>
- [7] 高丽晓月, 刘芯宇, 董若澜, 等. 重庆北碚白鱼石壶穴地貌特征和价值探究[J]. 地理教育, 2023(4): 2+81.
- [8] 王为, 梁明珠, 黄山. 广东大峡谷河床壶穴形态的形成与发育(英文) [J]. 地理学报(英文版), 2009, 19(1): 118-128.
- [9] 曹明达, 周忠发, 张结, 等. 贵州绥阳阴河洞洞穴壶穴的演化过程[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1967-1978.
- [10] 周忠发, 丁圣君, 张结, 等. 贵州绥阳麻黄洞壶穴形态特征及其成因分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(5): 1-8+57.
- [11] 何雨栗, 范存辉, 杨西燕, 等. 川北旺苍苍王峡龙潭子河壶穴形态及成因初探[J]. 地质论评, 2023, 69(1): 217-228.
- [12] 黄日辉, 唐道斌, 李千, 等. 广东雷州半岛火山凝灰岩河流壶穴的形成机制[J]. 第四纪研究, 2022, 42(2): 541-551.
- [13] 唐笛, 马至敏, 廖紫伊, 等. 雅安市雨城区壶穴形态特征[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(1): 55-60.
- [14] 嵇少丞, 黎乐. 再论北京西山山地壶穴的形态特征与成因机制[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 715-727.
- [15] 嵇少丞. 雕岩谷 流水塑造的微观峡谷地貌[J]. 中国国家地理, 2018(7): 92-105.
- [16] Wohl, E.E. and Merritt, D.M. (2001) Bedrock channel morphology. *Geological Society of America Bulletin*, **113**, 1205-1212. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<1205:bcm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1205:bcm>2.0.co;2)