

文章编号:1001-8166(2006)04-0409-08

西南山区河流阶梯—深潭系统的生态学作用*

王兆印^{1,2}, 程东升², 何易平¹, 王洪铸³

(1. 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; 2. 国际泥沙研究与培训中心, 北京 100044; 3. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072)

摘要:山区河流发育的阶梯—深潭系统具有显著的生态学作用。阶梯—深潭系统增大水流阻力和河床抗冲刷力, 稳定了河床和岸坡。大卵石堆积成阶梯, 细颗粒泥沙在深潭河段的缓流滞流区沉积下来形成淤泥层, 形成适宜多种生物的栖息地。选择小江支流——深沟、蒋家沟和小白泥沟, 以及四川九寨沟和金沙江进行野外实验、取样分析。结果发现阶梯—深潭系统较发育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。而邻近的小白泥沟和蒋家沟底栖动物密度仅 0.75 个/m², 生物量不到 0.006 g/m²。考虑河流不同部位底质、水深、流速等特性, 提出了生物栖息地多样性及其计算方法, 研究发现大型无脊椎动物的生物多样性随栖息地多样性增加而增加。利用阶梯—深潭系统治理山区河流, 既能保持河道稳定, 又能维持较高的生物多样性, 保持健康的河流生态系统。

关键词:阶梯—深潭系列; 河流生态; 大型无脊椎动物; 生物多样性; 生物栖息地多样性

中图分类号: P64 **文献标识码:** A

1 研究背景

在山区河流中, 阶梯—深潭系统是一种常见的河流地貌, 河床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。在美国的加利福尼亚圣莫尼卡(Santa Monica)山区^[1,2], 纽约阿迪朗达克(Adirondack)山区^[3,4], 加拿大不列颠哥伦比亚省(British Columbia)的Shatford Creek山区^[5], 德国巴伐利亚阿尔卑斯(Bavarian Alps)^[6]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^[7]等。

从 20 世纪 80 年代起, 国内外学者对阶梯—深潭系统进行了多方面的研究。Whittaker 等^[7,8] 调查

研究了山区河流阶梯—深潭系统的发育成因, 随后又分析了泥沙运动与阶梯—深潭的相互作用。Ashida 和 Egashira 等^[9,10] 研究了泥沙运动对于阶梯深潭系列的形成和破坏。Abrahams^[11] 分析了阶梯—深潭系列对于增大水流阻力保护河床的作用。Rosport 等^[12,13] 通过水槽实验研究了阶梯深潭的形成过程和水力学特性。Grant 等^[14] 研究了形成阶梯深潭的临界条件。Chin^[2] 分析了阶梯—深潭的地貌特征。Curran 等^[3] 调查研究了阶梯—深潭溪流中落木对阻力的影响。Zimmermann 等^[4] 探讨了阶梯深潭河流洪水对河床的作用和河床演变。徐江等^[16,17] 通过实验研究了形成阶梯—深潭的条件, 在此基础上分析得出了阶梯—深潭发育程度系数与坡度、床沙级配、上游来沙率之间的定量关系, 阐明了阶梯—深潭系统增加水流阻力, 消减水流动能, 稳定河床的作用^[18]。

收稿日期:2005-09-05; 修回日期:2006-02-17.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“流域生态与水利工程优化调控”(编号:CB415206); 国家自然科学基金和香港研究资助局联合资助项目“河流水沙环境生态综合管理研究——以东江为例”(编号:50318003)资助.

作者简介:王兆印(1951-), 男, 山东济南人, 教授, 主要从事河流水力学及水动力学研究. E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

阶梯—深潭系统增大阻力和河床抗冲刷力^[16],稳定了河床,从而稳定了岸坡,在一定的温度和降雨条件下两岸可以发育良好的植被。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,这样的河流具有多种生物适宜的栖息条件,因而生物多样性较高。

本文选择长江上游小江流域的 3 条支流——深沟、蒋家沟和小白泥沟,四川九寨沟和长江上游金沙江的一个滞流区进行野外实验,分析了阶梯—深潭系统在河流生态学上的作用,对比研究了河床结构和底质组成对底栖动物的影响。

2 研究区特征

阶梯—深潭系统按其成因和规模分成 2 类:一类是山区河流两岸陡坡由于滑坡、泥石流或其它地质作用将河道堵塞,其上游壅水成湖泊下面形成跌水或瀑布。这种阶梯—深潭规模巨大,阶梯高度和深潭的深度一般在几米到几十米。但是,这种阶梯—深潭的形状和分布频率不规则。四川九寨沟就是典型的例子。四川九寨沟属于嘉陵江流域白水河支流,平均坡降约为 4%,水流冲刷致使河床下切,岸坡不稳,常发生泥石流、崩塌和滑坡。滑塌的石料等堵塞沟床河道,蓄水成湖,从而形成了串珠状大小不一的高山湖泊和瀑布。现在九寨沟已经发育成由 118 个高山湖泊、17 个瀑布群和许多急流和跌水形

成的大型阶梯—深潭系统。其深潭段为高山湖泊,深度最大达 80 m,面积从几百平方米到 90 万 m² 不等;阶梯段为激流、跌水和瀑布,落差从几米到几十米不等,如图 1(a) 所示。

另一类是更为常见的山区小河中的阶梯—深潭系统。这种阶梯—深潭系统比较规则,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,阶梯下游形成深潭段。深潭段水深流缓,细颗粒泥沙(包括粘土淤泥)在此沉积。王兆印等^[18]的实验说明了这种阶梯—深潭的发育过程和特征。每一个阶梯—深潭单元的长度,即由大卵石构成的相邻两个阶梯之间的距离,称为单元长度。许多研究结果说明单元长度 L 与河床坡度成反比^[18,11]。云南小江支流深沟位于东川市郊区,坡降为 10.5%,过去由于开采铜矿破坏植被导致严重侵蚀,常常发生泥石流。1976 年采取重点治理措施后,深沟上游来沙减少,在长期冲刷作用下逐渐发育出阶梯—深潭系列,大卵石和巨砾构成高 0.2~1 m 的阶梯,消耗水流能量,稳定了河床,如图 1(b) 所示。

水质分析表明,这些河流采样点处的河水均达到了 I 类、II 类国家水质标准,因此水质条件之间的差异可以忽略。九寨沟、深沟和蒋家沟的含沙量都为零,金沙江含沙量也接近于零,但是小白泥沟含沙量高达 21.7 kg/m³。5 个采样点的基本情况如表 1。



(a)



(b)

图 1 瀑布和湖泊构成的大型阶梯—深潭系列(四川九寨沟);大卵石构成的山区溪流的阶梯—深潭系列(云南东川小江支流深沟)

Fig. 1 Waterfall-lake step-pool system (Jiuzhai Creek, Sichuan Province); Boulders, cobbles and gravel step-pool system (Shengou Ravine, a tributary of the Xiaojiang River, Yunnan Province)

小白泥沟和蒋家沟都是小江的支流,距离深沟分别只有8 km和17 km。这两个小流域侵蚀严重,经常发生泥石流。虽然气候和原始河床组成与深沟相似,但是完全没有发育阶梯—深潭系列,河势散乱

(图2)。金沙江坡降只有0.15%,没有阶梯—深潭结构。而金沙江采样处位于小江入汇金沙江口上游大约5 km一个河边缓流区,此处河床质为卵石与沙混合,卵石之间的空隙都被沙充填。

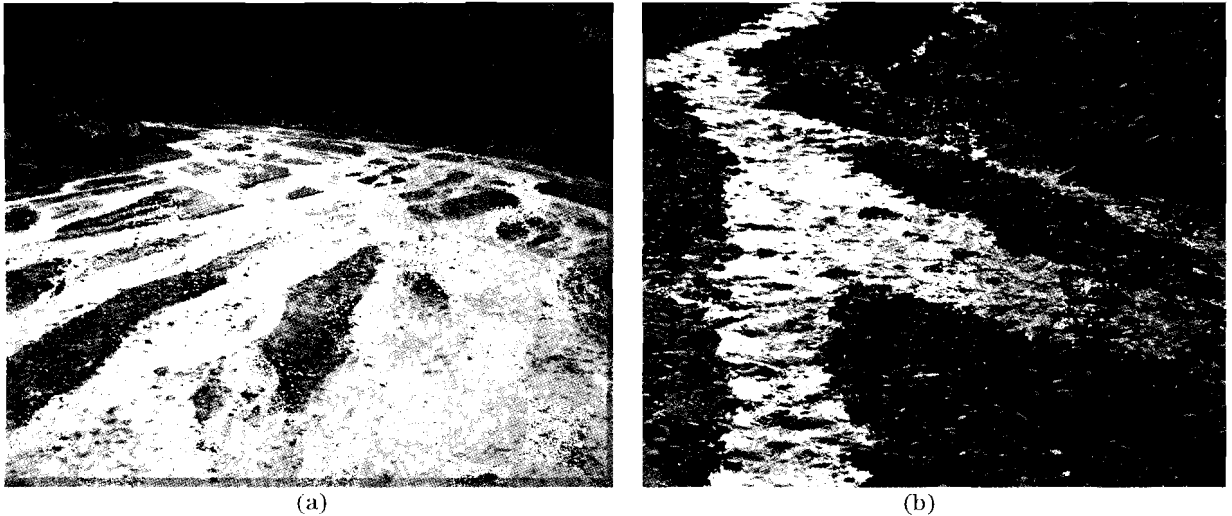


图2 东川小江支流小白泥沟河势散乱,表层床沙由卵石和沙混合而成,没有阶梯—深潭结构;
小江支流蒋家沟枯水期表层河床由大小不同的砾石构成,没有阶梯—深潭结构,河势散乱

Fig. 2 No step-pool systems developing in the Xiaobaini ravine, a tributary of the Xiaojiang river;
Jiangjia ravine, a tributary of the Xiaojiang river

表1 典型河流底栖动物采样点的基本情况

Table 1 Characteristics of the rivers for benthic invertebrate sampling

采样点	采样时间	位置	天气状况	水温	河床结构以及河势	坡降J
九寨沟	2005年5月12日	33°18'50.29"N 104°13'45.29"E	天气晴朗	10℃	大型阶梯—深潭系统; 河势稳定	0.042
东川 深沟	2005年5月14日	26°06'33.8"N 103°12'54.32"E	天气晴朗	25℃	典型阶梯—深潭系统; 河势稳定	0.105
东川 蒋家沟	2005年5月15日	26°15'50.29"N 103°08'45.29"E	天气晴朗	23℃	无结构; 河势散乱,主流摆动	0.055
东川 小白泥沟	2005年5月15日	26°05'45.54"N 103°08'29.24"E	天气晴朗	25℃	无结构; 河势散乱,主流摆动	0.050
金沙江缓流区	2005年5月16日	26°31'59.48"N 103°03'16.97"E	天气晴朗	27℃	沙波; 河势基本稳定	0.0015

采用现场采样、现场测定结合拍照分析的方法,来确定床沙粒径组成。图3给出了蒋家沟、小白泥沟、金沙江、深沟深潭段和深沟阶梯段采样点处表层床沙级配,其中 D 为颗粒粒径, $P(<D)$ 为河床表层床沙中粒径小于 D 的颗粒百分比。小白泥沟和金沙江都是粗沙和卵石的混合体,级配也比较接近。由于沙粒充填了卵石的空隙,不利于底栖动物生存。蒋家沟级配分布宽,从细沙到大石块都有,但以2~200 mm的砾石为主体,各种颗粒混合在一起,也不利于底栖动物的生存。深沟在30年前与蒋家沟相

似,现在由于阶梯—深潭发育,大石块和细颗粒分别处于阶梯和深潭段,形成多样性的生物栖息地。

3 底栖动物测量及分析

目前普遍采用底栖动物作为指示物种群进行快速生态评价^[19],因为:①底栖动物能反映当地生态条件;②能反映短期环境变化的综合影响;③对生态环境恶化能迅速响应;④采样比较容易;⑤底栖动物是绝大部分鱼类的饵料;⑥底栖动物物种丰富,普遍存在,在不同的生态环境条件下优势物种不同;⑦—

般说来,环境生态条件好的河流底栖动物物种多样性高,单位面积生物量大。

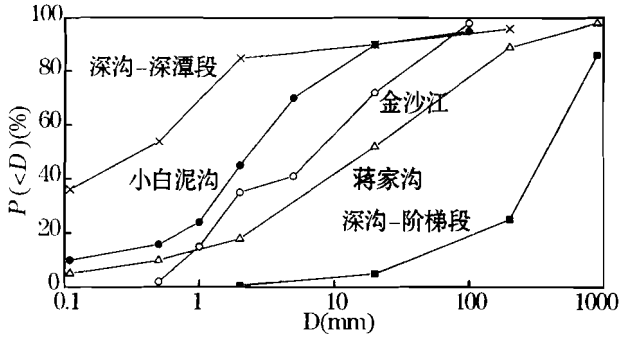


图 3 蒋家沟、小白泥沟、金沙江、深沟深潭段和深沟阶梯段的表层床沙级配

Fig. 3 Surface-layer sediment distributions in the Jiangjia ravine, Xiaobaini ravine, Jinsha river, step and pool of the Shengou ravine

采用特制的底栖动物采样器在上述 5 条河流采样,将活的底栖动物逐个挑选出来,结果发现不同河流的底栖动物数量及物种组成差别极大。底栖动物密度从 0 到 552 个/m²,生物量从 0 到 5.96 g/m²。九寨沟里生长着一些喜欢冷水高氧的毛翅目动物,但是很少有小蛭类。深沟里生长着一些个体较大的蜻蜓目幼虫、蜉蝣目和腹足纲动物。蒋家沟底栖动物很少,在小白泥沟和金沙江采样点附近取样,没有找到底栖动物。

采用香农—维纳多样性指数和优势度指数对河流生态进行评价。香农—维纳多样性指数由下式给出:

$$H = - \sum_{i=1}^T P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中 H 为多样性指标, T 为样本所含有的物种种数, P_i 代表第 i 种个体数 n_i 占有所有物种总个体数 N 的比例,即 $P_i = n_i/N$ 。该式运用物种数量和物种相对丰度的分布来反映群落的物种多样性。香农—维纳多样性指数一般位于 1.5 ~ 3.5 之间的范围,很少超

过 4^[20]。香农—维纳多样性指数包含两层含义,第一是物种的多样性,第二是物种的均匀程度。物种的数目越多,均匀度越高,物种的多样性越高。

香农—维纳的均匀度指数为:

$$E = H/H_{\max} \quad (2)$$

式中 E 为均匀度(0 ~ 1); H 为多样性指标; H_{\max} 为最大多样性。设群落中物种总数为 T ,当所有种都以相同比例(1/ T)存在时,将有最大的多样性,即 $H_{\max} = \ln T$ 。

香农—维纳的优势度指数定义为:

$$D_s = \ln T + \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中 D_s 为优势度,代表群落中占统治地位的物种密度及优势程度。物种数愈多,优势物种愈突出,优势度愈高。

表 2 给出了上述 5 条河流不同河床结构底栖动物采样分析结果。在条件允许的情况下,底栖动物采样面积为 1 m²,但根据采样点的实际情况有所调整,如在九寨沟中,由于受到采样条件的限制,采样面积较小;而在蒋家沟、小白泥沟和金沙江的采样点,底栖动物很少或没有,为减少采样误差,采样面积都较大。九寨沟底栖动物只鉴定到目,其中端足目蜻蜓目毛翅目和双翅目动物可能不止一科,此处假设为一科,这样计算出来的生物多样性指数可能偏小。深沟生物多样性计算中也假设蜉蝣目、蜻蜓目和毛翅目下动物为单一科。另外样本中有 198 个体形细小的动物个体未鉴别出来,这 198 个动物个体的总重量不到 0.01 g。在生物多样性计算中没有考虑这 198 个体形细小的动物,这样也会使计算出的多样性指数有所降低。显然,九寨沟和深沟这样发育阶梯—深潭结构的河流底栖动物密度比临近的具有同样气候水文条件但是不发育阶梯—深潭的蒋家沟高出 600 ~ 1 000 倍,生物多样性指数也大得多。这是由于阶梯—深潭创造了多样性的生物栖息地的缘故。

表 2 不同河床结构底栖动物采样分析结果

Table 2 Analysis of the benthic invertebrate samples

采样点	采样河床面积 (m ²)	底栖动物 个数	底栖动物 生物量(g)	底栖动物密度 (n/m ²)	单位面积 生物量(g/m ²)	物种优势度 指数	均匀度 指数	生物多样性 H
九寨沟	0.33	182	1.5690	552	4.7545	1.2093	0.5893	1.7351
深沟	1.00	398	5.9530	398	5.9526	1.4310	0.5706	1.9012
蒋家沟	12.00	9	0.0705	0.75	0.0059	0.9303	0.5526	1.1491
小白泥沟	10.00	0	0	0	0	0	0	0
金沙江	10.00	0	0	0	0	0	0	0

4 河流生物栖息地的多样性

许多学者提出了生物栖息地评价方法。在 20 世纪 80 年代,美国鱼和野生动物服务局 (US Fish and Wildlife Service) 发布了生物栖息地适应指数模型 (Habitat Suitability Index Model)^[21, 22]。基本概念是:①任一河流都具有一定的承载野生动物生存和繁衍的能力;②这个能力的大小决定于河流的物理化学条件。对于一个目标物种,例如鲑鱼,它所适宜的最佳流速大约为 1 m/s,适应度指数 HIS 在流速为 1 m/s 时取为 1,随着流速增大或减小 HIS 都降低,根据实测流速可以计算出栖息地的适应度指数 HIS,其值介于 0~1。对于影响目标物种的其它物理变量,如河床底质、水深、水质同样可以算出 HIS 值。在此基础上发展起来生物栖息地模拟系统 PHABSIM^[23]。该模型将河流分成片段,对每一片段根据其物理条件算出 HIS 值,由此评价河流生物栖息地。但是这种评价只是以一个目标物种为标准,在分析生物栖息地条件对整个河流生态和生物多样性的影响方面存在一定的局限性。

影响底栖动物的主要物理条件,即生物栖息地条件是河床底质、水深和流速。不同物理条件支持不同的生物群,多样性的生物栖息地支持多样性的生物群。为此我们引入生物栖息地多样性指数 H_D ,代表测量地点附近周围水域的底栖动物的栖息地的多样性,由下式给出:

$$H_D = N_h N_v \sum_i \alpha_i \quad (4)$$

表 3 不同河床底质的 α 值

Table 3 α values for the riverbed materials

底质	大卵石、大石块 (>20mm)	水草	粘土淤泥 (<0.02mm)	砾石 (>20mm)	细卵石 (2~20mm)	粉沙 (0.02~0.2mm)	沙 (0.2~2mm)
α	6	5	4	3	2	1	0

当某种河床底质所占面积不小于水域面积的 1/10 时,就要在生物栖息地的计算中加以考虑。但是,如果 2 种以上的河床物质混合在一起,只能按照较小的 α 值计算,例如大卵石孔隙中全是淤泥,按淤泥质河床计算。再如,沙充填于卵石孔隙中,按沙质河床计算。只有当不同底质分布在不同部位,如卵石在阶梯段,淤泥在深潭段,不同的底栖动物都可以有适宜的环境,才能按两种底质计算。

如果一个水域中底质分别为大卵石、水草和淤

泥的面积都不小于水域面积的 1/10,则 $\sum_i \alpha_i = 6 + 5$

式中 N_h 和 N_v 分别为水深多样性数和流速多样性数。将水深范围为 0~0.1 m、0.1~1 m 和 >1 m 分别定义为浅水、中水和深水。如果上述 3 种水深的面积都不小于水域面积的 1/10,则 $N_h = 3$;如果只有浅水和中水两个水深范围的面积不小于水域面积的 1/10,则 $N_h = 2$;以此类推。

将流速范围为 0~0.3 m/s、0.3~1 m/s 和 >1 m/s 分别定义为缓流、低流速和高流速。如果一个水域中上述 3 种流速的面积都不小于水域面积的 1/10,则 $N_v = 3$;如果只有两个流速范围,如缓流和低流速区的面积不小于水域面积的 1/10,则 $N_v = 2$;以此类推。

如果河床底质为大卵石,水从卵石上方和孔隙间流过,从而形成多样性的生存空间,所以大卵石代表较高的生物栖息地多样性。水草也可以造成水流和营养水平不同的多样空间。淤泥为底栖动物提供了可塑性的空间,许多底栖动物生活在淤泥里,但是能在淤泥中生存的物种比生活在卵石中的少。砾石的棱角使得水流在空隙间的流动不畅,对底栖动物的生存不如大卵石。细卵石孔隙小,稳定性也差,底栖动物在其中生存的较少。颗粒比较均匀的沙一方面空隙太小,底栖动物无法在其中生活,另一方面沙质河床十分不稳定,经常发生冲刷和淤积,是最不利于底栖动物的河床底质。在野外观测到,原来底栖动物比较丰富的淤泥质河床在洪水时覆盖了一层沙,结果所有的底栖动物都死亡了。用 α 代表底质对生物栖息地多样性的影响,取值见表 3。

泥的面积都不小于水域面积的 1/10,则 $\sum_i \alpha_i = 6 + 5 + 4 = 15$;如果水域中底质都是沙,则 $\sum_i \alpha_i = 1$;以此类推。显然,底质的种类和多样性是底栖动物的主要影响因素。也有人底质的细观结构进行过研究,如底质表面光滑度和附着藻层对底栖动物多样性的影响^[25],结果发现底质表面光滑度对底栖动物没有多大影响,而附着藻层仅能在短时间内增加底栖动物。

利用以上计算方法和公式(4)以及表 4 中 5 条河流采样点的物理条件计算出生物栖息地的多样性指数 H_D , 结果列入表 4, 其中小白泥沟和金沙江底质都是卵石和沙的混合物, 但是沙充填了所有的卵石空隙, 所以底质按沙质河床计算。图 4 给出了生物多样性与生物栖息地的多样性的相互关系曲线。

显然, 生物栖息地的多样性指数越高, 生物多样性指数就越大。应该指出, 上述关系采用的生物多样性指数实测数据是在物种分类只到目的基础上做出的, 得出的生物多样性指数偏低一些。但是足以证明底栖动物多样性随着生物栖息地的多样性指数增大而增大的规律性。

表 4 河流生物栖息地多样性参数表
Table 4 Parameters of habitat diversity

采样点	非洪水期水深范围(m)	N_s (水深多样性)	非洪水期流速范围(m/s)	N_v (流速多样性数)	河床质	$\sum \alpha_i$ (河床底质)	H_D
九寨沟	阶梯段:0.1~1; 深潭段:1~80	2	阶梯段:1~4; 深潭段:0~0.3	2	阶梯段:巨石和大卵石; 深潭段:水草、卵石	11	44
东川深沟	阶梯段:0.1~0.3; 深潭段:0~1	2	阶梯段:0.6~1; 深潭段:0~0.3	2	阶梯段:大卵石; 深潭段:淤泥、卵石、水草	15	60
东川蒋家沟	0~0.3	1	0~1.4	3	大小不等砾石,多数长度 10~200 mm	6	18
东川小白泥沟	0~0.1	1	0~1.0	1	沙和砾石的混合体,砾石之间的空隙被沙充填	0	0
金沙江缓流区	0.1~1	3	0~1.0	1	沙和卵石的混合体,卵石之间的空隙被沙充填	0	0

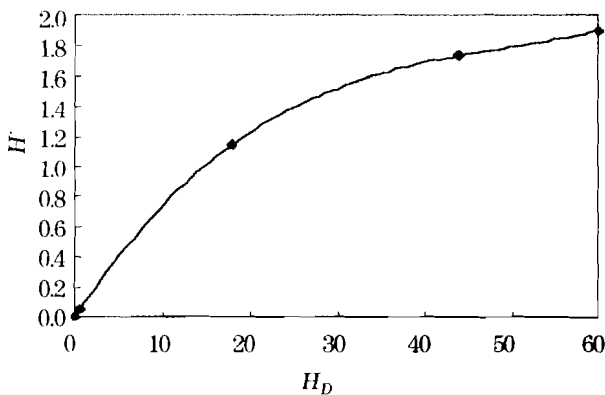


图 4 生物多样性与生物栖息地的多样性的相互关系
Fig. 4 Relationship between the biodiversity of benthic macro-invertebrates and habitat diversity

当然, 影响生物多样性的不仅仅是生物栖息地的物理条件, 水温水质也是重要因素。一般来说, 水质的恶化总是使得生物多样性降低。低温水域生长的底栖动物群与高温水域的不同, 但是同一个水域, 水温差别不大, 所以在局部河段生物栖息地多样性指数中不考虑水温差别。如果研究整个流域的生物栖息地的多样性, 必须考虑上中下游气候差别, 不同河段水温以及水温变化幅度的差别造成的生物栖息地的多样性, 这已经超出了本文的范畴。

从以上研究结果可以看出, 阶梯—深潭系统在生态学上具有特殊意义。阶梯—深潭系统的发育一方面受到水流泥沙流域植被的影响, 另一方面又反过来改变水流状态、泥沙分布、河床底质、河边植被发育, 改变了生物栖息地和水生物的生态条件。阶梯—深潭水流中存在强紊流, 使水体内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。阶梯—深潭创造了不同底质、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捕食动物和急流的地方。多样性的栖息地有利于保持较高的生物多样性, 防止单个物种密度偏高。水流通过阶梯时卷吸进大量空气气泡, 使水中溶解氧含量增加, 提高了水流降解污染物的能力。具有阶梯—深潭系统的山区河流具有健康的生态环境, 并且具有较高的天然生态环境的稳定性。一些国家已经开始利用阶梯—深潭系统对山区河流进行治理^[25]。国内对阶梯—深潭系统的研究较晚, 但是随着人们对阶梯—深潭认识的逐步深入, 它将成为中国河流研究的重要课题^[26]。本文建议采用阶梯—深潭作为治理山区河流方略, 将大石块按一定间隔堆放在下切河床上, 逐渐发育出阶梯—深潭系列, 达到稳定河床, 恢复河流健康和提高生物多样性的目的。

5 结 论

山区河流阶梯—深潭系统按其成因和规模分成2类:一类为大型阶梯—深潭系统,是在滑坡、泥石流作用下堵塞河道形成的串珠状高山湖泊和瀑布群。另一类为典型的山区小河的阶梯—深潭系统,是水流冲刷河床下切过程中粗大卵石叠在一起形成阶梯段,水流冲刷下游形成深潭段的结构。

研究发现阶梯—深潭系统形成适宜多种生物的栖息地,具有很高的生物栖息地多样性。野外实验和取样分析发现发育阶梯—深潭系列的深沟和九寨沟底栖动物密度高达552个/m²,生物量高达5.96g/m²。而邻近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0.006g/m²。

本文考虑河流不同部位底质、水深、流速的差别适应不同的底栖动物,提出生物栖息地的多样性及其计算方法。生物栖息地的多样性越高,生物多样性越高。因此,利用阶梯—深潭系统治理山区河流,既能保持河道稳定,又能维持较高的生物多样性,保持健康的河流生态系统。

致谢:中国科学院成都山地灾害与环境研究所柳素清教授级高工和康志成教授级高工为野外考察提供了指导和帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

[1] Anne Chin. The morphologic structure of step-pool in mountain streams[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 191-204.

[2] Anne Chin. The periodic nature of step-pool mountain streams[J]. *American Journal of science*, 2002, 302: 144-167.

[3] Curran Janet H, Wohl Ellen E. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington[J]. *Geomorphology*, 2003, 51(1~3): 141-157.

[4] 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.

[5] Andre Zimmermann, Michael Church. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel[J]. *Geomorphology*, 2001, 40: 311-327.

[6] Ergenzinger P. River bed adjustment in a step-pool system Iainbach, upper Bavaria[C]//Thorne C R, Bathurst J C, Hey R D, eds. *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, Dynamics of Gravel-bed Rivers, 1992: 415-430.

[7] Whittaker J G, Martin N R Jaeggi. Origin of Step-Pool System in Mountain Streams[R]. ASCE, HY6, 1982: 758-773.

[8] Whittaker J G. Sediment transport in step-pool streams[C]//

Thorne C R, Bathurst J C, Hey R D, eds. *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, 1987: 545-579.

[9] Ashida K, Egashira S, Kamezaki N. Mechanics of sediment transportation in the production and destruction processes of step-pool morphology[J]. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 1987, (20B-2): 493-506.

[10] Egashira S, Ashida K. Roles of Step-pool Systems in Mountain streams[R]. 6th Congress Asian and Pacific Regional Division. IAMR, 1988: 29-36.

[11] Abrahams A D, Li G, Atkinson J F. Step-pool stream: Adjustment to maximum flow resistance[J]. *Water Resoure Research*, 1995, 31(10): 2 593-2 602.

[12] Michael Rosport, Andreas Ditttrich. Step Pool Formation and Stability-A Flume Study[R]. The Sixth International Symposium on River Sedimentation, 1995: 525-533.

[13] Michael Rosport. Hydraulics of steep mountain streams[J]. *International journal of sediment research*, 1997, 12(3): 99-108.

[14] Grant G, Swanson F J, Wolman M G. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102: 340-352.

[15] Andre Zimmermann, Michael Church. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel[J]. *Geomorphology*, 2001, 40: 311-327.

[16] Xu Jiang, Wang Zhaoyin. The formative mechanism of step-pool system and its role in bed stabilization of mountain stream[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003, (5): 21-27. [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] Xu jiang, Wang Zhaoyin. Formation and mechanism of step-pool system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (10): 48-55. [徐江,王兆印. 阶梯—深潭的形成及作用机理[J]. 水利学报, 2004, (10): 48-55.]

[18] Zhaoyin Wang, Jiang Xu, Changzhi Li. Development of step-pool sequence and its effects in resistance and stream bed stability[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2004, 19(3): 161-171.

[19] Plafkin J L, Barbour M T, Porter K D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers[R]. EPA444/ 4-89-001. U. S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 1989.

[20] Hobart and Willian Smith Colleges. Java Components for Mathematics[EB/OL]. <http://math.hws.edu/javamath/ryan/UniversityTest.html>, 2001.

[21] United States Fish and Wildlife Service (USFWS). Standards for the Development of Habitat Suitability Index Models (ESM 103)[R]. US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington DC, 1981.

[22] Schamberger M, Farmer A H, Terrell J W. Habitat Suitability Index Models; Introduction. FWS/OBS-82/10. U. S Department of the Interior[R]. US Fish and Wildlife Service, Washington DC, 1982.

- [23] Stalnaker C, Lamb B L, Henriksen J, *et al.* The instream flow incremental methodology: A Primer for IFIM[M]. National Ecology Research Center, Internal Publication, National Biological Survey, Fort Collins, CO. 1994.
- [24] Downes B, Lake P S, Schreiber E S G. Habitat structure, resources and diversity: The separate effects of surface roughness and macroalgae on stream invertebrates [J]. *Oecologia*, 2000, 123:569-581.
- [25] Zhao-yin Wang, Joseph H W Lee. Integrated River Management [M]. Tsinghua University, 2004.
- [26] Zhaoyin Wang. Outlook for sediment research [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53 (3): 245-255. [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].

A Study of the Ecological Functions of Step-pool System in Southwest Mountain Streams

WANG Zhao-Yin^{1, 2}, CHENG Dong-sheng², HE Yi-ping¹, WANG Hong-zhu³
 (1. *State key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
 2. *International Research Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100044, China;*
 3. *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China*)

Abstract: The development of step-pool system plays an important role in stream ecology. Step-pool system maximizes the flow resistance and protects the bed sediment from erosion. Thus the riverbed and bank slope are stabilized. Boulders, cobbles and gravel tightly interlock and form the steps having an inherent stability which only extreme floods are likely to disturb. Silt and clay deposit in the pools behind the steps. These steps and pools provide high diversity of habitats for stream bio-community. Field investigations are performed to the Xiaojiang River, Jinsha River and Jiuzhai Creek. Step-pool systems develop well in the Jiuzhai Creek and Shengou Ravine, which is a tributary of the Xiaojiang River. The density of benthic macro-invertebrate is 552/m² in the Jiuzhai Creek and 398/m² in the Shengou Ravine and the density of bio-mass of benthic macro-invertebrate is 4.75g/m² in the Jiuzhai Creek and 5.96 g/m² in the Shengou Ravine. As a comparison, the density of benthic macro-invertebrate is only 0.75/m² in the Jiangjia Ravine and 0 in the Xiaobaini Ravine, which are also the tributary of the Xiaojiang River, but no step-pool develops in the ravines. The density of bio-mass of benthic macro-invertebrate is only 0.006 g/m² in the Jiangjia Ravine and 0 g/m² in the Xiaobaini Ravine. This paper proposes the concept of habitat diversity and a calculation formula considering the spacious distribution of various substrates, velocity and water depth. The study reveals that the biodiversity of benthic macro-invertebrates increases with the habitat diversity in a logarithmic law. Artificial step-pool system can be used for training of mountain streams, which may stabilize the streambed and bank slope, restore healthy river ecology and high biodiversity, and better aesthetic landscape as well.

Key words: Step-pool system; River ecology; Benthic macro-invertebrate; Biodiversity; Habitat diversity.