

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.06.012

阶梯-深潭结构对沟道稳定性的作用机制

黄科翰^{1,2}, 徐梦珍^{1,2}, 张晨笛^{1,2}, 王兆印^{1,2}

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 阶梯-深潭结构是山区河流中典型的高效消能结构, 以消耗水能、增加阻力的方式提升沟道稳定性。通过水槽试验模拟沟道冲刷, 探究阶梯-深潭结构稳定沟道的机制及效果, 为山区河流消能减灾和稳定河床提供科学和技术参考。结果表明: 阶梯-深潭结构能有效消耗水流能量、抑制泥沙输移和提升水流阻力, 从而有效控制河床下切和边坡破坏; 在阶梯-深潭结构的作用下, 沟道的 Darcy-Weisbach 系数约增加为无结构条件下的 4 倍, 时均输沙率降低 20%~66%, 但随着流量的增大, 阶梯-深潭稳定沟道的效果降低; 阶梯高度与长度比(0.1)相同时, 结构提升沟道稳定性的效果接近。阶梯-深潭结构自身的稳定是其稳定沟道的关键条件, 实际应用过程中需防止结构发生逐级破坏。

关键词: 阶梯-深潭; 河床下切; 泥沙输移; 水流阻力; 水槽试验

中图分类号: TV143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)06-0978-11

阶梯-深潭结构是比降大于 3% 的山区河流中广泛发育的微地貌形态, 为典型的高效消能结构^[1-2], 是山区河流自我调整的结果^[3]。以人工阶梯-深潭系统为代表的模仿自然的措施常用于河流修复中, 能够起到防治山地灾害、有效提升和保持河流生态功能及廊道连通性的作用^[4-5]。与传统的岩土工程相比, 阶梯-深潭系统就地取材、因地制宜、施工难度低, 在交通不便的山区小流域广泛适用。研究阶梯-深潭结构在山区河流中稳定沟道的机制, 对山区河流消能减灾和稳定河床具有重要意义。

阶梯-深潭结构的阶梯由卵石或巨石组成, 深潭中颗粒较细^[6], 阶梯和深潭在河段中交替排列, 纵断面呈现连续的台阶状^[7]。阶梯-深潭结构的关键几何参数包括阶梯高度和阶梯长度^[8-9], 阶梯高度主要与阶梯石块粒径有关, 阶梯长度则取决于河段坡降、阶梯高差和冲刷深度^[10]。Abrahams 等^[11]提出了以阶梯-深潭结构地貌特征式为代表的最大阻力假说, 认为满足此条件的阶梯-深潭结构水流阻力达到最大、稳定性较高; Zhang 等^[1]通过水槽试验探究了阶梯-深潭结构消耗水流能量的规律并较好地给出了消能率计算公式。阶梯-深潭系统在小江流域的吊嘎河、绵远河流域的文家沟和西汉水流域的拦山沟得到成功应用, 对中小规模的泥石流起到了良好的消能减灾功效, 将当地触发泥石流的降水量阈值提高了 3 倍^[12-15], 提升了水生栖息地稳定性和多样性, 显著改善了河流生态^[16]。但是, 阶梯-深潭结构的消能率在大洪水条件下会降低^[1], 甚至在大量泥沙补给导致深潭淤积情况下发生破坏, 从而失去消能减灾功效^[12]。目前, 国内外对阶梯-深潭结构的研究多集中在结构的形态特征、消能率以及稳定性方面, 并探讨沟道上游泥沙补给对结构稳定性的影响^[17-18], 然而在由河床下切诱发松散边坡侧向泥沙补给的情形下^[19], 阶梯-深潭结构稳定沟道的效果和机制尚不清楚^[10]。

本研究分别对无阶梯-深潭结构和有阶梯-深潭结构的沟道开展恒定流冲刷试验, 分析阶梯-深潭结构对沟道地形、泥沙输移以及水流的调控作用, 揭示不同等级洪水流量下阶梯-深潭结构稳定沟道的效果, 探究阶梯-深潭结构控制下切和消能减灾的机理, 以期对阶梯-深潭结构在防灾减灾中的应用提供科学基础。

收稿日期: 2022-02-22; **网络出版日期:** 2022-10-01

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220927.1208.002.html>

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项资助项目(XDA23090401); 国家自然科学基金资助项目(41790434)

作者简介: 黄科翰(1995—), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事山区河流动力学方面研究。

E-mail: hkh19@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 徐梦珍, E-mail: mzxu@mail.tsinghua.edu.cn

1 试验方案及数据处理

1.1 试验系统

试验在清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开展, 水槽系统如图 1 所示。水槽宽 2 m, 全长 12 m, 试验段长 8 m, 上游段 4 m 为蓄水池和操作间。蓄水池用于稳定水流, 沉沙池位于水槽出口下游, 与地下水库连接。流量通过变频器精确控制, 最大流量为 25 m³/h, 在蓄水池外侧安装浮管流量计(精度为 0.1 m³/h)监测流量。三维激光扫描仪(RIEGL VZ-1 000, 扫描精度为 5 mm, 垂直、水平扫描范围分别为 100°和 360°)固定在水槽入口上方, 底部距试验段入口处床面高 1.0 m, 以扫描整个河段。每次试验结束后, 移动扫描仪到沉沙池扫描水槽下游出口处的泥沙堆积体(图 1(a))。两台单反相机(Canon 80D, 分辨率 1 920 × 1 080)固定在水槽上方, 距地面高度 4 m, 以 25 帧/s 的速率录制视频记录水流运动。1 号和 2 号相机拍摄水平范围分别为 4.2 m × 2.0 m 和 4.3 m × 2.0 m, 同步拍摄可覆盖整个试验段。

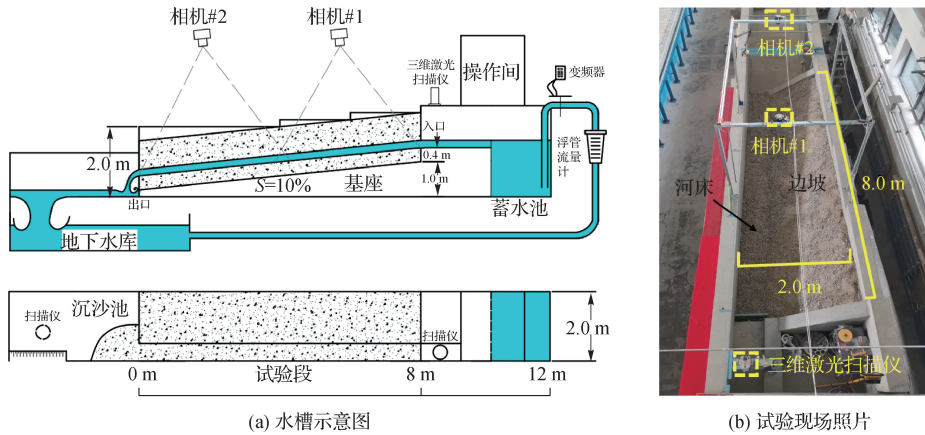


图 1 试验水槽系统

Fig. 1 Experimental flume

1.2 试验方案

试验沟道由河床和边坡两部分组成, 受水槽空间限制, 只设计了右岸单侧边坡, 左岸为不可侵蚀的边墙, 河床则按照完整宽度的河道进行设计。河床的初始宽度设置为 0.5 m, 初始厚度设置为 0.4 m, 起始河床比降(S)为 10%, 右岸边坡初始角度为 31°(图 2(a))。试验采用恒定流量, 共设置 5 个流量工况(11 m³/h、13 m³/h、15 m³/h、17 m³/h 和 19 m³/h)。定义 x 为距水槽入口距离, y 为边坡侵蚀边缘距左岸边墙距离, z 为河床平均侵蚀下切深度; 本研究选取边坡侵蚀边缘用来反映边坡破坏程度(图 2(b))。

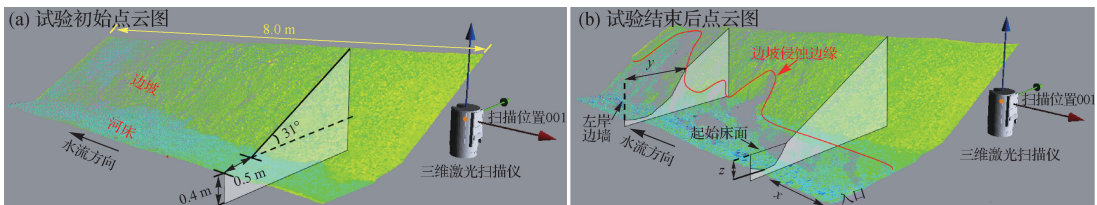


图 2 三维激光扫描地形

Fig. 2 3-D laser scanning of terrain

泥沙起动的临界 Shields 数(τ_c^*)按照 $\tau_c^* = 0.15S^{0.25}$ 公式^[20]估算, 约为 0.084, 则可根据式(1)计算 D_{50} :

$$\tau_c^* = \frac{RS_c}{S_g D_{50}} \tag{1}$$

式中： R 为水力半径，用水深代替，最大流量 $19 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下，根据阻力公式计算得到流速约为 0.5 m/s ，基于连续性测算得到水深约为 2 cm ； S_c 为能坡，用起始河床比降代替，为 10% ； S_g 为量纲一化的泥沙水下体积质量，此处取 1.65 ； D_{50} 为起动颗粒的中值粒径。

利用式(1)计算得到 $D_{50} = 14 \text{ mm}$ 。为便于筛分和配置试验沙，本试验设计 D_{50} 为 10 mm 。特征粒径 D_{90} 和 D_{10} 分别设置为 20 mm 和 0.8 mm ，特征粒径比 D_{90}/D_{50} 和 D_{50}/D_{10} 分别为 2.0 和 12.5 ，均在适合阶梯-深潭结构发育的特征粒径比值范围内^[21]。河床和边坡的试验沙组分相同，且剔除了 0.05 mm 以下的颗粒，以消除粉砂和黏粒的影响。每次铺设试验沙时，先铺设河床，然后铺设右岸边坡(图2(a))。铺好试验沙后，取8个不同位置的试验沙进行密度测定，根据统计结果，试验沙平均干密度 $\rho_d = 1\,660 \text{ kg/m}^3$ 。

河床中的阶梯模型在设计时考虑了稳定性要求，在顺水流和垂直水流方向上分别依据最大阻力假说^[11]和拥堵效应^[22-23]进行稳定性设计。本研究取 $(H/L)/S = 1$ ， H 和 L 分别为阶梯高度和阶梯长度，根据 $S = 0.1$ 计算得 $H/L = 0.1$ 。拥堵效应指河宽(W_c)与代表粒径(D_x)的比值(W_c/D_x ，即拥堵系数， D_x 为代表阶梯石块尺寸的特征粒径，本研究中使用关键石块粒径(D_k)低于某一阈值范围后，阶梯-深潭结构的稳定性越高。野外和水槽试验结果表明拥堵系数阈值为 $5 \sim 6$ ^[22-23]，本研究取 5 ，根据沟道宽度 0.5 m 计算，满足拥堵效应要求的 $D_k \geq 100 \text{ mm}$ 。

本研究设计了无结构河床(R0)和布置阶梯结构河床(R1、R2)3种试验工况。R1工况中 $L = 1.0 \text{ m}$ ，R2工况中 $L = 1.5 \text{ m}$ (表1)。除关键石块外，阶梯结构由粒径 $68 \sim 100 \text{ mm}$ 的卵石组成，阶梯石块沿沟道横断面线性排列，关键石块布置在断面中心，岸石嵌入边坡防止坡脚淘刷。阶梯石块间以粒径约为 45 mm 的卵石填充(图3， a_1 为阶梯-深潭结构上下游床面高差)。R1和R2工况确定阶梯布置形式和间距后，通过相机拍照记录各阶梯石块的顺序和位置，重新布置阶梯结构时，根据石块的涂色及记号调整相对位置，使R1和R2中阶梯结构的初始几何形态一致。

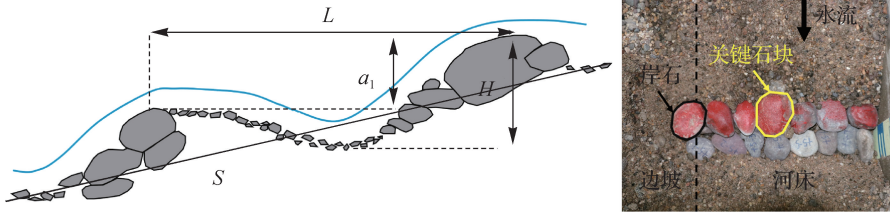


图3 水槽试验阶梯模型示意和照片

Fig.3 Schematic diagram and photo of step model in flume experiment

表1 各试验工况阶梯结构参数

Table 1 Parameters of steps in each test

试验工况	H/m	L/m	S	D_k/mm
R0	/	/	/	/
R1	0.10	1.0	0.1	
R2	0.15	1.5	0.1	100 ~ 105

试验过程中，三维激光扫描仪按固定时间间隔(1 min)对沟道进行加密扫描，获取点云数据。流速测量采用浮标法，每隔 $4 \sim 5 \text{ min}$ 进行一次，向试验段加入示踪粒子(碟型聚乙烯塑料圆片，直径 20 mm)，顶部相机录制视频记录示踪粒子运动过程。当河段向出口输送的泥沙不再增加，且沟道在 5 min 内保持稳定时，结束观测并停水。

1.3 数据处理

处理点云数据时, 先进行栅格化(网格大小为 10 cm), 再计算下切深度和边坡侵蚀距离。试验结束后测量的泥沙堆积体点云数据, 用于计算泥沙总量, 结合试验时间得到时均输沙率。根据三维激光扫描仪记录的不同物体的反射值, 区分淹没和非淹没区域, 设置反射值 -18 为阈值提取水流边缘, 得到水面宽(W), 基于连续性反算得到各流量(Q)下的平均水深(d)。

计算水流速度时, 通过目视的方式, 在视频里跟踪运动过程中顺利通过 8 m 长河段的示踪粒子(一般选取运动最前端的 2~3 个粒子), 统计示踪粒子通过河段的平均时间, 计算示踪粒子平均速度作为主流的平均速度(v)。浮标法得到的速度是水流表面流速的河段平均结果, 对于任一横断面, 可通过速度修正系数将表面流速转化为断面平均流速。山区河流垂线流速修正系数为 0.7~1.0^[24], 考虑到试验中的水深较小且水面宽度远大于平均水深, 假定断面速度修正系数为 0.7。

为量化不同流量对沟道冲刷的影响, 本研究对各试验工况的流量和时均输沙率分别进行了量纲一化处理。 q^* 为量纲一化单宽水流流量, 通过式(2)^[25]计算:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gD_{84}^3}} \quad (2)$$

式中: q 为单宽水流流量; g 为重力加速度; D_{84} 为试验沙的特征粒径, 约为 18 mm。

本试验设计的 5 个等级的水流流量按照量纲一化处理后, 对应天然阶梯-深潭河道中重现期为 30~50 a 的洪峰流量^[26], 随着水流流量从 11 m³/h 增加到 19 m³/h, 其对应的洪峰流量重现期从 30 a 增加到 50 a。

q_s^* 为量纲一化单宽输沙率, 通过式(3)^[27]计算:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{S_g g D_{50}^3}} \quad (3)$$

式中: q_s 为单宽输沙率。

为量化阶梯-深潭结构消耗水流能量的效果, 本研究分别在单元尺度计算了阶梯-深潭结构的消能率和在河段尺度计算了水流阻力。阶梯-深潭结构的消能率(η)采用式(4)^[28]计算:

$$\eta = \frac{\Delta z}{1.5h_c + H_s} \quad (4)$$

式中: Δz 为上下游水面差, 考虑到阶梯上下游的流速和河宽变化不明显, 水深相差较小, 本研究用 a_1 代替(图 3); H_s 为阶梯高度, 即阶梯顶部到深潭最深点的距离; h_c 为临界水深^[8], 可通过 Q 和 W 计算:

$$h_c = \sqrt[3]{Q^2/(W^2g)} \quad (5)$$

大部分试验工况停水后的沟道均可通过运动重构(SfM)方法得到最终地形, H_s 可直接提取。极少数没有 SfM 方法测量地形的试验工况, H_s 通过式(6)^[28]估算:

$$\frac{H_s}{h_c} = 1.24 \frac{a_1}{h_c} + 0.94 \quad (6)$$

本研究只计算了试验接近尾声时稳定的阶梯-深潭的消能率, 此时沟道地形已基本稳定, 总计有 31 个保持完整的阶梯-深潭结构。

试验段的水流阻力采用式(7)^[29]计算:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{gRS_e}} \quad (7)$$

式中: f 为 Darcy-Weisbach 系数; U 为河段平均流速; S_e 使用河床比降(S_b)代替。式(7)的左边可以代表水流阻力。在 2.3 节的水流阻力对比中, 需要用到相对淹没程度(R/D_{84})^[25,29]。由于试验过程中河床特征粒径难以测量, 本研究假设有阶梯-深潭结构的试验工况的 D_{84} 在试验过程中保持不变。结合试验开始前阶梯-深潭结构在河段中所占的比例, 估算 D_{84} 约为 25 mm。

2 结果及分析

2.1 沟道地形变化

如图 4(图中数字代表阶梯编号)所示, R0 工况在水流冲刷的作用下, 河床持续发生侵蚀下切, 边坡失稳破坏频繁发生, 尤其是下游河段。同时, 随着水流流量的增加(重现期从 30 a 增加到 50 a), 河床下切和边坡破坏加剧。R1 和 R2 工况: 一般流量条件下(重现期 30 a), 阶梯-深潭结构有效地控制了河床下切, 沟道泥沙运动明显低于 R0 工况, 上游河段尤为明显; 随着水流流量的增加, 下游河段的阶梯-深潭结构在溯源侵蚀作用下发生破坏, 而且破坏向上游阶梯传递, 侵蚀输沙增加, 直至河段达到新的能量平衡后逐渐稳定。阶梯-深潭结构破坏的河段, 河床下切和边坡失稳程度高于阶梯-深潭结构稳定的河段。最终表现为, 无结构的 R0 工况中边坡坍塌、大量泥沙进入河床淤积, 河床比降保持在 0.09 左右; 而有结构的 R1 和 R2 工况中边坡向河床补给的泥沙有限, 加之阶梯-深潭结构稳定河床的作用, 河床比降保持在 0.13 左右, 高于 R0 工况(表 2)。

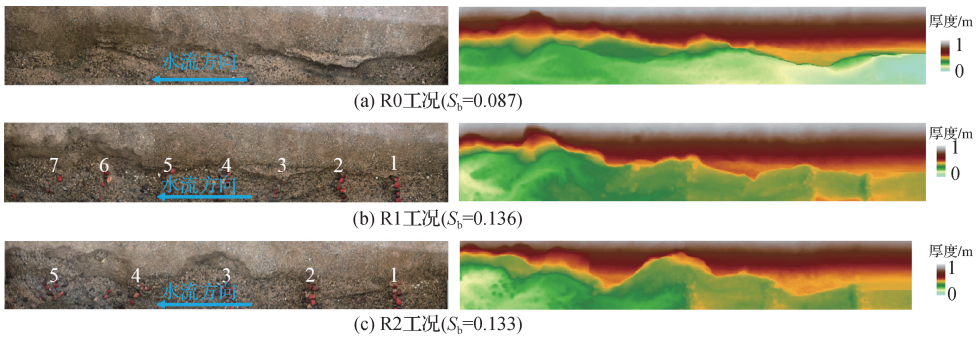


图 4 $Q = 19 \text{ m}^3/\text{h}$ (重现期为 50 a) 流量条件下试验结束后堆积体的 DOM (正射影像) 和厚度

Fig.4 DOM and thickness of the deposit after tests with $Q = 19 \text{ m}^3/\text{h}$ (50-year return period)

表 2 各试验工况结束后的河床比降

Table 2 Riverbed slope after the tests

$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	R0 工况	R1 工况	R2 工况
11	0.086	0.139	0.123
13	0.092	0.132	0.126
15	0.096	0.126	0.128
17	0.082	0.130	0.125
19	0.087	0.136	0.133

各试验工况下游河段受溯源侵蚀影响严重, 且水面宽度一般超过沟道宽度(图 5), 水流侧向侵蚀坡脚, 加剧了边坡破坏。试验的边坡破坏主要集中在下游, 且低流量时($Q = 11 \text{ m}^3/\text{h}$) R1 和 R2 工况下的边坡侵蚀距离不超过 1.0 m, 而 R0 工况下可达 2.0 m, R1 和 R2 工况下泥沙侧向补给明显低于 R0, 这主要与添加阶梯-深潭结构后阶梯断面的水面束窄、水流侧向淘刷坡脚被限制有关。 $Q = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下 R1 和 R2 工况下的边坡侵蚀主要集中在 $x = 7 \sim 8 \text{ m}$ 范围内, 显著低于 R0; 随着流量增加, R1 和 R2 工况下稳定边坡的优势逐渐降低, 边坡侵蚀距离和范围与 R0 工况下接近(图 6)。

试验过程中, 伴随河床及边坡泥沙补给的影响, 沟道地形变化过程较为复杂。在 R0 工况中, 上游河段被冲刷的泥沙淤积在下游, 导致下游的河床下切深度降低(z 约为 0.2 m)。R1 和 R2 工况中, 阶梯-深潭结构使大量泥沙被限制在阶梯的上游, 因此下游河段的下切深度($z \geq 0.2 \text{ m}$) 高于上游(图 7)。具体地, 当流量较低时, 3 个试验工况的大部分河段下切深度不超过 0.2 m, 而且 R1 和 R2 工况的下切深度一般低于 R0 工况;

尤其是阶梯保持完整的河段, 侵蚀下切深度不超过 0.1 m; 随着流量增加, R1 和 R2 工况的阶梯-深潭结构发生逐级破坏, 阶梯上下游的泥沙输移连通性增加, 河床下切加剧, 大部分下切深度接近甚至超过 0.2 m, 但总体仍低于无结构的 R0 工况。

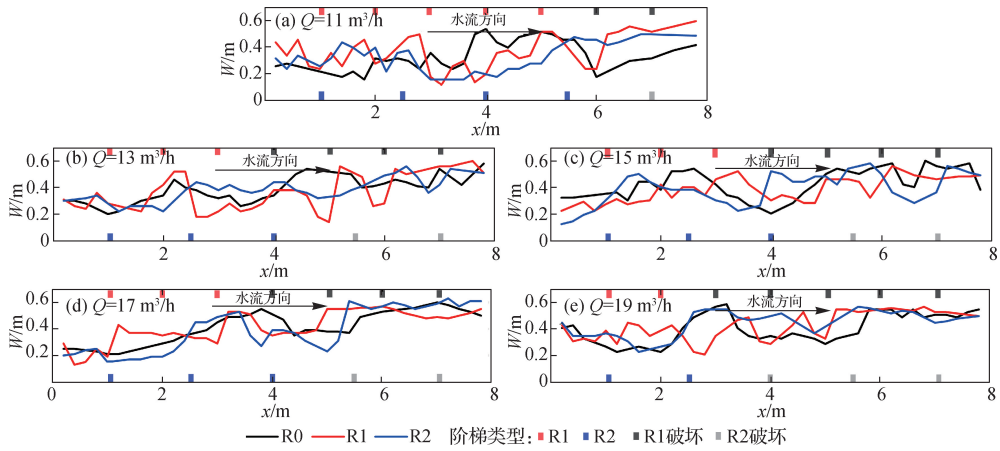


图 5 水面宽度对比

Fig. 5 Comparison of the width of water surface

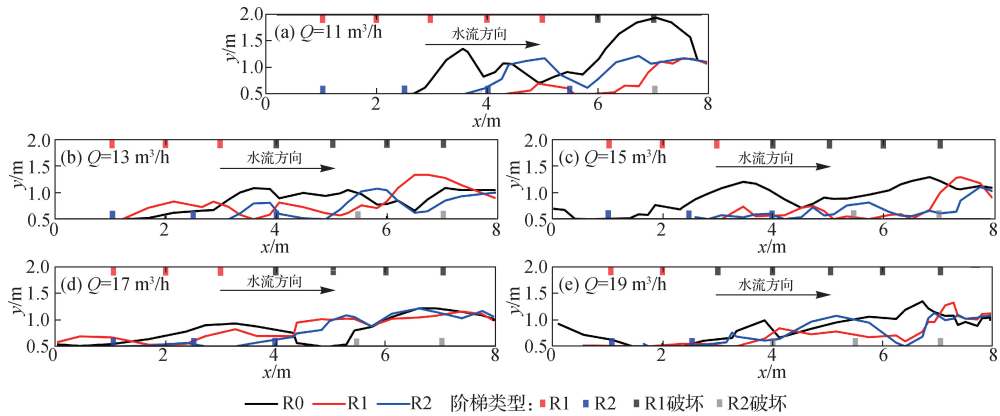


图 6 边坡侵蚀距离对比

Fig. 6 Comparison of the erosion distance

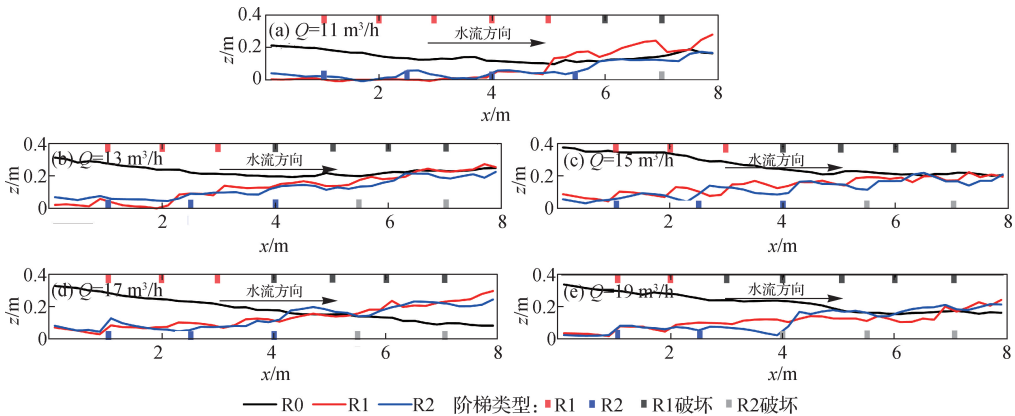


图 7 河床下切深度对比

Fig. 7 Comparison of the stream bed incision depth

如图 8 所示, 对比 3 个试验工况的 q_s^* 与 q^* 的关系可以发现, q_s^* 随 q^* 增加而变大, 且呈较强的幂函数关系 ($R^2 \geq 0.762$), 尤其是 R1 和 R2 工况 ($R^2 = 0.943$ 、 $R^2 = 0.946$), 说明随着水流流量的增加, 推移质输沙加剧。同等水流条件下, R1 和 R2 工况的时均输沙率较 R0 工况降低了 20% ~ 66%, 沟道稳定性有效提升。同时, R1 和 R2 工况的数据比较接近, q_s^* 在 0.027 ~ 0.082 范围内, 表明这 2 种阶梯-深潭结构抑制泥沙输移的功效类似, 在重现期接近 30 a 的流量下, 都能够维持较低的输沙率 ($q_s^* < 0.036$) 和较好的稳定沟道效果, 但随着流量的提升 (如达 50 年一遇), q_s^* 接近并超过 0.08, 阶梯-深潭结构对抗水流的能力显得不足, 需要更强的结构来消耗水流能量、稳定沟道。

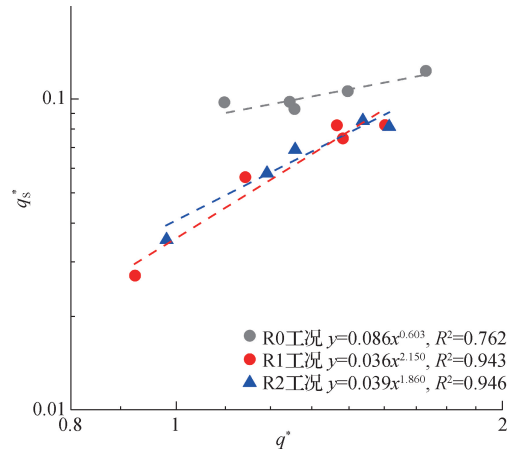


图 8 q_s^* 与 q^* 的关系

Fig. 8 Relation between q_s^* and q^*

2.2 消能率

一般随着流量增加, 阶梯淹没程度 h_c/H_s 从 0.1 增加到 0.4, 结构消能率呈现显著下降趋势^[1]。本试验中, R1 和 R2 工况中阶梯-深潭结构消能率高达 0.42 ~ 0.77, 能够充分消耗水流能量 (表 3), 且消能率在大流量条件下没有显著降低。这是因为尽管阶梯上的临界水深有所增加, 随着深潭冲刷深度增加, 大部分阶梯高度也从 0.05 m 增加到 0.12 m, 阶梯淹没程度 h_c/H_s 并没有显著增大, 基本维持在 0.25 左右。

表 3 各试验工况阶梯-深潭结构的消能率

Table 3 Energy dissipation rate of step-pool structure in each test

$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	阶梯编号	R1 工况			R2 工况		
		h_c/m	H_s/m	η	h_c/m	H_s/m	η
11	1	0.018	0.050	0.57	0.018	0.077	0.63
	2	0.017	0.055	0.66	0.016	0.080	0.77
	3	0.017	0.050	0.47	0.023	0.090	0.60
	4	0.018	0.100	0.75	0.016	0.143	0.61
	5	0.017	0.120	0.66			
13	1	0.022	0.095	0.47	0.022	0.094	0.47
	2	0.019	0.101	0.52	0.020	0.090	0.47
	3	0.020	0.085	0.46	0.020	0.094	0.50
15	1	0.031	0.108	0.42	0.024	0.096	0.47
	2	0.023	0.087	0.44	0.022	0.091	0.46
	3	0.022	0.095	0.47	0.027	0.102	0.42
17	1	0.026	0.100	0.50	0.026	0.102	0.45
	2	0.024	0.082	0.51	0.029	0.106	0.43
	3	0.022	0.090	0.52	0.023	0.107	0.48
19	1	0.025	0.110	0.61	0.026	0.093	0.67
	2	0.023	0.090	0.69	0.026	0.130	0.69

2.3 水流阻力及结构稳定性影响

在河段尺度上, R0 工况的流速较高, 在 0.5 ~ 0.7 m/s 范围内波动, 水流阻力较小、推移质运动非常剧烈; R1 和 R2 工况的阶梯-深潭结构有效地降低了流速, 一般不超过 0.45 m/s, 水流阻力明显提升。将 R1 和 R2 工况的计算结果与文献[29]提供的数据进行对比, 结果基本在阶梯-深潭结构常见的阻力范围之内 ($1.0 \leq (8/f)^{1/2} \leq 5.0$, 图 9), 也验证了 1.3 节中关于速度修正系数及 D_{84} 的假设估计的合理性。R1 和 R2 工况的相对淹没程度较低, 属于大尺度粗糙床面, 所以水流阻力数据位于拐点之前; 同时, 受测试流量范围的影响, 各工况相对淹没程度接近, 水流阻力在较小的相对淹没程度范围内变化。

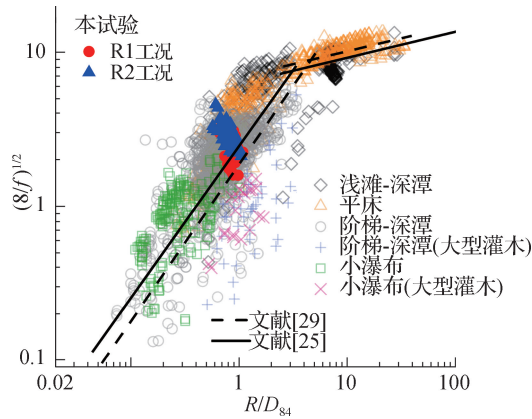


图 9 阶梯-深潭结构试验工况水流阻力对比情况

Fig. 9 Comparison of the flow resistance in tests with step-pool structures

图 10 为 3 个试验工况不同流量下的水流阻力, R0 工况的 $(8/f)^{1/2}$ 主要为 4.0 ~ 5.0, 而 R1 和 R2 工况的主要为 2.0 ~ 3.0, 约为 R0 工况的 1/2, 即沟道的 Darcy-Weisbach 系数约增加为 R0 工况的 4 倍, 表明阶梯-深潭结构能够显著提高水流阻力。在小流量条件下 ($Q = 11 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q = 13 \text{ m}^3/\text{h}$, 重现期接近 30 a), R1 比 R2 工况的水流阻力略高, $(8/f)^{1/2}$ 接近 2.0; 在较大流量条件下 ($Q = 17 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $Q = 19 \text{ m}^3/\text{h}$, 重现期接近 50 a), R1 和 R2 工况的阶梯-深潭结构都经历了局部冲刷和自我调整 (图 7(d)、图 7(e)), 深潭发育, 水流阻力接近, $(8/f)^{1/2}$ 为 2.5 ~ 3.0; 当 $Q = 11 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, R1 工况保持完整的阶梯-深潭结构较多, 且几乎没有受到冲刷 (图 7(a)), 其 $(8/f)^{1/2}$ 略小于 2.0, 水流阻力明显高于其他工况。

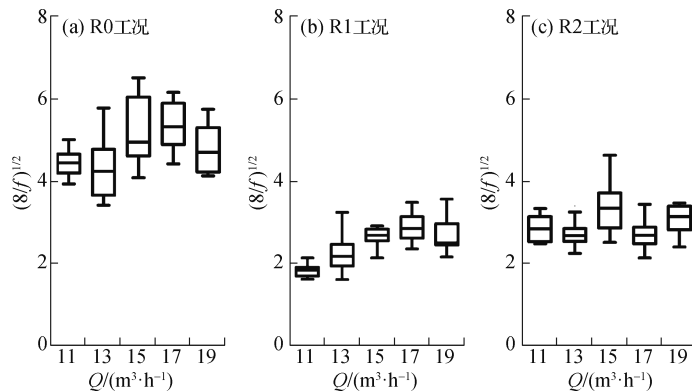


图 10 各试验工况不同流量条件下的水流阻力

Fig. 10 Flow resistance with different flow discharges in each test

为进一步探究阶梯-深潭结构自身的稳定性对水流运动和河床地形变化的影响, 根据阶梯-深潭结构是否完整将河段分为稳定段和非稳定段, 分别对比了不同流量下接近停水时的水流阻力和河床-时均下切速率

(S_d)。图 11(a) 显示 3 个试验工况的 $(8/f)^{1/2}$ 都随 q^* 增加而变大, 水流阻力逐渐减小, 且基本呈幂函数的关系。R0 工况的 $(8/f)^{1/2}$ 主要为 4.60 ~ 6.16, 水流阻力较小, 甚至低于 R1 和 R2 工况的非稳定段 ($2.31 < (8/f)^{1/2} < 4.05$), 说明阶梯-深潭结构破坏后, 依然能够起到增大水流阻力的作用。R1 和 R2 工况稳定段的水流阻力 ($(8/f)^{1/2} < 2.13$) 要明显高于非稳定段, 说明稳定的阶梯-深潭结构是增加水流阻力的关键。

图 11(b) 显示 3 个试验工况的 S_d 都随 q^* 增加而增加, 且呈较强的幂函数关系 ($R^2 \geq 0.724$)。R0 工况的下切速率最高, S_d 为 $(6.15 \sim 9.05) \times 10^{-5}$ m/s; R1 和 R2 工况非稳定段的下切速率次之, S_d 为 $(3.09 \sim 6.24) \times 10^{-5}$ m/s, 说明阶梯-深潭结构发生破坏后, 仍能在一定程度上抑制河床下切; R1 和 R2 工况稳定段下切速率最低, S_d 为 $(0.25 \sim 3.18) \times 10^{-5}$ m/s, 说明稳定的阶梯-深潭结构能够有效消能, 抑制河床下切。此外, R1 工况稳定段在小流量条件下 (重现期接近 30 a) 的下切速率要比 R2 工况稳定段的低, 而在其他流量条件下 (重现期接近 50 a) 与 R0 工况的接近, 这与图 10 中水流阻力的变化规律一致。

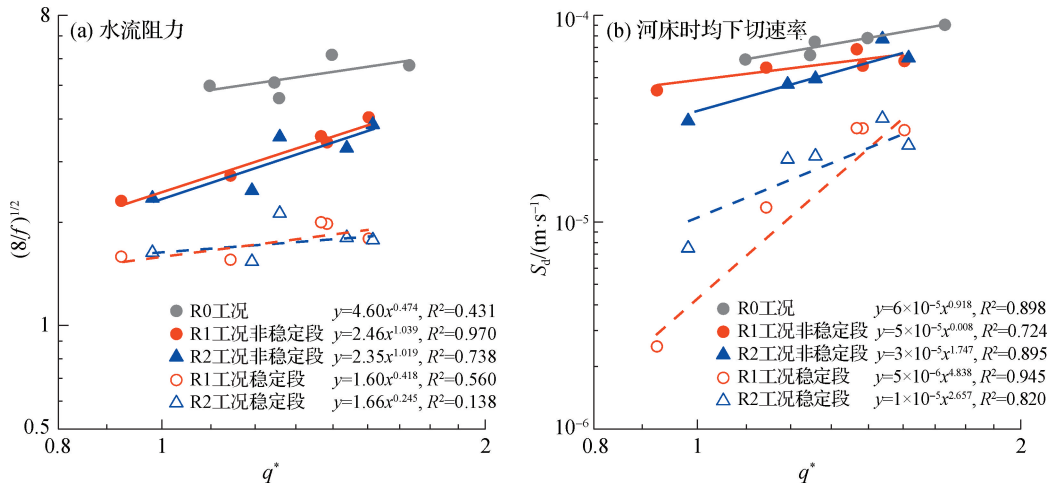


图 11 水流阻力和河床时均下切速率随 q^* 的变化

Fig. 11 Flow resistance and time-averaged stream bed incision rate vary with q^*

对比 R1 和 R2 工况的水流阻力和河床时均下切速率发现, 2 种工况的阶梯-深潭结构提升水流阻力和控制河床下切的效果接近。但 R1 工况的阶梯-深潭结构数量更多, 集群优势明显, 在小流量条件下有更高的水流阻力 ($(8/f)^{1/2} < 2.0$), 表现出更优的增加水流阻力效果。结合阶梯-深潭结构控制地形以及泥沙输移的表现, 基本认为这 2 种阶梯-深潭结构在稳定沟道方面的效果接近, 出现差异主要来源于结构稳定性和数量的影响。

3 结 论

本研究通过水槽试验模拟了大比降沟道中的冲刷过程, 探究了阶梯-深潭结构稳定沟道的效果, 并揭示了其对沟道地形、泥沙输移及水流的影响。主要结论如下:

(1) 阶梯-深潭结构能有效控制河床下切和边坡破坏, 尤其在结构保持完整的河段。在阶梯-深潭结构的作用下, 沟道的时均输沙率降低了 20% ~ 66%, 水流能量被有效消耗、水流阻力明显增加, Darcy-Weisbach 系数约增加为无结构组的 4 倍, 沟道稳定性得到明显提升。

(2) 阶梯高度与长度比相同 (H/L 均为 0.1) 的阶梯-深潭结构在控制地形变化、泥沙输移, 以及水流能量耗散等方面具有类似的效果。在重现期接近 30 a 的流量下, 本试验设计的阶梯-深潭结构稳定沟道的效果较好, 随流量的增加 (重现期接近 50 a) 需要强度更高的结构以保持良好的稳定沟道的效果。

(3) 稳定的阶梯-深潭结构是沟道稳定的关键条件。阶梯-深潭结构失稳破坏会导致水流阻力降低, 河床

下切加剧,但沟道的稳定性仍高于无结构的沟道。在实际工程应用中,需采取措施防止结构发生逐级破坏。对于需要重点治理的沟道,可适当增加结构强度,以抵御重现期超过 50 a 的洪水。

参考文献:

- [1] ZHANG C D, XU M Z, HASSAN M A, et al. Experiment on morphological and hydraulic adjustments of step-pool unit to flow increase[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(2): 280-294.
- [2] 李文哲,王兆印,李志威,等. 阶梯-深潭系统的水力特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 374-382. (LI W Z, WANG Z Y, LI Z W, et al. Study on hydraulic characteristics of step-pool system[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 374-382. (in Chinese))
- [3] 王兆印,刘成,余国安,等. 河流水沙生态综合管理[M]. 北京:科学出版社,2014. (WANG Z Y, LIU C, YU G A, et al. *Integrated management of water, sediment and ecology of rivers*[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [4] CHIN A, O'DOWD A P, MENDEZ P, et al. Toward natural approaches in restoration: experiments of co-evolving physical and biological structures in a self-organizing step-pool channel[J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(10): 1480-1493.
- [5] SMITH D P, KORTMAN S R, CAUDILLO A M, et al. Controls on large boulder mobility in an 'auto-naturalized' constructed step-pool river: San Clemente Reroute and Dam Removal Project, Carmel River, California, USA[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(9): 1990-2003.
- [6] WANG Z Y, MELCHING C S, DUAN X H, et al. Ecological and hydraulic studies of step-pool systems[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(9): 705-717.
- [7] 徐江,王兆印. 阶梯-深潭的形成及作用机理[J]. *水利学报*, 2004, 35(10): 48-55. (XU J, WANG Z Y. Formation and mechanism of step-pool system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(10): 48-55. (in Chinese))
- [8] LENZI M A. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy[J]. *Geomorphology*, 2002, 45(3/4): 243-260.
- [9] CHIN A. The morphologic structure of step-pools in mountain streams[J]. *Geomorphology*, 1999, 27(3/4): 191-204.
- [10] ZIMMERMANN A E, SALETTI M, ZHANG C D, et al. Step-pool channel features[M]//*Treatise on Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 565-586.
- [11] ABRAHAMS A D, LI G, ATKINSON J F. Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(10): 2593-2602.
- [12] 李志威,王兆印,张晨笛,等. 人工阶梯-深潭破坏案例与稳定性分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(6): 820-828. (LI Z W, WANG Z Y, ZHANG C D, et al. Artificial step-pool destruction cases and stability analysis[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 820-828. (in Chinese))
- [13] WANG Z Y, QI L J, WANG X Z. A prototype experiment of debris flow control with energy dissipation structures[J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(3): 971-989.
- [14] 王兆印,漆力健,王旭昭. 消能结构防治泥石流研究:以文家沟为例[J]. *水利学报*, 2012, 43(3): 253-263. (WANG Z Y, QI L J, WANG X Z. Debris flow control with energy dissipation structures: experiences from Wenjiagou[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(3): 253-263. (in Chinese))
- [15] 张康,王兆印,贾艳红,等. 应用人工阶梯-深潭系统治理泥石流沟的尝试[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(4): 501-505. (ZHANG K, WANG Z Y, JIA Y H, et al. Field experiment for debris flow control by using artificial step-pool system[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(4): 501-505. (in Chinese))
- [16] 余国安,王兆印,张康,等. 人工阶梯-深潭改善下切河流水生栖息地及生态的作用[J]. *水利学报*, 2008, 39(2): 162-167. (YU G A, WANG Z Y, ZHANG K, et al. Effect of artificial step-pools on improving aquatic habitats and stream ecological in incised river channel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(2): 162-167. (in Chinese))
- [17] 李文哲,李志威,王兆印. 推移质输沙对阶梯-深潭系统消能的影响[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 338-345. (LI W Z, LI Z W, WANG Z Y. Effect of bed load transport on the energy dissipation of step-pool system[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 338-345. (in Chinese))
- [18] WANG J M, HASSAN M A, SALETTI M, et al. On how episodic sediment supply influences the evolution of channel morphology, bedload transport and channel stability in an experimental step-pool channel[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR029133.

- [19] HUANG K H, XU M Z, WANG Z Y. Experimental study on landslides of loose sediment slope induced by stream bed incision [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 687358.
- [20] LAMB M P, DIETRICH W E, VENDITTI J G. Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(F2): F02008.
- [21] CURRAN J C. Step-pool formation models and associated step spacing [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(11): 1611-1627.
- [22] ZIMMERMANN A, CHURCH M, HASSAN M A. Step-pool stability: testing the jammed state hypothesis [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F2): F02008.
- [23] GOLLY A, TUROWSKI J M, BADOUX A, et al. Testing models of step formation against observations of channel steps in a steep mountain stream [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(7): 1390-1406.
- [24] DETERT M, JOHNSON E D, WEITBRECHT V. Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/9/10): 2780-2807.
- [25] RICKENMANN D, RECKING A. Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07538.
- [26] TUROWSKI J M, YAGER E M, BADOUX A, et al. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(12): 1661-1673.
- [27] WANG J W, GAO C Y, LIU X L, et al. Prediction of dimensionless sediment transport capacity for loess slopes and its response to flow intensity parameters [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(1): 238-255.
- [28] 张晨笛, 林永鹏, 徐梦珍, 等. 怒江干流堰塞坝特征及稳定河床机制 [J]. *水利学报*, 2019, 50(10): 1165-1176. (ZHANG C D, LIN Y P, XU M Z, et al. Morphological characteristics and mechanism for riverbed stabilization of the barrier dams in Nujiang River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(10): 1165-1176. (in Chinese))
- [29] CHEN X Y, HASSAN M A, AN C G, et al. Rough correlations: meta-analysis of roughness measures in gravel bed rivers [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(8): e2020WR027079.

Mechanism of the step-pool structure on channel stability*

HUANG Kehan^{1,2}, XU Mengzhen^{1,2}, ZHANG Chendi^{1,2}, WANG Zhaoyin^{1,2}

(1. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The step-pool structure is a typical riverbed structure with efficient energy dissipation in mountain rivers, which promotes channel stability by consuming flow energy and increasing resistance. Channel erosion was simulated by flume experiments to explore the mechanism and effect of the step-pool structure on channel stability, to provide a scientific and technical reference for energy dissipation and disaster reduction in mountain rivers. The results show that the step-pool structure can effectively consume flow energy, inhibit sediment transportation and improve flow resistance, thus effectively controlling stream bed incision and slope failure. With the step-pool structure, the Darcy-Weisbach coefficient of the channel increases by approximately 4 times as much as that in tests without this structure, and the time-averaged sediment transportation rate is reduced by 20%—66%, however, the effect of the step-pool structure in stabilizing the channel bed decreases with increasing flow discharge. With same height/length of the steps (0.1), the structure shows a similar effect in improving channel stability. The stability of the step-pool structure is the key condition of channel stability, and it is necessary to prevent the structure from being damaged step by step in practical application.

Key words: step-pool; stream bed incision; sediment transportation; flow resistance; flume experiment

* The study is financially supported by the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23090401) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41790434).