

引水型电站对河流底栖动物栖息地的影响及生态需水量

傅小城^{1,2}, 吴乃成^{1,2}, 周淑婵^{1,2}, 蒋万祥^{1,2}, 李凤清^{1,2}, 蔡庆华^{1,*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:于 2005 年 12 月至 2006 年 5 月, 对香溪河干流一典型引水型电站——苍坪河电站取水对坝下河段底栖动物栖息地的影响及河道的最小生态需水量进行调查研究, 利用加权可利用宽度法 (Weighted Usable Width) 分别计算了香溪河底栖动物 3 个主要的目 (蜉蝣目、襁翅目和毛翅目) 的各断面加权可利用宽度, 并对各断面结果进行比较。结果表明, 电站引水坝的取水使下游河段部分地出现干涸, 3 个目的加权可利用宽度显著减小。根据底栖动物加权可利用宽度与流量的回归关系, 计算得香溪河底栖动物主要类群的最小生态需水量为 $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词:加权可利用宽度法; 最小生态需水量; 底栖动物; 香溪河

文章编号: 1000-0933(2008)05-1942-07 中图分类号: Q178 文献标识码: A

Impacts of a small hydropower plant on macroinvertebrate habitat and an initial estimate for ecological water requirement of Xiangxi River

FU Xiao-Cheng^{1,2}, WU Nai-Cheng^{1,2}, ZHOU Shu-Chan^{1,2}, JIANG Wan-Xiang^{1,2}, LI Feng-Qing^{1,2}, CAI Qing-Hua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1942 ~ 1948.

Abstract: A typical small hydropower plant “Cangpinghe” was investigated monthly for studying the impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate habitat and the ecological water requirement of Xiangxi River. The weighted usable widths (WUW) were calculated for three dominant orders of the macroinvertebrate (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera) at each cross section and some comparisons were conducted among cross sections. The results show that the dam's diversion caused part of the downstream channel dried up and the WUW of the three orders of the macroinvertebrates declined significantly between the upstream channel and the downstream channel. According to the relationship between the WUW and the river discharge, it was calculated that the minimum ecological water requirement for the main group of the macroinvertebrates in Xiangxi River was $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Key Words: weighted usable width; minimum ecological water requirement; macroinvertebrate; Xiangxi River

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(30330140); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412300)

收稿日期:2007-02-13; **修订日期:**2007-08-23

作者简介:傅小城(1983~), 男, 浙江金华人, 硕士生, 主要从事系统与流域生态学研究. E-mail: xcfu0549@ihb.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30330140) and the National Basic Research Priorities Program (973 Programme, No. 2002CB412300)

Received date: 2007-02-13; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: FU Xiao-Cheng, mainly engaged in systems ecology and watershed ecology. E-mail: xcfu0549@ihb.ac.cn

随着社会和经济的发展,人们逐渐认识到河流生态系统健康的重要性。围绕恢复和维持河流生态系统健康,开展了一系列河流生态方面的理论研究和工程应用^[1]。目前随着以小水电为主的农村电气化计划的实施,以及小水电代燃料工程的全面展开,小水电的建设规模迅速扩大,而关于小水电站建设可能给河流生态系统带来的影响也逐渐引起了人们的关注^[2]。

电站引水坝的修建导致坝下河段很长一段距离内没有水流,严重破坏了河流生态系统的平衡。电站引水后到底要预留多少下泄水量以保持坝下河道生态系统的正常运转,至今没有比较准确的答案。目前,国外关于河道内生态需水的计算方法有很多,大致可以分为4类^[3,4]:(a)水文指标法(Hydrological Index Methods);(b)水力学法(Hydraulic Methods);(c)栖息地法(Habitat Methods);(d)整体分析法(Holistic Methods)。其中水文指标法又包括蒙大拿法、流量历时曲线法等方法;水力学法包括湿周法、R2CROSS法等;栖息地法包括有效宽度 UW 法、加权有效宽度 WUW 法、河道内流量增加法(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)等;整体分析法建立在尽量维持河流生态系统原始功能的原则之上,对整个生态系统的需水量,包括发源地、河道、河岸地带、洪积平原、地下水、沼泽和河口都进行评价。该类方法包括南非的建筑堆块法(Building Block Methodology, BBM)和澳大利亚的整体分析法。而国内关于河道内生态需水量的系统研究还处于起步探索阶段,运用较多的主要是水文指标法^[5]和水力学法^[6],而对于栖息地法的研究则主要集中在相关方法的探讨上^[7],鲜见具体的研究实例。本文通过研究香溪河一典型引水型电站——苍坪河电站引水坝上、下游河段底栖动物的加权可利用宽度(Weighted Usable Width, WUW),分析引水坝取水对下游被引水河段的影响,并计算河道内最小的生态需水量,为电站设计或改造时坝下最小下泄水流的大小提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域及断面设置

香溪河起源于华中第一高峰神农架,为三峡水库湖北库区的一条主要入库支流,其全长 94 km,流域面积 3099 km²,海拔落差 1540 m。古夫河、高岚河和九冲河是它的 3 条主要支流^[8]。在这些河流上,人们利用海拔落差沿河修建水电站发电。主要有两种电站,一种是蓄水型电站,另一种为引水型电站。引水型电站,通过在上游高海拔的河段修建一拦水坝,在下游低海拔的河段修建发电机房,拦水坝将河水通过引水渠或穿山隧道直接引向发电机房发电。目前在香溪河流域仅兴山县境内就有小水电站 40 多座,这对香溪河的河流生态系统产生了重要影响,如引水坝、引水渠及发电厂房的修建破坏了河道两岸植被状况,特别是坝的引水导致下游河段发生干涸,严重破坏了河流连续统。由于香溪河的水直接注入三峡水库,因此其生境状况及物种组成对三峡水库的生态环境有巨大的影响。苍坪河电站是香溪河干流上一典型的引水型电站,在拦水坝与电站厂房河段内没有支流汇入,利于开展相关的实验。针对该电站引水对河流的干扰设置了相应的 6 个断面进行调查研究(图 1)。断面编号为了与前期的文章^[9]不相混淆,新增的 3 个断面分别记为 6、7、8。其中断面 1 设在引水坝上游 200 m 左右,此处水量为正常的河流流量,河流状态也基本不受电站的影响,该点用于反映香溪河正常河段的水量状况并与坝下河段水量状况做对照。断面 6、7、8、4 是从坝下开始大约每隔 1 km 处设置的测量断面。坝下流量基本为零,但在断面 6 处,由于地下水补给及地表汇流,开始出现较为明显的水流。断面 5 位于电站的出水口下,水量恢复至坝上游正常流量水平。

1.2 现场指标测量

2005 年 12 月到 2006 年 5 月,进行了为期半年的逐月现场测量工作(其中 1 月份月中和月末分别测量了 1 次,而 4 月份由于偶发山洪,未能测量)。各样点断面位置用麦哲伦 GPS 315 定位。断面河宽用皮尺测量。由于河面不是很宽,每个断面都被分割成 3 部分,每部分按生境类型划分为浅滩、深流和深潭(有些生境较为单一则可能 3 个部分都属于其中的一种或两种),并对每部分的代表水深、流速、底质类型进行了测量和记录,其中流速于 0.6 倍水深处测量。河床底质类型则按 EPA 标准划分^[10],即石床(Bedrock,一整块石床)、漂石(Boulder, >256 mm)、卵石(Cobble, 64~256 mm)、砾石(Gravel, 2~64 mm)、砂(Sand, 0.06~2 mm)、粉沙(Silt, 0.004~0.06 mm)和粘土(Clay, <0.004 mm),人为估计各种底质的组成百分比。测量完成后再用

相机照取河流断面各个角度的情况作为以后分析的参考。

本文对底栖动物的 3 种主要类群蜉蝣目(Ephemeroptera)、襁翅目(Plecoptera)和毛翅目(Trichoptera)分别计算了加权可利用宽度。香溪河的主要底栖动物类群为蜉蝣目,详细的物种组成可参见 Qu 等的文章^[11],因此所得的结果基本能代表整个底栖动物群落的需水情况。

1.3 方法描述

目前仅依靠经验与专家判断确定水域栖息地品质的方式已经无法满足河流生境保育工作的要求,因此采用更为严谨的技术方法来反映河流的整治或水资源开发设施对水域栖息地的影响显得尤其必要。在众多生态需水量估算方法中栖息地法是最复杂同时也是最灵活的方法。栖息地法中又以河道内流量增量法最为常用。该方法将对象物种对栖息地流速、水深、底质及覆盖物的喜好性纳入考虑,将对象物种与流量的关系转换为流量与栖息地之间的关系。美国国家生态研究中心(National Ecology Research Center, NERC)于 1978 年开发了基于 IFIM 框架的物理栖息地模拟系统(Physical Habitat Simulation System, PHABSIM),用于其中微生境的水动力模拟与栖息地分析^[12]。

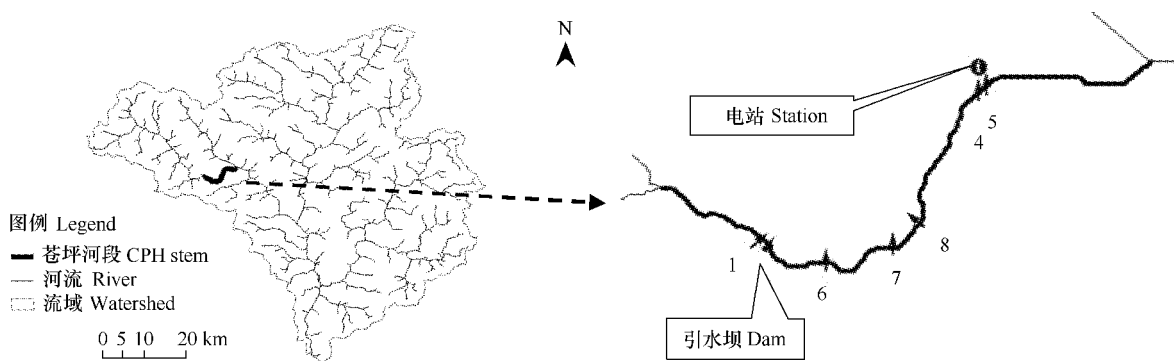


图 1 香溪河流域及苍坪河电站的 6 个断面位置示意图

Fig. 1 Xiangxi River basin and six cross sections of Cangpinghe (CPH) hydropower station

本文采用的加权可利用宽度法,其原理同样是基于河道内流量增量法的框架,与 PHABSIM 对栖息地的分析过程相似,是一种简化而更为灵活的方法。该方法不需考虑断面对研究河段的代表程度,即与所研究河段的长度无关,所得的也不是加权可利用面积,而是加权可利用宽度,这样避免了选取的断面对研究河段代表性有限的问题,同时也简化了 PHABSIM 模型所需输入的相当繁杂的数据资料。具体计算方法如下^[4,13]:

首先将河道断面分隔成间隔为 W 的 n 个部分,确定每个部分的平均垂直流速(V_i)、水深(D_i)和河床底质属性(C_i)等。然后分析指示物种或群落对这些参数的适宜性要求,绘制环境参数的舒适度曲线(Habitat Suitability Curve, HSC),根据该曲线确定横断面各分区的流速、水深和底质所对应的栖息地舒适度指数(Habitat Suitability Index, HSI),包括流速舒适度指数(f_v)、水深舒适度指数(f_d)和底质舒适度指数(f_c),其取值为 0~1 之间的值。最后,根据公式(1)计算每个断面、每个指示物种或群落的总生境舒适度河宽,将其称作加权可利用宽度(WUW)。

$$WUW = \sum F[f(V_i), f(D_i), f(C_i)] \times W_i \quad (1)$$

式中, W_i 为研究断面第 i 分区的断面宽度;而 $f(V_i)$ 、 $f(D_i)$ 和 $f(C_i)$ 分别为第 i 分区的流速、水深及河床底质的舒适度指数; $F[\]$ 为组合栖息地舒适度因子(combined suitability factor, CSF),一般采用几何平均法(Geometric Mean),即以此 3 种舒适度指数的几何平均为代表:

$$CSF = [f(V) \times f(D) \times f(C)]^{1/3}$$

重复计算各断面不同月份、不同流量下的 WUW,绘制成 WUW-流量曲线,然后根据一定的阈值,确定最小

生态需水量。

1.4 舒适度曲线的确定^[13,14]

利用栖息地法推求生态流量,最为关键的一步是对象物种或群落的舒适度曲线的建立。目前确定栖息地舒适度曲线的方法主要有:(1)专家观点或文献曲线 这种方法的舒适度曲线来自专家的观点或历史文献中的曲线,其费用少,节省时间。但该方法不是从数据中得到,缺乏一定的可靠性。(2)栖息地使用(utilization)曲线 该方法直接从对目标物种特定生命阶段的栖息地使用观察中得到,以测量的微生境特性的频率分布为基础。(3)栖息地偏好(preference)曲线 这种曲线给出使用栖息地和可用栖息地的组合,用来减少与环境可利用性相关的偏见。本研究中底栖动物的舒适度曲线借用了 Gore 等 2001 年的结果^[15],底栖动物三目舒适值通过对比图 2 获得。

2 结果分析

2.1 加权可利用宽度

流速、深度及底质 3 项指标几何平均后所得的综合指标的加权可利用宽度如图 3 所示。可以看出,在电站引水坝上及电站出水口下的两个水量正常的断面(1 和 5),其底栖动物各目的加权可利用宽度都明显高于引水坝下的断面(6、7、8 和 4)。方差分析表明 6 个断面间底栖动物各目的加权可利用宽度差异均显著($p < 0.05$)。且由两两比较可知,断面 1、断面 5 均与断面 6、7、8、4 差异显著,除襀翅目在断面 1 与断面 5 差异不显著外,蜉蝣目和毛翅目在断面 1 与断面 5 均差异显著(如图 3)。说明电站的引水使得坝下河段底栖动物各目的加权可利用宽度都发生了明显降低,另外电站出水口剧烈的水流冲刷也使得断面 5 相对于断面 1 的加权可利用宽度发生降低。

另外,从断面 6、7、8 看,随着断面离坝的距离增加,河道水量的不断增大,底栖动物各目的加权可利用宽度都逐渐增大。但断面 4 发生了略微下降,这可能与断面 4 处河道形状有很大的关系,这里的河道呈较为明显的 V 形,而其它几个断面皆为宽浅断面,因此此处的生境不太适合底栖动物的生存要求。

2.2 流量与加权可利用宽度的关系及生态流量的推估

对底栖动物蜉蝣目、襀翅目、毛翅目的加权可利用宽度与流量进行回归分析,回归结果如图 4 所示。湿周法中以湿周与流量曲线图上第一个明显转折点(inflection point)所对应的流量为最小生态需水量,它

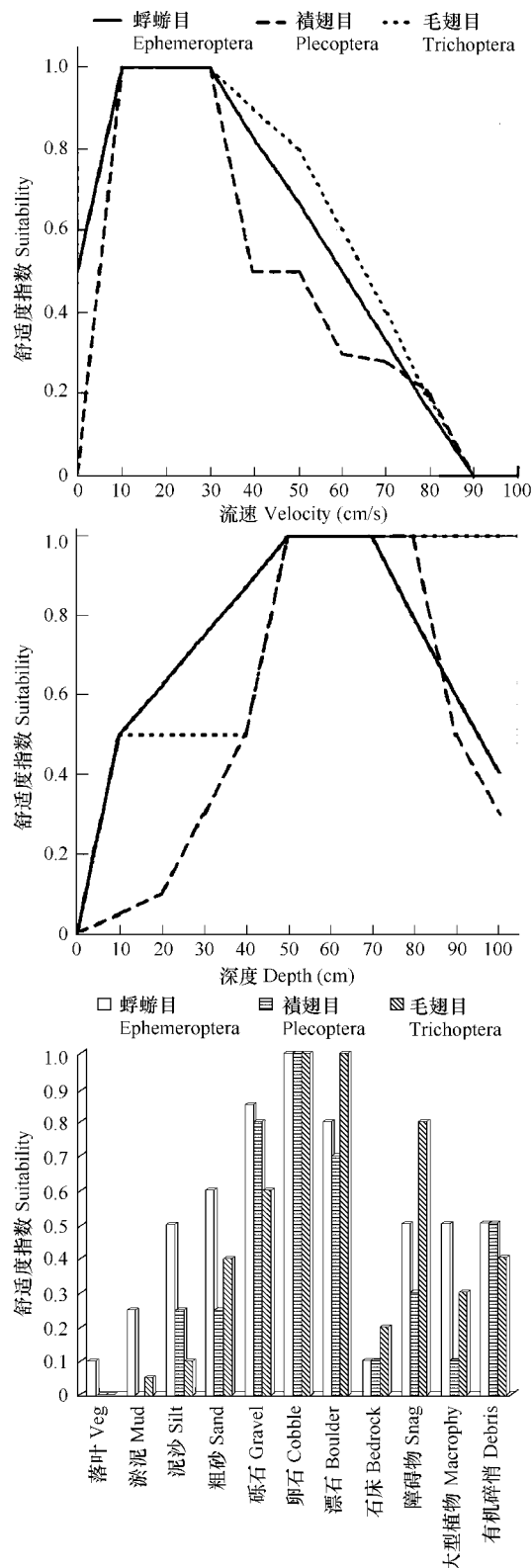


图2 蜉蝣目、襀翅目和毛翅目对流速、水深及底质的舒适度(改编自 Gore 等, 2001)

Fig. 2 Velocity, Depth and substrate suitability for Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera. (modified from Gore *et al.*, 2001)

表征在该处流量减少较小时湿周的减少会显著增大。该点在图中的曲率为 45° , 即曲线的斜率为 1^[3,16]。借鉴这一思路作为最小生态流量的判别标准。由图中可以看出蜉蝣目的第一个明显转折点, 其栖息地加权可利用宽度所对应的流量为 $3.8\text{m}^3/\text{s}$ 。襀翅目的第一个明显转折点, 其栖息地加权可利用宽度所对应的流量为 $3.1\text{m}^3/\text{s}$ 。毛翅目的第一个明显转折点, 其栖息地加权可利用宽度所对应的流量为 $3.4\text{m}^3/\text{s}$ (见表 1)。根据取大原则, 蜉蝣目所需的最小水量为保持香溪河底栖动物主要类群的最小生态需水量。

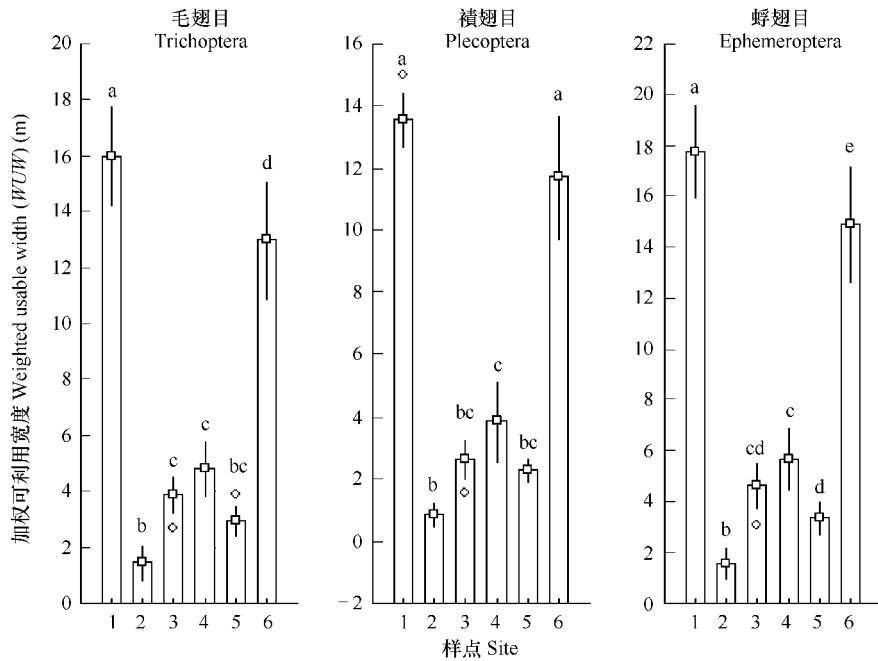


图 3 底栖动物蜉蝣目、襀翅目、毛翅目的加权可利用宽度在各断面的变动情况 (标有相同字母表示两者之间差异不显著)

Fig. 3 The variance of the weighted usable width (WUW) of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera on the different cross sections (The same letters mean the variation is not significant)

表 1 蜉蝣目 (EPH)、襀翅目 (PLE) 和毛翅目 (TRI) 的加权可利用宽度与流量的回归方程及推估的最小河道需水量

Table 1 The minimum water requirement and the regression models about WUW and discharge of Ephemeroptera (EPH), Plecoptera (PLE) and Trichoptera (TRI)

目 Order	公式 Function	r	p	最小需水量 Qmin (m ³ /s)
蜉蝣目 EPH	$WUW = 8.18 + 3.81 \times \ln(Q)$	0.83	<0.001	3.8
襀翅目 PLE	$WUW = 5.98 + 3.10 \times \ln(Q)$	0.85	<0.001	3.1
毛翅目 TRI	$WUW = 7.19 + 3.43 \times \ln(Q)$	0.85	<0.001	3.4

3 讨论

3.1 栖息地适宜性

栖息地适宜性指标定量描述一个物种的特定行为, 是 IFIM 法的生物学基础, 其模拟的真实性和准确性对于栖息地模拟的成功起着关键的作用。而本研究中所用的舒适度曲线为引用他人的结果, 虽然该结果是美国东南部一系列河流的研究结果 (历时 10a, 大约采集了 1200 个样点), 具有较强的代表性, 但这仍可能与香溪河底栖动物的实际情况有所差异。在今后的研究中, 若能构建适合香溪河使用的生境舒适度曲线, 然后再求加权可利用宽度, 其结果应该会更好。另外, 河道内生物需水在一年中并不是一个常量, 根据生物群落的繁殖和发育规律, 河道生物需水应同河道内水流年内变化特征一样, 是一个连续变化的过程。同样对于不同河流及不同的生物种类, 其生态方面的需求不同, 需水量也应不一样^[13,14]。这在研究中主要通过这些物种在不同的繁殖和发育季节舒适度曲线的不同来体现, 这就需要各物种的更为细致、更为精确的舒适度曲线。当然, 在本研究中, 考虑的重点是整个群落的大致生态需水情况, 因此并不要求非常精确的舒适度曲线。

另外,在计算组合栖息地舒适度因子时,采用的是几何平均数法,还有直接相乘法 and 取最小值法可供选择^[17]。但这些方法都没有考虑各个舒适度因子对不同底栖动物类群作用大小不同的影响。目前已有许多文章报道,在微生境因子中流速和底质是影响底栖动物群落结构的两个主要因子,而水深的作用相对较小^[18,19]。因此可以认为仅仅对这些因子的舒适度值做简单的相乘或取最小不能非常准确地反映出整个生境的舒适度情况,而对各个因子分配以适当的权重再进行组合计算应该更为合理。

3.2 河道自然形状的影响

从整个计算过程看,河道自然形状的不同对生境可利用栖息地的计算有一定的影响。在相同水量下不同河道形状的断面会有不同的生境舒适度值。如在本实验中,断面4的加权可利用宽度反而比断面7和8小,这可能与河道形状呈较为明显的V字形有关,其它断面基本为宽浅断面。如何处理这个问题,目前还没有很好的办法。IFIM法在生境模拟时假定河床形状在模拟的河段中保持不变^[4],这就需要研究者在选取断面时仔细考察整个河段的河道情况,选取对整个河段有代表性的断面,但这依然没有消除断面形状产生的误差。而其它生态需水量的推算方法如湿周法、R2CROSS法等都只是对宽浅河流比较适用^[3,4]。因此如何消除河道自然形状的影响还有待更进一步的研究,而将河道的自然形状作为一个生境状况评估因子也许是一个不错的方式。目前已有将河道形态按蜿蜒度(Sinuosity)、演化程度(Development)、渠道化(Channelization)、河岸稳定度(Stability)等进行定量评估^[20]。

3.3 确定最小生态需水量的阈值问题

IFIM法给出的是一理论体系框架,通过模拟物种可利用栖息地面积和流量之间的关系,为水资源规划提供依据。它本身并不产生特定的河道内所需的最小流量值,其值最终是通过用水各方的协商以及水资源管理部门的综合考虑确定^[17]。在本文中,生态基准流量的确定借鉴了湿周法的确定方式,即以流量与WUW的关系配合曲线转折点的数学认定确定。这是一种可行的方法,但这样确定的流量尚缺乏生物学依据,特别是从对单个物种的保护学观点来看,这种流量确定方法有些武断。因此在获得流量与WUW的关系的同时如何界定流量的阈值,即某种生物所需的WUW的阈值还需要生物学家对该生物的生理特点进行更进一步的研究。另外,在实际用水的执行过程中还必须同时考虑维持电站运行的用水需求,即维持生态系统服务价值与经济价值的一种平衡^[21]。

References:

- [1] Wang X Q, Zhang Y, Liu C M. A theoretical discussion of ecological and environmental water requirements of river course. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 240—246.
- [2] Fan J H, Liu Q, Ma Z L, et al. Environmental Impact of Hydropower Development in the Upper Reaches of Minjiang River. *Sichuan Environment*, 2006, 25(1): 23—27.

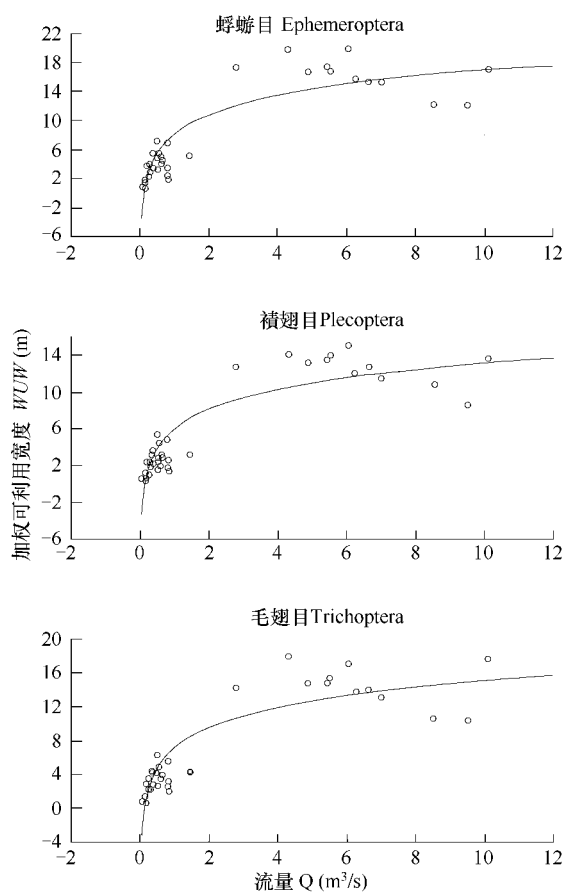


图4 底栖动物三目的加权可利用宽度与流量关系图

Fig. 4 Relationship between WUW and discharge of three orders of macroinvertebrate

- [3] Zhong H P, Liu H, Geng L H, *et al.* Review of assessment methods for instream ecological flow requirements. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 430—434.
- [4] Yang Z F, Zhang Y. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(3): 294—301.
- [5] Men B H, Liu C M, Xia J, *et al.* Estimating and Evaluating on Minimum Ecological Flow of Western Route Project of China's South-to-North Water Transfer Scheme for Water Exporting Rivers. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(5): 135—138.
- [6] Liu S X, Mo X G, Xia J, *et al.* Uncertainty Analysis in Estimating the Minimum Ecological Instream Flow Requirements via Wetted Perimeter Method: Curvature Technique or Slope Technique. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 273—281.
- [7] Wang X Q, Liu C M, Yang Z F. Research advance in ecological water demand and environmental water demand. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 507—514.
- [8] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345—352.
- [9] Fu X C, Tang T, Jiang W X, *et al.* Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 45—52.
- [10] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish (second edition). Vol. EPA 841-B-99-002. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [11] Qu X D, Tang T, Xie Z C, *et al.* Distribution of macroinvertebrates in the Xiangxi River System and their relationship with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(2): 233—238.
- [12] Stalnaker C B, Lamb B L, Henriksen J, *et al.* The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM. Washington, DC: U. S. Geological Survey. Biological Report 29, 1995. 45.
- [13] Midcontinent Ecological Science Center. PHABSIM for windows manual and exercise. U. S. Geological Survey, USGS, 2001.
- [14] Bovee K D, Lamb B L, Bartholow J M, *et al.* Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Fort Collins, CO: U. S. Geological Survey-BRD. Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-1998-0004, 1998. 13.
- [15] Gore J A, Layzer J B, Mead J. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: a role in stream management and restoration. *Regulated Rivers: Research and Management*, 2001, 17, 527—542.
- [16] Ji L N, Liu S X, Lu H X, *et al.* Theoretical study of minimum instream flow requirement using the wetted perimeter method. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, 34(2): 124—130.
- [17] Ying X M, Li L. Review on Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) and applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1567—1573.
- [18] Brooks A J, Haeusler T, Reinfelds I, *et al.* Hydraulic microhabitats and the distribution of macroinvertebrate assemblages in riffles. *Freshwater Biology*, 2005, 50: 331—344.
- [19] Jowett I, Richardson J. Microhabitats of benthic invertebrates in a New Zealand river and the development of in-stream flow-habitat models for *Deleatidium* spp. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1990, 24: 19—30.
- [20] State of Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water. Methods for Assessing Habitat in Flowing Waters: Using the Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI). OHIO EPA Technical Bulletin EAS/2006-06-1, 2006.
- [21] Cai Q H, Tang T, Liu J K. Several research hotspots in river ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1573—1577.

参考文献:

- [1] 王西琴,张远,刘昌明.河道生态及环境需水理论探讨. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 240~246.
- [2] 范继辉,期刘巧,麻泽龙,等.岷江上游水电开发对环境的影响. *四川环境*, 2006, 25(1): 23~27.
- [3] 钟华平,刘恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述. *水科学进展*, 2006, 17(3): 430~434.
- [4] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(3): 294~301.
- [5] 门宝辉,刘昌明,夏军,等.南水北调西线一期工程河道最小生态径流的估算与评价. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 135~138.
- [6] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等.用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较. *地理学报*, 2006, 61(3): 273~281.
- [7] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻. *水科学进展*, 2002, 13(4): 507~514.
- [9] 傅小城,唐涛,蒋万祥,等.引水型电站对河流底栖动物群落结构的影响. *生态学报*, 2008, 28(1): 45~52.
- [16] 吉利娜,刘苏峡,吕宏兴,等.湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2): 124~130.
- [17] 英晓明,李凌.河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用. *生态学报*, 2006, 26(5): 1567~1573.
- [21] 蔡庆华,唐涛,刘建康.河流生态学研究中的几个热点问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1573~1577.