

阶梯-深潭的形成及作用机理

徐江¹, 王兆印^{1,2}

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100044)

摘要: 阶梯-深潭系统是山区河流中常见的河床微地貌现象。本文通过水槽实验, 研究了在不同的水流流量、河床坡度、床沙级配和上游来沙率条件下, 阶梯-深潭的形成过程。在此基础上探讨了阶梯-深潭的发育和作用机理。通过定义阶梯-深潭发育程度系数SP, 结合水槽实验结果和天然阶梯-深潭河流的资料, 总结阶梯-深潭的发育条件, 得出了SP与河道坡度、床沙级配、上游来沙率之间的关系式, 并分析了阶梯-深潭系统增加水流阻力, 消减水流动能, 稳定河床的作用。

关键词: 阶梯-深潭系统; 阶梯-深潭发育程度; 水流阻力; 消能; 河床稳定性

中图分类号: TV147 **文献标识码:** A

山区陡坡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, 呈一系列阶梯状, 这就是 step-pool system, 或译为阶梯-深潭系统。陡坡上堆积着较大的卵石, 构成阶梯, 深潭里充满了细小的沙粒和一些较粗糙的砂砾。除了卵石以外, 有时河道基岩出露的地方也可以发育为阶梯, 在森林地区的河流中, 有些阶梯由树木堆积而成。阶梯-深潭河流的典型形态特征体现在床面纵剖面上起伏很大, 存在一系列折点, 沿程水流急流和缓流相间, 水面上也存在许多折点, 呈现出明显的连续阶梯状。河流通过缓慢地、持续不断的侵蚀下切, 使得河床在纵向具有弯曲特性。在河床中阶梯处, 泥沙颗粒的粒径相对粗大一些, 有较大粒径的卵石甚至巨石存在, 处在阶梯下游深潭内的泥沙颗粒比阶梯处细小, 而且粒径很小的细沙也可以存在。早在1957年, Lepold和Wolman就注意到这种河流地貌特征, 但是这个名词是在20世纪80年代才出现的。Judd于1964年称这种地貌为“steps”, 1966年Wertz称其为“Series of small waterfalls and intervening plunge pools”, 1978年Newson和Harrison称其为“Falls and Pools”, 1981年Heede称其为“Gravel bars”, 到1982年Whittaker和Jaeggi, 1985年Petts和Foster都称其为“Step-Pool system”, 其后这个名词被人们广泛接受^[1]。

阶梯-深潭系统在山区河流中是一种很常见的地貌现象。山区流域降水丰富, 河流经常流经陡峭峡谷, 泥沙组成复杂, 所以发育阶梯-深潭系统的河道坡度较大, 水流挟沙力不饱和, 河流泥沙级配不均匀。甚至于在英国, 对坡度大于1%的河流, 凡是河床泥沙颗粒较粗, 具有阶梯-深潭(step-pool)形态特征的, 都被认为属于山区河流范畴^[2]。在美国的加利福尼亚Santa Monica山区^[3,4], 纽约Adirondack山区^[5,6], 加拿大British Columbia的Shatford Creek山区^[7], 德国Bavarian Alps^[8]等山区河流中都发现了发育良好的阶梯-深潭系统。我国是多山国家, 大多数河流发源于山区, 阶梯-深潭系统分布很广, 如四川西北岷江上游段, 贵州清水河的锦屏至新市河段^[9], 云南山区河流中都可以观测到明显的阶梯-深潭系统。

天然的阶梯-深潭河岸生态系统受山区陡坡河流的水流参数和河床特性等关键因素的影响。这些因素不仅控制水生物, 同样影响两栖类和陆生类生物的栖息地。阶梯-深潭系统中水流存在强紊流, 使水体内

收稿日期: 2003-07-28

基金项目: 国家973计划资助项目(2003CB415206)

作者简介: 徐江(1979-), 男, 陕西榆林人, 硕士生, 主要研究方向为山区河流地貌。

部温度和氧气分布均匀,给许多生物提供了良好的生存条件,同时阶梯-深潭创造了不同流速、不同深浅的水生物栖息地和产卵地,不仅较大的两栖动物和水生物可以在此生存,幼小的生物也可找到躲避急流和捕食动物的地方;同时多样性的栖息地也有利于保持较高的生物多样性,防止单个物种密度偏高。故而从总体上说阶梯-深潭的生态系统具有一个全面而又健康的良好环境,对于保持天然生态环境的稳定大有裨益。一些国家已经开始利用阶梯-深潭系统对河流进行治理,在保持河床稳定的同时,使河流重现自然风貌,并使河岸生态系统得到保护。国内对阶梯-深潭系统的研究刚刚开始,还没有重要成果报道,但是随着人们对阶梯-深潭认识的逐步深入,它将是泥沙研究的新课题之一^[10]。本文在分析野外观测资料的基础上,通过水槽实验对阶梯-深潭系统的形成及作用机理进行了研究。

1 阶梯-深潭的形成过程

为了研究阶梯-深潭的发育过程,通过室内水槽实验来进行模拟。通常阶梯-深潭系列都发育在陡峭而且狭长的山区河流中,故而在模拟实验中使用的有机玻璃水槽长5m,宽8cm,高20cm。实验中水槽坡度变化范围为5%~15%,水流流量变化范围为0.1l/s~1.5l/s,河床泥沙最大粒径从3cm减小到1cm,并变化不同的上游来沙率,观测在水流和河床相互作用下阶梯-深潭的发育过程。通过实验发现,阶梯-深潭的形成过程是一个河床在水流剧烈冲刷作用下,通过自身在垂向上的不断调整,增大水流阻力,消耗水流能量,从而减小水流的冲刷,最终达到自身稳定的过程,如图2所示。

实验水槽中的阶梯-深潭的形成过程,大致可以分为三个阶段:在发育过程的第一个阶段,挟沙力很不饱和;河床泥沙在水流的剧烈冲刷下,床面上比较细小的颗粒被水流冲刷带走,较粗大的颗粒在床面上形成粗化层,增大了水流阻力。这个阶段持续了几分钟的时间。

第二个阶段,河床中发育出的粗化层并不能抵抗水流的这种连续冲刷,原来构成粗化层的大部分颗粒都被水流冲走。泥沙颗粒在床面上形成了运动的沙波,河床也开始出现起伏,水流流动有所变缓。这个阶段也持续了几分钟。

第三个阶段,在水流的连续冲刷作用下,较为粗大的卵石石块被水流剥离露出床面。这些粗大的卵石石块比较稳定,阻挡住从上游冲刷下来的较小卵石,和它们堆积在一起,形成了阶梯的雏形。同时在此阶梯上翻滚而下的急流,强烈冲刷下游河床,使其渐渐形成深潭。如此,一系列阶梯和深潭相间的河床形态就逐渐形成。阶梯处的卵石石块在水流不断冲击的作用下,相互紧锁嵌固,按肋状有序排列,形成叠瓦结构,共同构成稳定的阶梯。随着时间的推移,水流越过阶梯虽然继续淘蚀着阶梯下游河床,但是这个过程消耗了大量水流能量,水流流速变小,冲刷作用逐渐变得很小,水流中所携带的颗粒粒径较小的泥沙也慢慢沉积在深潭内,最终整个河床基本达到了稳定状态。这个阶段持续的时间很长,需要2~3h,有时会更长。

表1 各水流阻力系数在阶梯-深潭发育过程中变化

发育阶段	水力半径R/cm	断面平均流速U/(m/s)	曼宁糙率n/(s·m ^{-1/3})	断面输沙率G _s /(g/min)
	0.87	0.718	0.0186	1200
	1.25	0.500	0.0341	430
	0.96	0.651	0.0219	980
	1.28	0.488	0.0354	370
	1.53	0.408	0.0477	58
	1.66	0.377	0.0547	2.9

在水槽坡度为10%,流量0.5l/s不变的条件下,统计水槽河床发育出阶梯-深潭过程3个阶段中具体各

个水力参数和水流阻力系数以及输沙率的变化,如表1所示。因为水槽中边壁为有机玻璃,较光滑,故而不考虑边壁阻力,从而平均水深 h 即为水力半径 R 。水力半径 R 和断面平均流速 U 都是指整个水槽的平均值。并通过分析糙率系数 n 来研究水流阻力的变化。

图1为阶梯-深潭发育过程中三个不同阶段下水流阻力系数 n 和输沙率 G_b 的变化。通过计算得出的糙率系数 n 的变化趋势来看,在发育过程的第一个阶段,水流冲刷河床,河床对水流阻力也较小,随着粗化层的形成,由于颗粒较粗大,沙粒阻力较大,所以对水流阻力有一定的增大作用,水流冲刷率也有所下降;进入发育的第二个阶段,随着粗化层的破坏,水流阻力又变小,水流对河床的冲刷又加剧,床面出现沙波,河床也慢慢出现起伏,水流阻力中形状阻力部分占到大部分,从而水流阻力明显增大;在发育的第三个阶段当河床在水流的冲刷下开始生成阶梯-深潭的雏形,水流阻力进一步增大,水流对河床的冲刷逐渐减弱,直到最终河床基本保持稳定,水流阻力也达到这个过程中的最大值。

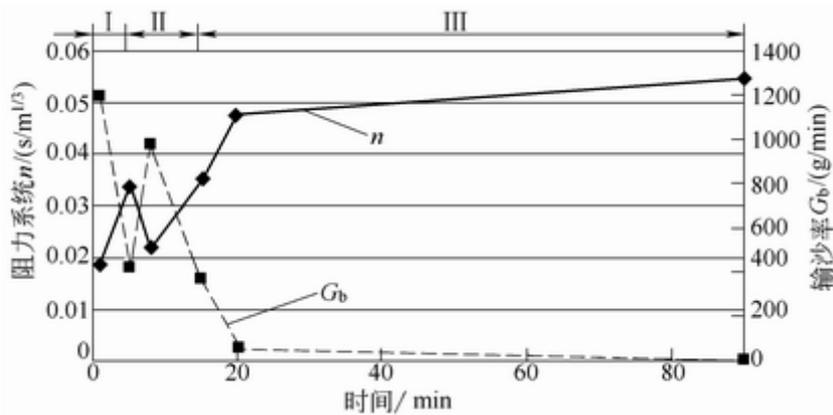


图1 糙率系数 n 和输沙率 G_b 在阶梯-深潭发育过程中随时间的变化

因为天然河流中的水流条件是非恒定的,在实验中还研究了非恒定水流条件下阶梯-深潭的形成过程。在相同的水槽坡度10%下,施加洪峰流量0.9l/s,持续5min,之后降到流量0.3l/s保持不变。刚开始施加洪峰流量的时候,因为水流流量很大,水流剧烈冲刷河床泥沙,第一和第二个阶段存在的时间很短,分别只有1~2min,之后河床中就形成了阶梯-深潭的雏形,增大了水流阻力,但输沙率仍然比较大,河床并不稳定;当流量调整至较小的流量并保持不变之后,水流对泥沙的冲刷作用也大大减小,原有的阶梯-深潭的雏形在水流的作用下,继续发育,最终形成了稳定的阶梯-深潭系列,河床达到稳定的时间都比恒定流量下要短,可见在天然情况下的非恒定水流条件下阶梯-深潭更容易形成。

2 阶梯-深潭的形成条件

为了说明阶梯-深潭发育的程度,现定义河段阶梯-深潭的发育系数 SP 为河床形态稳定后,其轮廓外沿的曲线长度与河段首尾连线的直线长度的比值,以图2所示阶梯-深潭段为例,其发育程度系数 SP 为:

$$SP = \frac{(\widehat{AB} + \widehat{BCD} + \widehat{DEF} + \widehat{FG})}{AG} \quad (1)$$

根据水槽实验的实测结果发现,当水槽河床中无阶梯-深潭段发育时, $SP=1$;当部分水槽河床中有单独的阶梯-深潭段发育时, $1 < SP < 1.1$;当水槽河床中有连续的阶梯-深潭段发育时, $SP > 1.1$ 。

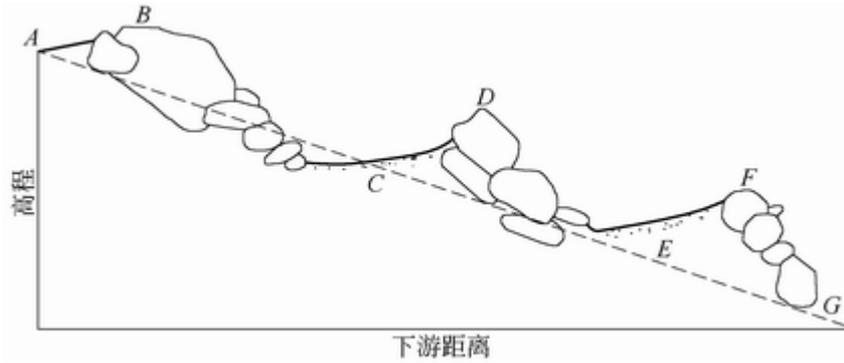


图2 阶梯-深潭发育程度系数SP的定义

通过实验还发现，阶梯-深潭系列的阶梯间距是随着坡度的增大而减小的，这一点与Hayward等人^[11-13]的天然观测结果和Rosport^[14]的水槽实验结果符合，如图3所示。从实验中看出，水槽河床中所形成的阶梯-深潭的阶梯高度随着构成阶梯的卵石颗粒最大粒径的增大而增大，而与河道坡度之间并没有明显的关系，这一点与Ellen Wohl^[13]等人对天然河流中的阶梯-深潭的观测结果一致，如图4所示。其中对于岩石碎屑构成的阶梯，最大粒径是指构成阶梯的最大岩石碎屑的大小，对于树木堆积物构成的阶梯，最大粒径是指树木的最大直径。

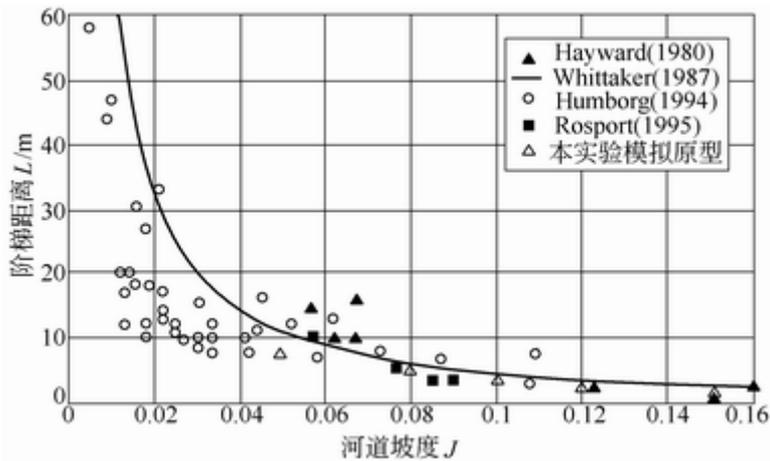


图3 阶梯间距L和河道坡度J之间的关系

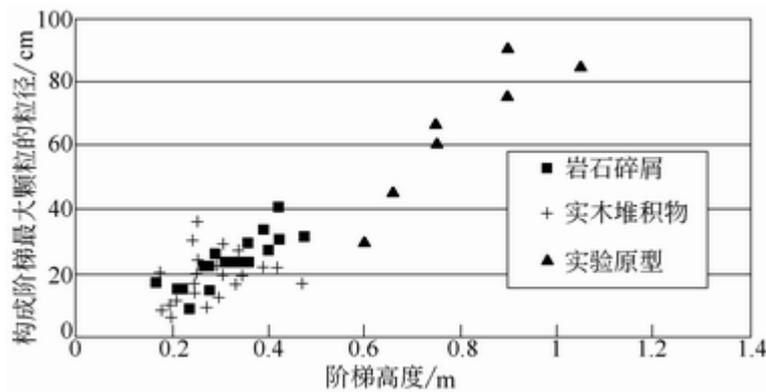


图4 阶梯-深潭中的阶梯高度与构成阶梯的粒径间的关系

从水槽实验结果中可以看出,阶梯-深潭的发育程度系数SP随着坡度的增大而增大,如图5所示。这是因为河床发育的阶梯-深潭的阶梯高度只取决于构成阶梯的最大颗粒粒径,在泥沙级配条件没有变化的情况下,它并不随坡度的变化而变化,而阶梯间距随着坡度的增大而减小,故而河床中发育的阶梯-深潭河段的单元个数随着水槽坡度的增加而增加,从而使得阶梯-深潭发育系数也随之增大。SP与J成正比的另一个原因是坡度愈大,需要消耗的水流能量愈大,为保持河床稳定,需要愈多的阶梯-深潭系列来消耗水流能量,因此SP的值愈大。

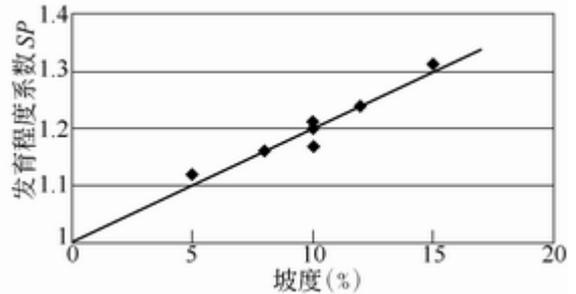


图5 阶梯-深潭发育系数SP随坡度的变化

在天然陡坡山区河流中广泛的存在着阶梯-深潭地貌,这些河流的河道坡度一般都比较,分布范围约为1%~20%,河道的宽深比较小^[15]。天然阶梯-深潭河床泥沙的成份复杂,床沙来源各不相同,如冲积河流的卵石、风化的基岩碎屑、树木堆积物和冰积物等。阶梯-深潭的发育过程就是这些大小各异、来源不同的各种河床泥沙通过水流调整,在河床中重新分布的过程。在发育阶梯-深潭的天然河流中,一般泥沙级配不均匀,粒径分布范围广,平均粒径大。泥沙粒径分布通常从小于一毫米到几百毫米,泥沙颗粒的平均粒径的量级为几十毫米。河道中一般有粒径很大的卵石,甚至巨石存在而构成阶梯,其粒径会超过河道宽度的1/10~1/5,一些河道中巨石粒径超过2m。实验中,通过对大石块在床沙中比例的控制,发现这些大石块对阶梯-深潭的形成有着很重要的作用。在本实验水槽条件下,当河床中的泥沙中没有大于1cm粒径的卵石石块时,无法形成阶梯-深潭。除了需要关键性的巨石,上游泥沙来量和输运条件对阶梯-深潭系统的发育影响也很大。阶梯-深潭是河床在受到水流冲刷的过程中形成的,也就是在水流挟沙力极为不饱和的情况下,才会有阶梯-深潭发育。当河道上游来沙量充足,是不会有阶梯-深潭发育的。实验组中,当河床上游来沙量大于水流输沙率,水流流动变缓,输沙率减小,部分泥沙堆积在河床床面上,整个河床中不能形成阶梯-深潭系统。通过对云南东川黑水河和深沟以及蒋家沟等地的考察结果也验证了这点^[16]。

通过水槽实验中观测到的现象和结果,结合天然阶梯-深潭河流的流域特征,阶梯-深潭地貌发育的河流一般有如下特征:

- (1)河道坡度大,一般在1%~20%范围内,河道宽深比较小;
- (2)河床泥沙级配不均匀,颗粒粒径跨度广,有构成阶梯的关键性大石块或巨石,或者大的树木堆积物或出露的基岩岩石;
- (3)水流挟沙力不饱和,水流对河床泥沙有过剧烈冲刷和分选作用;

与这些条件相对应,总结得出阶梯-深潭发育程度与河床坡度、床沙级配和河段上游来沙情况等条件之间的关系式,如式2所示

$$SP = 1 + aJ \left(\frac{D_{\max}}{D_{50}} - b \right)^c \left(1 - \frac{g_{bin}}{g_b} \right) \quad (2)$$

式中:SP为阶梯-深潭发育程度系数,J为河床坡度, D_{\max} 为河床泥沙颗粒的最大粒径, D_{50} 为床沙的中值粒径, g_{bin} 为河段上游单宽来沙率, g_b 为水流单宽输沙率,当上游来沙率大于水流输沙率的时候,即 $g_{bin}/g_b > 1$,阶

梯-深潭不发育，故而在这种情况下取 $(1-g_{bin}/g_b)$ 的值为零。a、b、c分别为常数，根据流域的不同而选取不同的数值。

根据水槽实验结果和云南东川区山区河流的考察资料，拟合得出 $a=4.4 \times 10^{-4}$ ， $b=4$ ， $c=4.7$ ，即阶梯-深潭发育程度系数SP的计算公式为：

$$SP = 1 + 4.4 \times 10^{-4} J \left(\frac{D_{\max}}{D_{50}} - 4 \right)^{4.7} \left(1 - \frac{g_{bin}}{g_b} \right) \quad (3)$$

3 阶梯-深潭的河流动力学和生态学作用

河床在水流的作用下，通过发育阶梯-深潭结构，增大水流阻力，消耗水流能量，从而使自身达到稳定，同时提供不同生物栖息地，保持物种多样性。

由阶梯-深潭形成过程可以发现，在阶梯-深潭的发育过程中，河床中先后形成了粗化层、沙波和阶梯-深潭，水流阻力也在阶梯-深潭形成后达到了最大。在天然的山区阶梯-深潭河流中，河床经过多年的冲刷，已经基本稳定，河床中突出的阶梯对水流造成的局部阻力占据了水流阻力的主要部分。在华盛顿Cascade山区中，大部分阶梯-深潭河段，颗粒阻力和形状阻力一起不足总水流阻力的10%，平均值仅为4%^[5]。可见阶梯-深潭河流的水流阻力主要取决于河床中阶梯-深潭的发育程度。考虑用综合阻力系数n的变化来代表水流阻力的变化，根据本水槽实验结果，可以看出水

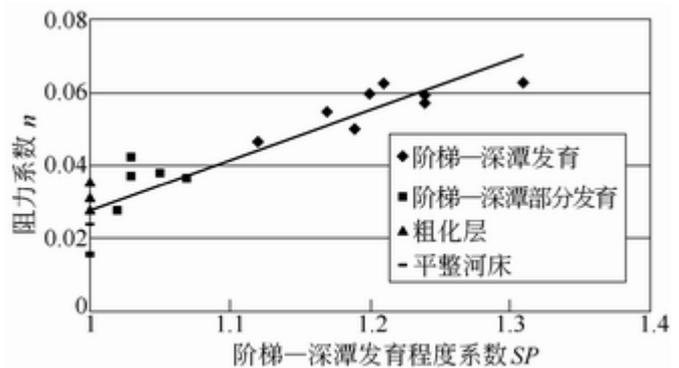


图6 阶梯-深潭的水流阻力系数n和发育系数SP间的关系

流阻力随着阶梯-深潭发育程度系数SP的增大而增大，如图6所示。阶梯对水流阻力的增大作用随着水深的增大而减小。因为在水深较小的时候，水历经阶梯挑流后注入深潭底部，在其后发生水跃，水流由阶梯上的急流过渡为深潭中的缓流。随着水深的增大，水流淹没整个阶梯，水流变为滑流，水流连续滑过阶梯，水流受到在阶梯间的回流作用而变得缓和，水跃逐渐消失。图7根据本实验结果和华盛顿Cascade山区中的天然阶梯-深潭水流资料^[5]，给出了水流阻力系数n随着水流对阶梯的淹没程度，即水力半径R和河床的粗糙高度 D_{84} 的比值变化的趋势，可以看出随着水流对阶梯淹没程度的增大，水流阻力变小。从图中还可以看出，水流阻力系数在水流淹没程度小于1的时候，随着淹没程度的增大，其值减小得很快，当水流淹没程度大于1之后，阻力系数n减小的速率明显变缓。阶梯-深潭地貌对水流的消能作用主要是通过河床变形，使得水流在急流和缓流间交替，水流从阶梯上跌落注入深潭中，并发生水跃从急流变化为深潭内的缓流，这个过程中水流紊动强烈，水流内部产生强烈的摩擦掺混作用，消耗掉了大量水流能量。在本水槽实验中可以观察到阶梯-深潭形成之后水流发育明显的水跃，特别是水流跌入阶梯后，底部急流冲入深潭缓流所激起的表面漩流，翻腾滚动，饱掺空气，表面水滚十分明显。如图8所示，根据水力学公式^[17]，可以计算水槽

内单个阶梯-深潭单元水流通过水跃所消耗掉的能量，以ABC段为例，取水跃前后的两个断面1和2：

$$\Delta H = \Delta h + \frac{Q^2}{2gB^2} \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \quad (4)$$

式中：H为总水头差，h为两连续阶梯顶部水面高度差，Q为流量，B为槽宽度，h₁和h₂分别为阶梯和深潭处的水深。

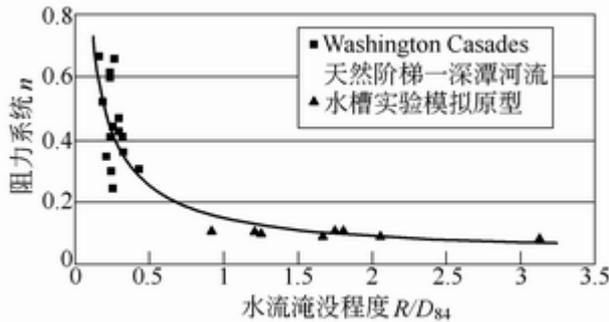


图7 阶梯-深潭水流淹没程度R/D₈₄与n的关系

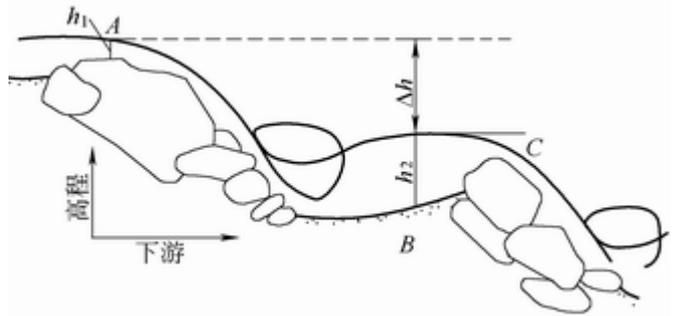


图8 阶梯-深潭水流消能计算

根据水力学中关于水跃消能率的定义^[7]，阶梯-深潭单元河段 \widehat{ABC} 的消能率k为

$$k = \frac{\Delta H}{\Delta h + \frac{Q^2}{2gB^2} \frac{1}{h_1^2}} \quad (5)$$

对于单个阶梯-深潭单元河段 \widehat{ABC} 来说，阶梯-深潭发育系数为

$$SP = \frac{\widehat{ABC}}{AC} \quad (6)$$

根据水槽实验结果，对于阶梯-深潭单元河段来说，随着河床阶梯-深潭发育程度系数SP的增大，绝大部分河段的消能率都会增大，具体如图9所示。图中还根据加拿大British Columbia的Shatford Creek流域阶梯-深潭水流资料^[7]，对其进行分析，发现4个阶梯-深潭河段中绝大部分阶梯-深潭单元河段的水流消能率也随着发育系数SP的增大而增大。从图中还可以看出，当流量增大时，消能率k会减小，这是因为流量增大后，水深增大，水流变得平缓，水跃消失，从而也进一步说明了水流阻力会随着水深变大而减小。阶梯-深潭结构可以稳定山区河流的河床。在较小流量下，水流从阶梯旁边经过，缓缓流入深潭，并不越过阶梯，整个水流流态平缓；当流量增大，接近临界流时，水流越过阶梯向深潭自由落下，其后发育为水跃。阶梯作为低堰让水流从上边流过，水流经阶梯挑流后，与空气混掺，产生涡旋，消耗能量，然后注入下游深潭，水位由下一级阶梯控制。水流从阶梯上的急流状态连续地过渡为深潭中的缓流状态，如图10所示。在这种流量下，由于阶梯-深潭结构对水流的消能作用，水流对河床的冲刷很小；当流量增大得比较大时，随着流速的增大，水流对构成阶梯的卵石产生较大的拖曳力，结构密实的阶梯一般能够抵抗水流的拉力，但是水流越过阶梯后冲刷深潭泥沙，并侵蚀阶梯底部，逐渐导致构成阶梯的卵石局部松动、脱落，最后造成整个阶梯破坏。当不稳定的阶梯瓦解后，水流向下游输运冲散的卵石，如果这些卵石能够堆积在

下一级阶梯处，重新组成新的阶梯，抵抗水流的冲刷，河床还可以继续保持稳定；随着水流流量的进一步增大，最终没有阶梯能够抵抗水流冲刷，整个阶梯-深潭系统破坏，水流不断冲刷河床，使之变成平河床，水流输沙率变得很大。

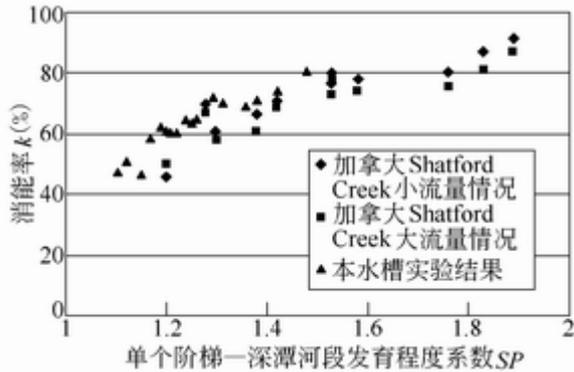


图9 阶梯-深潭单元河段发育程度系数SP和消能率k的关系

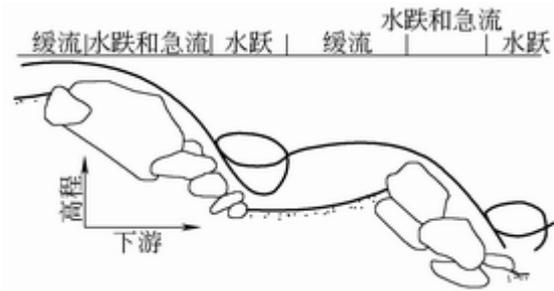


图10 阶梯-深潭水流

图11给出了水槽河床中阶梯和深潭分布不同的泥沙粒径级配，可以看出，在形成的阶梯-深潭河段中，较大颗粒的卵石石块堆积在阶梯处，深潭里的泥沙颗粒粒径平均比阶梯处小很多，而且有很细小的泥沙颗粒存在。据阶梯-深潭的这种水流特性和河床泥沙颗粒分布的特征，分析阶梯-深潭结构的稳定性作用。取一具有代表性的阶梯-深潭单元做分析，形成此阶梯-深潭河段的实验条件为：水槽坡降10%，清水冲刷，流量为0.5l/s，阶梯-深潭发育后平均水深1.8cm，对比此时河段内各处水流剪切力和泥沙起动拖曳力。水流对床面泥沙的剪切力 $\tau = \rho g h J$ ，其中 ρ 是水的比重，J为局部水流坡度，h是水深。沿水流下游方向计算水流剪切力可以看出：水流从深潭处的缓流通过水跌变为陡坡阶梯处的急流，局部坡度较大，水深较小，水流剪切力比较大，而构成阶梯的泥沙颗粒粒径也比较大，能够抵抗的剪切力也比较大；从阶梯下来注入深潭的水流，发生水跃，与空气混掺，产生涡旋，消耗掉大量能量，水流对泥沙颗粒的剪切力很小；在深潭处，虽然水深比较大，但是局部坡度很小，约为零，水流剪切力很小，从而在深潭处，细小的泥沙颗粒也可以稳定存在。按阶梯各处的泥沙颗粒平均粒径，查Shields起动拖曳力曲线，计算得出阶梯-深潭各点处泥沙的起动拖曳力 τ_c 。取连续两个阶梯顶部间距为L，各点对上游阶梯顶部的距离为x，x与L的比值为横坐标，各点的 τ 和 τ_c 作为纵坐标，点绘如图12所示，从中可以看出，当河床发育阶梯-深潭后，水流对各点的剪切力都小于河床该处平均粒径大小的泥沙颗粒的起动拖曳力，可见河床是稳定的。

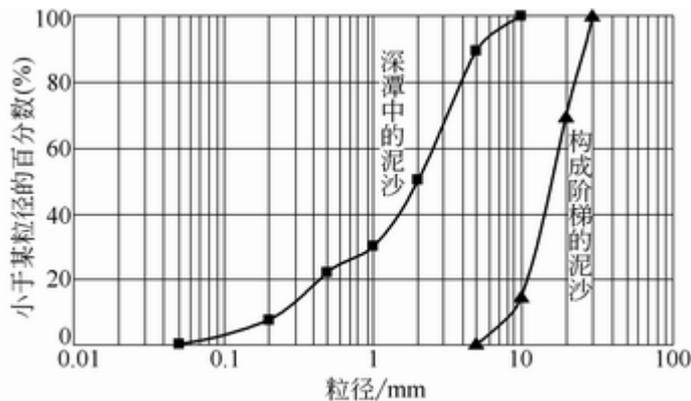


图11 河床中阶梯和深潭中分布不同的泥沙粒径级配

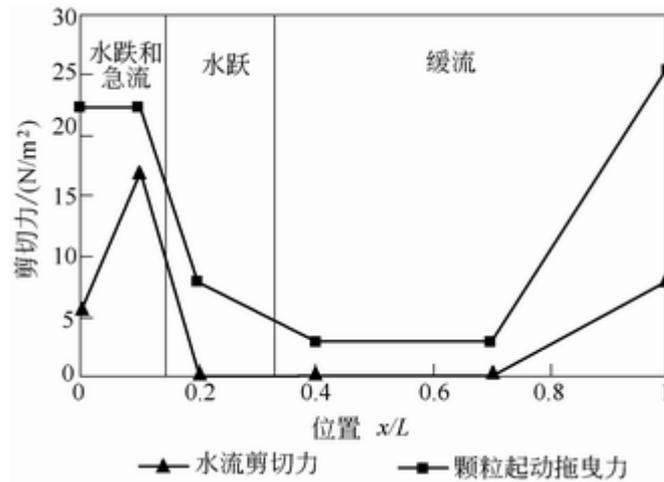


图12 阶梯-深潭各点处的水流剪切力和泥沙颗粒起动拖曳力比较

水槽实验中所形成的绝大部分阶梯-深潭结构都呈现这种剪力分布的情况，可见阶梯-深潭对河床的稳定作用是普遍存在的。这说明，在水流的冲刷作用之下，河床自身形态不断调整，在增大水流阻力，消减水流能量的同时，通过对泥沙颗粒的分选，使得泥沙颗粒重新分布，分别承受不同水流剪力，从而保证了河床的稳定性。阶梯-深潭结构的稳定性还表现在一旦某

表2 阶梯-深潭中各点的参数变化(水槽坡度10%)

参数/位置(x/L)	0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0
水流形态	缓流	水跌和急流	水跃	缓流	缓流	缓流
J	0.02	0.21	/	0	0	0.03
h/cm	1.1	0.3	/	2.4	2.6	1.0
$= Jh/(N/m^2)$	5.7	16.9	0	0	0	7.8
D/mm	23	23	8	4	4	26
$c/(N/m^2)$	22.3	22.3	7.8	2.9	2.9	25.2

一个阶梯被冲毁，卵石颗粒向下运动一段距离后可以建立起新的阶梯，而河床的整体形状保持不变。

4 结论

在天然河流中阶梯-深潭的发育能够增大水流阻力，消减水流能量，从而保护河床，使河床得到更大的稳定性，同时这种地貌提供了多样的水生物栖息地，使得河岸生态系统保持物种多样性。从而阶梯-深潭系统代表着山区河流最健康的河床结构，也将是流域治理良好的标志。

参考文献：

- [1] 王兆印. 欧美泥沙述评[A]. 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 1995. 6-8.
- [2] Lewin J. British River[J]. George Allen and Unwin, 1981, 216.
- [3] Anne Chin. The morphologic structure of step-pool in mountain streams[J]. Geomorphology, 1997, 27: 191-204.
- [4] Anne hin. The periodic nature of step-pool mountain streams[J]. American Journal of Science, 2002, 302(2): 144-167.
- [5] Curran Janet H, Wohl Ellen E. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels[J]. Cascade Range, Washington. Geomorphology, 2003, 51(1-3): 141-157.

- [6] William A, MacFarlane, Ellen Wohl. The Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades[Z]. Water Resources Research, 2002, 10.
- [7] Andre Zimmermann, Michael Church. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step pool channel[J]. Geomorphology, 2001, 40: 311-327.
- [8] Ergenzinger P. River bed adjustment in a step-pool system Lainbach[A]. Upper Bavaria, Thorne, C. R., Bathurst, J. C., Hey, R. D. (Eds.), Sediment Transport in Gravel bed Rivers[C]. Wiley, Chichester, Dynamics of Gravel-bed Rivers, 1992: 415-430.
- [9] 倪晋仁, 马蔼仁. 河流动力地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998.
- [10] 王兆印. 泥沙研究的发展趋势和新课题[J]. 地理学报, 1998, 53(3): 245-255.
- [11] Whittaker J G. Sediment transport in step-pool streams[A]. Thorne, C. R., Bathurst, J. C., Hey, R. D. (Eds.), Sediment Transport in Gravel bed Rivers[C]. Wiley, Chichester, 1987: 545-579.
- [12] Hayward J A. Hydrology and stream sediments in a mountain catchment[D]. Ph. D. thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1980.
- [13] Ellen Wohl, Susan Madsen, Lee MacDonald. Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana[J]. USA. Geomorphology, 1997, 20: 1-10.
- [14] Michael Rosport, Andreas Dittich. Step pool formation and stability-a flume study[A]. the sixth international symposium on river sedimentation[C]. 1995. 525-533.
- [15] Grant G F J, Swanson M G Wolman. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams[J]. Western Cascades, Oregon, Geol. Soc. Am. Bull., 1990, 102: 340-352.
- [16] 徐江, 王兆印. 山区河流阶梯-深潭的发育及其稳定河床的作用[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 21-27.
- [17] 余常昭. 水力学(第四版)下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

Formation and mechanism of step-pool system

XU Jiang¹, WANG Zhao-yin^{1,2}

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. International Research and Training Center for Sedimentation and Erosion, Beijing 100044, China)

Abstract: The step-pool sequence is a kind of micro-morphology widely existing in mountain stream. The formation process of this kind of system under the conditions of different discharges, stream bed slopes, gradations of sedimentation and incoming sediment rates from upstream are studied experimentally in laboratory. On this basis, the evolution and mechanism of this system are further investigated. An index namely SP coefficient is proposed to evaluate the development degree of the system. The expression of SP related to riverbed slope, gradation of sediment and incoming sediment rate from upstream is established according to the experimental data. The effects of step-pool system on enhancing the flow resistance, dissipating the kinetic energy

of stream flow and stabilization of riverbed are analyzed.

Key words: step-pool sequence; micro-morphology; development degree; flow resistance; energy dissipation; stability of riverbed