

山区河流阶梯-深潭研究应用进展

余国安^{1,2}, 黄河清², 王兆印³, 姚治君²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 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-深潭是大坡度山区河流常见而又十分重要的河床微地貌形态, 河床常由一段陡坡和一段缓坡加上深潭相间连接而成, 在河道纵向呈现一系列阶梯状。阶梯-深潭系统能有效耗散水流能量, 控制河床侵蚀下切, 并维持良好的河流生境和生态, 因而是大坡度山区下切河流维持健康稳定的重要河床结构形态。20世纪80年代以来, 国外对阶梯-深潭发育的环境条件、阶梯和深潭结构的形态特征和形成机理, 以及河流地貌和生态效应等开展了大量研究, 研究方法主要为野外调查、室内水槽实验及数学模型等。近年阶梯-深潭系统及相近的河床结构形态已经在山区河流治理上得到应用, 并取得良好效果。本文为阶梯-深潭系统近30年研究进展和山区河流治理、修复应用情况的综合述评, 并就未来研究方向提出建议。

关键词: 山区河流; 阶梯-深潭; 研究进展; 应用

1 引言

大坡度($S > 3\% \sim 5\%$)山区河流的河床常由一段陡坡和一段缓坡加上深潭相间连接而成, 在河道纵向呈现一系列阶梯状。这种典型河床微地貌形态在国外地学界和水利学界称为 Step-pool^[1-3], 即“阶梯-深潭”, 其结构概化如图1所示。

山区河流阶梯-深潭系统能有效耗散水流能量, 控制河床下切, 保持河道稳定, 并能维持良好的河流生境和生态^[4-6], 因而对于大坡度山区河流的健康稳定有十分重要的意义。自20世纪80年代以来, 国外对阶梯-深潭这一河床地貌现象开展大量研究, 概括起来主要涉及以下4个方面: ①发育的

环境条件; ②结构形态成因类型、特征及量化参数; ③形成机理; ④河流动力学、地貌及生态作用。近年来, 阶梯-深潭逐渐应用于山区下切河流的治理和修复。相对而言, 国内开展的研究和应用很少。

2 研究进展

有关阶梯-深潭的早期研究主要通过野外调查分析山区河流阶梯-深潭系统的发育成因及形成的环境条件, 随后结合室内水槽实验分析阶梯-深潭与泥沙运动的相互作用^[3,7-8]、形成过程及其水力学特性^[9]。

2.1 自然地理及地质地貌条件

阶梯-深潭系统在广泛的环境条件下(河床坡度大于3%)都有发育, 不但存在于气候湿润地区的河流, 在干旱区的沙漠河流和受冰川过程影响的河流也有发现^[10-11]。统计分析发现^[3], 在河床坡度小于0.02时多发育浅滩-深槽结构; 河床坡度介于0.03~0.07之间时, 有可能发育小瀑布和浅滩(由粗大颗粒组成); 而河床坡度在0.04~0.20之间时(多为山区河流), 阶梯-深潭系统成为最主要的河床地貌形态。在美国加利福尼亚的 Santa Monica 山区^[5,12]、加拿大不列颠哥伦比亚的 Shatford Creek 山区^[13]、德国的巴伐利亚-阿尔卑斯山脉^[14]、意大利的 Rio

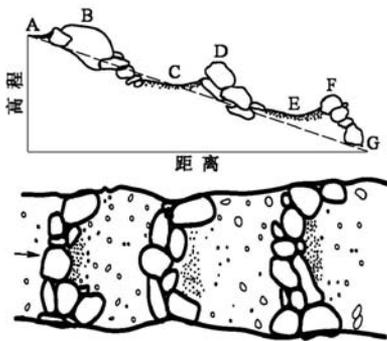


图1 典型阶梯-深潭结构示意图

Fig.1 Schematic map of typical step pools

收稿日期: 2010-03; 修订日期: 2010-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40788001, 41001008); 中国水利水电科学研究院开放基金项目(IWHRKF201002)。

作者简介: 余国安(1978-), 男, 安徽怀宁人, 博士, 主要从事河流综合管理研究。E-mail: yuga@igsnnr.ac.cn

Cordon河以及阿尔卑斯山区的Digon河^[15]等山区河流中都发育了良好的阶梯-深潭系统。中国山区河流众多,如东江上游野趣沟、长江上游小江支流深沟和黑水河、岷江支流皮条河、嘉陵江上游九寨沟、贵州清水河都有发育良好的阶梯-深潭系统。

从类型上看,阶梯-深潭通常在3种情况下形成,最为常见的一种形式是由河道中大石块(如漂石、巨石)组成的阶梯和细颗粒泥沙沉积的深潭构成^[2];第二种形式是由山区树木(圆木)和有机物残体堆积而成^[16-17],这种阶梯结构是许多森林山区河流地貌形态的主要特征;还有一种阶梯-深潭系统出现于基岩河道^[18-20],主要是由河道中岩石出露而形成。大量野外调查和室内实验发现,阶梯-深潭系统通常在以下环境条件形成:①河床底坡较大,一般为0.03~0.20^[3,21];②河床泥沙级配不连续,河床质多为卵石到漂石等大粒径级颗粒,且除非在形成阶梯的低频洪水条件下,大颗粒泥沙(大石块、漂石)在床面较为稳定^[22-23];③有高流量、重现期为20~50年或更长时间的低频洪水出现^[24];④上游来沙量少,河道输沙率低且产沙量小^[25],河床宽深小^[26]。

2.2 形态成因类型及结构特征

自然阶梯-深潭系统按其成因和规模可分成两类^[27]:一类是山区下切河流两岸发生滑坡、泥石流或其它地质作用而成,如四川九寨沟(图2a)。这种阶梯-深潭规模巨大,阶梯高度和深潭深度一般在几米到几十米,形状和分布频率不规则,达到稳定通常需要上百年甚至更长时间。另一类是更为常见的山区小河中的阶梯-深潭系统(图2b)。这种阶梯-深潭系统多在水流作用下排列簇合而成,比较规则,规模也较小,阶梯高度和深潭深度一般都在几十厘米到几米。粗大卵石和石块叠在一起形成阶梯段,水流通过阶梯段时多为激流,阶梯下游的深潭段水深流缓,细颗粒泥沙(包括粘土淤泥)在此沉积。本文讨论第二类,即典型意义上的阶梯-深潭系统。

研究者们通过测量阶梯高度,单元长度(相邻两个阶梯顶部之间的水平距离),深潭深度,河床底坡等形态参数,从统计意义上寻找阶梯-深潭系统几何形态特征之间的内在联系,提出了一系列经验公式^[5,25,28-31]。许多研究结果表明阶梯单元长度L与河床坡度成反比^[7,25],如Abramhams等提出的下面

的经验式^[4]:
$$S \leq \frac{H}{L} \leq 2S \quad (1)$$

式中: S 为河道底坡; H 为阶梯高度; L 为相邻阶梯顶之间的距离。

不过,研究者对阶梯深潭几何参数的具体测量方式不尽相同,导致众多经验公式之间缺乏可比性,因此在研究阶梯-深潭系统形态参数之间的量化关系时,统一测量方式标准很重要^[32]。另外,对阶梯-深潭系统形态、尺寸与环境因素的相关性也开展了研究。基于美国160个阶梯-深潭系列的系统调查和统计分析发现^[17],深潭形态与岩性之间无明显相关关系,但尺寸指标(如深潭长度、深度和面积)随河床岩性不同呈现系统差别。深潭处水跃引起的水头损失在不同岩性河床上无明显差别,说明阶梯-深潭代表大坡度河床上一般性的地貌形态。而对于阶梯-深潭系统的平均几何形态而言,水力因素较地形、地质、坡度要素所起作用似乎更大^[33]。

2.3 演变发育过程及形成机理

对于阶梯-深潭系统的演变发育过程和形成机理,众多学者提出了理论解释,代表性的理论模型

a. 大型阶梯-深潭系统(四川九寨沟)



b. 典型阶梯-深潭系统(广东珠江流域野趣沟)



图2 两类阶梯-深潭系统

Fig.2 Two kinds of step-pool systems

为逆行沙垄模型(Antidune Model)^[7,29,34]和颗粒聚集模型(Particle Cluster Model)^[1,13]。

逆行沙垄模型(Antidune Model)认为大坡度卵石河床阶梯结构的形成类似于沙质河床床面破坏后形成逆行沙垄的过程,水流在阶梯结构形成过程中起关键作用。实验发现,当床面逆行沙垄形成后,卵石、块石等大颗粒泥沙逐渐在逆行沙垄上游侧停留,当一定数量的大颗粒泥沙聚集后,逆行沙垄位置处就逐渐形成叠瓦式阶梯结构。逆行沙垄模型被不少学者引用解释阶梯结构的形成和阶梯结构间距^[9,24-25,35]。颗粒聚集模型(Particle Cluster Model)则认为水流和河床关键石块的位置在阶梯结构形成过程均起重要作用,其核心观点认为,阶梯结构形成和位置主要依赖于河床关键石块(Key-stone)的位置,其它颗粒逐渐依靠关键石而聚集、簇合,形成阶梯结构。阶梯-深潭形成机理理论模型还有不少,如流速反转模型(Velocity Reversal)^[36]、扩散和分选理论(Dispersion and Sorting Theory)^[37]、冲刷模型(Scouring Formation Model)^[29]、自组织模型(Self-organization)^[38]等,呈现百家争鸣的局面。由于山区河流多地处偏僻,不易到达,且因阶梯-深潭系统多形成于高强度、低频率洪水过程,水文、泥沙运动等要素不易观测,既往研究多偏重于野外调查和室内水槽实验^[4,7,24,26,39],涉及阶梯结构形成过程及其对河流地貌影响的野外原型实验和持续观测较少,这些原因使得对阶梯结构形成物理机制认识相比于流域中下游冲积河流典型地貌形态(如沙纹、沙垄)而言,仍相对滞后,这也是目前阶梯-深潭形成机理模型众多,但缺乏统一理论解释的重要原因。

2.4 生态动力学功能及作用

2.4.1 河流动力学作用

实验和野外调查证实阶梯-深潭系统能增加水流阻力,消耗水流能量,控制河床侵蚀下切。水流经过阶梯跃起,紧接着跌入其下方的深潭,大部分

水流动能被水流漩滚所消耗,避免其冲刷侵蚀河床、岸坡和输送泥沙;从深潭段到阶梯段河道形状的急剧变化是产生形状阻力的主要原因^[25]。阶梯上游壅水滞水区、阶梯堰口及深潭区的流速分布和大小因不断变化而产生显著差异(图3),水流能量得到有效耗散,尤其是阶梯下游的深潭段,水流漩滚、紊动强烈,对水流消能起到重要作用^[40-42]。水槽试验结果还表明,阶梯-深潭系统的作用不止如此,它不仅增加水流阻力,而且使之最大化^[4,7,43]。Whitaker 和 Abrahams 等创造性的实验和野外调查发现,阶梯-深潭结构使水流阻力向最大化的方向发展^[4-8]。在实验中,随着侵蚀冲刷的发展,水流阻力和河床糙率都在增加,最终当阶梯-深潭系统形成时,阻力达到了最大,此时河床也达到最佳稳定。在美国华盛顿州 Cascade 的山区河流,阶梯-深潭造成的水流阻力占全部阻力的90%,而沙粒阻力和河道沙波阻力只占10%^[44]。由于阶梯-深潭造成的阻力是水流阻力的主体,曼宁糙率 n 是阶梯-深潭发展程度的一个函数^[6]。很多研究还提出,达西-韦伯阻力系数 f 和 R_h/D_{s4} 存在负相关关系^[45-48]。

引入无量纲数 S_p 来描述阶梯-深潭系统发育程度^[49],其定义为河床形态稳定后,轮廓外沿曲线长度与河段首尾连线直线长度的比值减去常数1,如图1所示,写成式(2):

$$S_p = \frac{(\overline{AB} + \overline{BCD} + \overline{DEF} + \overline{FG})}{\overline{AG}} - 1 \quad (2)$$

实验表明,对于平整床面, S_p 接近于0;对有沙垄或有单个阶梯-深潭的床面, $S_p < 0.1$;如阶梯-深潭系统发育比较好, $S_p > 0.1$,并有可能达到或超过0.3。有关的实验结果还显示,当发育系数 $S_p > 0.02$ 时,阻力随阶梯-深潭发育程度增加而线性增大^[6,26]。

阶梯-深潭系统不仅影响水流阻力,也影响泥沙运动^[50]。漂石和乱石形成的阶梯结构足以有效地控制河道侵蚀率,即便河床坡度高达22%^[51];美

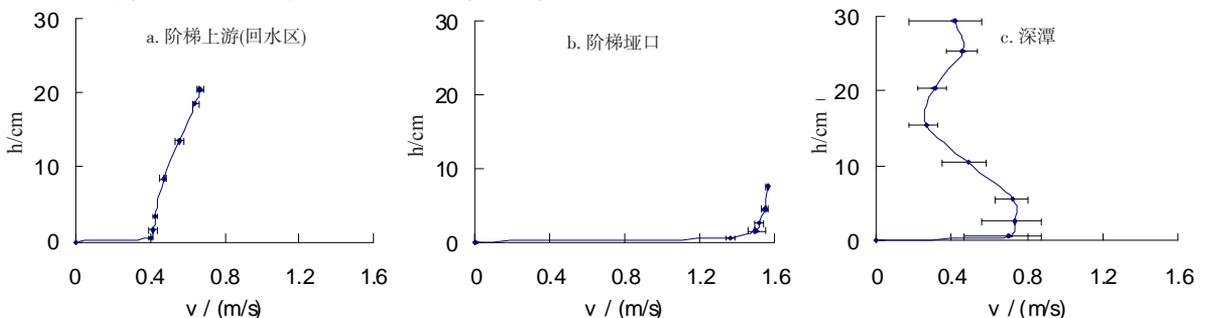


图3 云南小江支流吊嘎河阶梯-深潭河道不同断面流速分布

Fig.3 Velocity profiles measured in Diaoga River

国俄勒冈州山区河流上由圆木构成的阶梯结构所拦蓄的泥沙高达年均产沙量的123%,因此极为显著地控制了河床的侵蚀下切^[16]。在诸多水槽试验中,泥沙运动是与床面形态紧密相联系的^[8-9]。当深潭被泥沙填满时,阶梯-深潭的消能作用被削弱^[7-8],水流流速变大,侵蚀能力增强,会对阶梯结构产生一定负面影响。Lamarre和Roy基于加拿大魁北克Spruce溪(典型阶梯-深潭河道)泥沙颗粒位移过程的调查,研究了阶梯-深潭河道中泥沙输送的动态过程^[52]。

2.4.2 生态学作用

阶梯-深潭系统微地貌形态能塑造相对稳定而又多样性的水生栖息地环境,因而能改善和维持良好的河流水生生态。发育阶梯-深潭系统的河流底栖生物密度和物种数明显高于河床坡度相似但没有发育阶梯-深潭系统的河道^[53]。大卵石堆积成阶梯,细颗粒泥沙在深潭河段的缓流区沉积下来形成淤泥层,阶梯和主流河段河床由大小不同的卵石构成,河流具有适宜多种生物的栖息条件,因而生物多样性较高。云南小江支流深沟、蒋家沟、小白泥沟以及四川九寨沟和金沙江的野外调查发现,发育阶梯-深潭系统的深沟和九寨沟底栖动物密度高达552个/m²,生物量高达5.96 g/m²;而邻近没有发育阶梯-深潭系统的小白泥沟和蒋家沟底栖动物密度仅仅0.75个/m²,生物量不到0.006 g/m²^[16,27],说明阶梯-深潭系统对河流生态具有显著促进作用。

3 应用现状

阶梯-深潭已成为山区河流治理和生态修复的重要策略^[54]。野外试验发现,河床地貌变化(即便微小程度的改变)影响生物多样性和某些特定生物种群的出现^[55]。Roni等研究认为^[56],对下切河流的治理,在初期采用大石块布置阶梯结构是较为有效的策略,因为其在控制河床侵蚀下切和保持水生生态

系统的功能可以兼顾^[57]。

过去十几年里,人工阶梯-深潭及相近结构模式已在不少国家和地区应用于山区下切河流治理,以保护河床,稳定岸坡,维持良好河流水生栖息地和生态功能。美国俄列冈州Oswego湖的河流修复工程通过河道上布置圆木堰以塑造稳定的阶梯-深潭地貌形态^[58],这些圆木堰在陡峻的河床上集中约50%水头差和能量消耗,对控制河床下切,稳定岸坡起到重要作用^[23]。德国政府曾斥资40万欧元从Inn河邻近的山区河流运输石块到该河支流Mangfall河上修建人工阶梯结构,以控制河道下切。在意大利北部山区,模仿阶梯-深潭地貌特征用漂石布置挡水坝稳定大坡度河床,取得显著成效^[15,59]。在我国台湾台中地区大甲溪(Tachia River),直径达2m的大石块组成的人工阶梯结构有效控制了河床下切^[60](图4a);韩国首尔采用人工阶梯-深潭系统治理清溪川(Cheonggyecheon Creek),营造河流景观(图4b);美国蒙大拿州则通过在Kleinschmidt河上修建人工阶梯-深潭系统改善鲑鱼和三文鱼栖息地(图4c)。我国云南小江流域的深沟,以前曾泥石流灾害频发,生态环境恶劣,经过高强度的沟谷治理,河道逐渐发育阶梯-深潭系统,沟谷侵蚀下切等得到有效控制,滨河植被发育繁茂,生态环境和河流景观大为改善,已成为当地森林公园。云南小江支流吊嘎河的野外试验表明人工阶梯-深潭系统对河流微地貌过程和生境、生态有积极的影响效应^[42]。

随着人工阶梯-深潭系统在下切河流治理中逐渐得到应用,其应用策略开始受到关注^[61-62],但这方面的研究还较为初步。由于对自然阶梯-深潭形成机理、地貌特点、结构特征认识并不充分,人工阶梯-深潭系统的形态、尺寸和布置过程尚没有一个可参考、遵循的策略,导致过去近20年超过50%的人工阶梯-深潭系统并没有成功^[63]。在很多情况下,失败是由于对自然阶梯-深潭系统形成的物理机制



a. 台湾台中地区大甲溪上的阶梯结构

b. 人工阶梯-深潭治理后的韩国首尔清溪川

c. 美国Kleinschmidt河上的人工阶梯-深潭系统

图4 人工阶梯-深潭应用

Fig.4 Applications of artificial step-pool

缺乏真正理解;而对具体河流水文、来沙及地貌特点缺乏深入了解也是失败的重要原因。

4 讨论及未来研究展望

山区河流处在流域上游,其泥沙运动和河床演变对流域中下游河流地貌过程有重要影响。阶梯-深潭系统是山区河流重要的河床结构和地貌形态,对其形成机理、结构形态和作用的深入认识是实现河流综合管理的重要环节。因此,今后以下方面值得进一步探索:

(1) 加强阶梯-深潭系统的定位观测和模拟实验研究。选择典型山区河流,开展野外原型试验,加强对水文、泥沙运动和地貌过程的持续监测,进一步认识阶梯-深潭的形成过程和诱发形成阶梯-深潭系统的策略。

(2) 阶梯-深潭系统形成的临界地貌条件。临界地貌条件是指当超过某一界限时,地貌现象将出现质的变化。对于不同(微)地貌现象而言,临界地貌条件并不相同^[64]。研究阶梯-深潭系统形成的临界地貌条件以及阶梯-深潭发育对环境条件(如地质、地貌、床沙级配及坡度、水流强度、来沙过程、植被等)的倾向性,可以从总体上判断某一山区河流能否发育阶梯-深潭系统,并为促进或诱发一条大坡度山区河流发育阶梯-深潭结构提供理论支撑。

(3) 阶梯-深潭形成机理的再认识。阶梯-深潭的发育过程还缺乏一个广泛接受的统一理论解释,其形成机理需要新的认识。可以研究冲积河流主要河床演变理论,如最小作用原理(Principle of Least Action)^[65]是否可以解释山区河流微地貌形态的形成和演变?

(4) 人工阶梯-深潭系统治理山区下切河流的技术支撑及影响评价。将阶梯-深潭研究的基本理论和山区河流的修复实践结合起来,研究科学合理、可具操作性的阶梯-深潭系统应用策略,为人工阶梯-深潭系统治理山区河流提供技术支撑。对阶梯-深潭用于山区河流治理的设计、施工等工程技术规范和标准作进一步探索。开展人工阶梯-深潭系统稳定性及河流地貌、生境、生态和景观演变影响的系统监测和评价,促进山区河流综合管理。

参考文献

[1] Judd H E. A study of bed characteristics in relation to

flow in rough, high-gradient natural channels[D]. Utah State University, Logan, 1963.

- [2] Chin A. Step-pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*, 1989, 13(3): 391-408.
- [3] Grant G, Swanson F J, Wolman M G. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon. *Geological Society American Bulletin*, 1990, 102(3): 340-352.
- [4] Abrahams A D, Li G, Atkinson J F. Step-pool stream: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, 1995, 31(10): 2593-2602.
- [5] Chin A. The morphologic structure of step-pool in mountain streams. *Geomorphology*, 1999, 27(3-4): 191-204.
- [6] Wang Z Y, Melching C S, Duan X H, et al. Ecological and hydraulic studies of step-pool system. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2009, 35(9): 705-717.
- [7] Whittaker J G, Jaeggi N R. Origin of step-pool system in mountain streams. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 1982, 108(6): 758-773.
- [8] Whittaker J G. Sediment transport in step-pool streams// Thorne C R, Bathurst J C, Hey R D. *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. Chichester: John Wiley, 1987, 545-579.
- [9] Rosport M, Dittrich A. Step pool formation and stability-a flume study. *Proceedings of the 6th International Symposium on River Sedimentation*, 1995: 525-533.
- [10] Knighton D. *Fluvial Forms and Processes*. London: Arnold, 1984.
- [11] Wohl E E, Grodek T. Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev Desert, Israel. *Geomorphology*, 1994, 9(2): 117-126.
- [12] Chin A. The periodic nature of step-pool mountain streams. *American Journal of Science*, 2002, 302(2): 144-167.
- [13] Zimmermann A, Church M. Channel morphology, gradient stresses and bed profiles during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 2001, 40(3-4): 311-327.
- [14] Ergenzinger P. River bed adjustment in a step-pool system in Lainbach, upper Bavaria//Thorne C R, Bathurst J C, Hey R D. *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. New York: John Wiley, 1987: 415-430.
- [15] Lenzi M A. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy. *Geomorphology*, 2002, 45(3-4): 243-260.
- [16] Marston R A. The geomorphic significance of log steps in forest streams. *Association of American Geographers Annals*, 1982, 72(1): 99-108.
- [17] Wohl E, Madsen S, Lee M. Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology*, 1997, 20(1-2): 1-10.
- [18] Duckson D W, Duckson L J. Morphology of bedrock step pool systems. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(1): 43-51.
- [19] Grodek T, Inbar M, Schick A P. Step pool geometry and

- flow characteristics in low gradient storage channel beds// Cotroneo G V, Rumer R R. Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering, Buffalo, N Y: American Society of Civil Engineers, 1994: 819-823.
- [20] Wohl E E. Substrate influences on step-pool sequences in the Christopher Creek drainage, Arizona. *Journal of Geology*, 2000, 108(1): 121-129.
- [21] Montgomery D R, Buffington J M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109(5): 596-611.
- [22] Montgomery D R, Buffington J M, Smith R D, et al. Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, 1995, 31(4): 1097-1105.
- [23] Chin A, Wohl E. Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(3): 275-296.
- [24] Grant G E, Mizuyama T. Origin of step-pool sequences in high gradient streams: a flume experiment.//Tominaga M. Proceedings Japan-US Workshop on Snow Avalanche, Landslide, and Debris Flow Prediction and Control. Tsukuba, Japan Science and Technology Agency, 1991: 523-532.
- [25] Chartrand S M, Whiting P J. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(6): 583-600.
- [26] Wang Z Y, Xu J, Li C Z. Development of step-pool sequence and its effects in resistance and stream bed stability. *International Journal of Sediment Research*, 2004, 19(5): 161-171.
- [27] 王兆印,程东升,何易平,等.西南山区河流阶梯-深潭系列的生态学研究. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 409-416.
- [28] Chin A. The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 2003, 55(1-44): 125-137.
- [29] Comiti F, Andreoli A, Lenzi M A. Morphological effects of local scouring in step-pool streams. *Earth Surface Process and Landforms*, 2005, 30(12): 1567-1581.
- [30] Church M, Zimmermann A. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research*, 2007, 43, W03415, doi: 10.1029/2006WR005037.
- [31] Curran J C. Step-pool formation models and associated step spacing. *Earth Surface Process and Landforms*, 2007, 32(11): 1611-1627.
- [32] Nickolotsky A, Pavlowsky R T. Morphology of step-pools in a wilderness headwater stream: The importance of standardizing geomorphic measurements. *Geomorphology*, 2007, 83(3/4): 294-306.
- [33] Milzow C, Molnar P, Mcardell B W, et al. Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland) Christian. *Water Resources Research*, 2006, 42(4), W04418, doi:10.1029/2004WR003870.
- [34] Grant G E. Hydraulics and sediment transport dynamics controlling step-pool formation in high gradient streams: a flume experiment//Ergenzinger P, Schmidt K H. Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers, Berlin: Springer-Verlag, 1994: 241-50.
- [35] Chin A. On the origin of step-pool sequences in mountain streams. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(2): 231-234.
- [36] Keller E A. Areal sorting of bed-load material: the hypothesis of velocity reversal. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82(3): 753-756.
- [37] Yang C T. Formation of Riffles and Pools. *Water Resources Research*, 1971, 7(6): 1524-1562.
- [38] Chin A, Phillips J D. The self-organization of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 2007, 83(3-4): 346-358.
- [39] Ashida K, Egashira S, Ando N, et al. Generation and geometric features of step-pool bed forms (Japanese with English abstract). *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 1984, 27(B-2): 341-353.
- [40] Wohl E E, Thompson D M. Velocity fluctuations along a small step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(4): 353-367.
- [41] Wilcox A C, Wohl E E. Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel. *Geomorphology*, 2007, 83(3-4): 215-231.
- [42] Yu G A, Wang Z Y, Zhang K, et al. Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(2): 178-187.
- [43] Wilcox A, Nelson J M, Wohl E E. Flow resistance dynamics in step-pool channels: 2. Partitioning between grain, spill, and woody debris resistance. *Water Resources Research*, 2006, 42, W05419, doi:10.1029/2005WR 004278.
- [44] Curran J H, Wohl E E. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology*, 2003, 51(1-3): 141-157.
- [45] Lee A J, Ferguson R I. Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology*, 2002, 46(1/2): 59-71.
- [46] Maxwell A R, Papanicolaou A N. Step-pool morphology in high-gradient streams. *International Journal of Sediment Research*, 2001, 16(3): 380-390.
- [47] Comiti F, Mao L, Wilcox A, et al. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1/2): 48-62.
- [48] Comiti F, Cadol D, Wohl E. Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pool channels. *Water Resources Research*, 2009, 45, W04424, doi: 10.1029/2008WR007259
- [49] 徐江,王兆印.阶梯-深潭的形成及作用机理. *水利学报*, 2004, 35(10): 48-55.
- [50] Ashida K, Egashira S, Nishino T, et al. Mechanics of sediment transport in the production and destruction processes of step-pool morphology (Japanese with English ab-

- stract). Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1987, 30(B-2): 493-506.
- [51] Heede B H. Dynamics of selected mountain streams in the western United States of America. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1981, 25(1): 17-32.
- [52] Lamarre H, Roy A G. The role of morphology on the displacement of particles in a steppool river system. *Geomorphology*, 2008, 99(1-4): 270-279.
- [53] Cereghino R, Giraydel J L, Compin A. Spatial analysis of stream invertebrates distribution in the Adour-Garonne drainage basin (France), using Kohonen self organizing maps. *Ecological Modelling*, 2001, 146(1-3): 167-180.
- [54] Chin A, Anderson S, Collison A, et al. Linking theory and practice for restoration of step-pool streams. *Environmental Management*, 2009, 43(4): 645-661.
- [55] Bona F, Falasco E, Fenoglio S, et al. Response of macroinvertebrate and diatom communities to human-induced physical alteration in mountain streams. *River Research and Applications*, 2008, 24(8): 1068-1081.
- [56] Roni P, Bennett T, Morley S, et al. Rehabilitation of bedrock stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota. *River Research and Applications*, 2006, 22(9): 967-980.
- [57] Comiti F, Mao L, Lenzi M A, et al. Artificial steps to stabilize mountain rivers: A post-project ecological assessment. *River Research and Applications*, 2009b, 25(5): 639-659.
- [58] Morris S and Moses T. Channel and stream bank stabilization in a steep colluvial valley, Lake Oswego, Oregon// *Winning Solutions for Risky Problems, Proceedings of Conference 29*, Reno, Nevada, Steamboat Springs: International Erosion Control Association, 1998: 367-371.
- [59] Lenzi M A, Comiti F. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences. *Geomorphology*, 2003, 55(1-4): 97-109.
- [60] Wang Z Y, Lee J H W, and Melching C S. *Integrated River Training and Management*. Berlin and Beijing: Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2010.
- [61] Thomas D B, Abt S R, Mussetter R A, et al. A design procedure for sizing step-pool structures//*ASCE Conference Proceedings*, 2000, 104: 1-10.
- [62] Todd M, Mike L. Natural channel design of step-pool watercourses using the "key-stone" concept//*ASCE conference proceedings*, 2003, 18: 1-11.
- [63] Morris S E. Geomorphic aspects of stream-channel restoration. *Physical Geography*, 1995, 16(5): 444-459.
- [64] 钱宁, 张仁, 周志德. *河床演变学*. 北京: 科学出版社, 1987.
- [65] Huang H Q, Nanson G C. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(1): 1-16.

Research Progress and Application of Step-pool Systems in Mountain Streams

YU Guoan^{1,2}, HUANG Heqing², WANG Zhaoyin³, YAO Zhijun²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

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

Abstract: Step-pool systems are a common geomorphologic configuration in high-gradient mountain streams (> 3%-5%) with alternating steps and pools having a stair-like appearance. Step-pool systems are very effective in dissipating flow energy and stabilizing riverbeds, and is an ecologically-sound riverbed pattern in mountain streams, thus it is an important streambed structure and micro-morphologic configuration for high-gradient mountain streams. Extensive research has been carried out on step-pool system since the 1980s through field investigation, flume experiment and mathematic model analysis. The research focused on step-pool development of environmental conditions, configuration feature, formation mechanism, and its hydraulic, geomorphologic and ecologic functions. Step-pool system and similar streambed structures have been applied to mountain stream restoration and stabilization in many countries in recent years, and have shown positive results. This paper synthesizes the recent literature and application cases of step pool, and discusses the possible research directions in the future.

Key words: mountain stream; step-pool; research progress; application

本文引用格式:

余国安, 黄河清, 王兆印, 等. 山区河流阶梯-深潭研究应用进展. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 42-48.