

河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述

杨 宇¹, 严忠民¹, 乔 晔²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079)

摘要 为了对鱼类栖息地水力学环境进行准确、全面的描述, 回顾了鱼类栖息地水力学问题的研究历史. 根据特征量描述对象的不同, 将用来描述栖息地特征的水力学变量划分为水流特征量、河道特征量、无量纲量和复杂流态特征量. 在总结前人研究成果的基础上进一步对各特征量获得方法、使用范围进行评述.

关键词 鱼类栖息地 生态水力学 鱼类资源保护 流场空间描述

中图分类号 X171 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)02-0125-06

栖息地通常指某种生物或某个生态群体生存繁衍的地域或环境类型. 广义上讲, 栖息地概念中不但包含了生物的生存空间, 同时也包含了生存空间中的全部环境因子, 如气候、河流等. 对鱼类而言, 其栖息地包括其完成全部生活史过程所必需的水域范围, 如产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生活史阶段水域的洄游通道等. 也就是说, 河流鱼类栖息地不仅提供鱼类的生存空间, 同时还提供满足鱼类生存、生长、繁殖的全部环境因子, 如水温、地形、流速、pH 值、饵料生物等都是栖息地的组成部分. 鱼类栖息地水力学实际上就是研究产卵场、索饵场、越冬场及其洄游通道的水力学特征. 由于环境的退化, 鱼类栖息地受到的威胁越来越严重^[1]. 通过对鱼类栖息地水力学特征的研究, 寻找满足鱼类生存和繁殖的水力学环境是当前生态水力学研究的重要课题. 本文将表征鱼类栖息地水力学条件的特征量进行详细的分类评述, 为研究者选择所需特征量提供依据.

1 鱼类栖息地水力学条件研究概述

对于河流中鱼类栖息地, 通常从两个角度来研究, 其一是鱼类栖息地在河流各个位置的分布, 其二是分布在河流不同位置的栖息地受到的局部水流作用. 前者是宏观的, 属于河流形态学和生物种群地理学研究领域; 而后者是微观的, 属于水力学和栖息地环境研究范畴. 前者是后者的宏观表现, 而后者是前者的动力学基础.

在宏观尺度上, 河道是一个线性系统, 其环境条件、无脊椎动物和鱼群的分布具有明显的纵向梯度^[2]. 对于不同的鱼类和同种鱼类生活史的不同阶段来说, 它们占据河流的不同生物区. 对洄游鱼类而言, 河流的纵向是到达产卵地的基本途径, 如鲟形目^[3]和鲑、鳟科的鱼类. 对非洄游性鱼类, 如鲤科鱼类, 则不同的发育期分布于水系横断面上的不同位置^[4]. 20 世纪中叶有很多学者提出了河流的纵向带状分布. 1963 年 Illies 等^[5]提出了著名的鱼类分区结构. 1975 年 Hawkes^[6]对河流生物分布带与分类进行了总结. 通过对欧洲和北美不同区域的调查证明了不同区域有特定的鱼类. 作为一些鱼类的饵料, 无脊椎动物的分布^[7]也对鱼类的分区造成重要影响. 除了鱼类在河流中的带状分布特点以外, 从源头到入海口在大多数情况下鱼类的种类是递增的. Fremling 等^[8]研究发现在密西西比河从源头到河口三角洲鱼的种类递增. Horwitz 在对美国 15 条河流进行对比后指出, 种类与河流等级之间存在着直接联系^[9]. 在欧洲, Blachuta 等^[10]指出, 种类数量和河流等级之间也存在着正相关.

在微观尺度上, 20 世纪 80 年代开始了对栖息地微观尺度的理论研究, Kemp 等^[11]提出以生态学定义的功能性栖息地(functional habitats)和以水力学定义的水力栖息地(flow biotopes)的基本概念, 并试图寻找连接生态学和流体力学之间的结合点. 很多学者借助建立的栖息地性能曲线, 研究功能性栖息地与水流参数的关

系^[12-14]. Statzner 等在世界范围内对无脊椎动物所受的环境影响进行研究,结果表明,无脊椎动物的分布与河道内水力条件(in-stream hydraulics)有关. Barmuta^[15]以河段为尺度,研究以底泥质定义(substrate-defined)的栖息地,并量测了流速、水深、含氧量、温度等多种理化数据,提出在侵蚀型(erosional)和沉积型(depositional)栖息地之间,种群结构有一个渐变的过程.

综上所述,水力学条件与栖息地之间的关系,主要表现在直接作用和间接作用两方面. 对于直接作用而言,一些鱼类生命周期中有部分或者全部生命阶段依靠某种特定的水力学条件,如四大家鱼产卵的发生和水位的涨落有明显的相关性^[4],趋流性的鱼类要靠流速的存在和大小来判断游泳甚至洄游的路线. 而水力学条件对栖息地的间接作用更加广泛,不仅影响栖息地的含氧量、温度、饵料情况,而且还影响栖息地的地形,而被改变的地形对水力学条件又有反作用,这正是一些栖息地位置发生变化的原因之一.

2 表征栖息地水力学条件的特征量

根据各特征量描述对象的不同,可以将表征河流栖息地水力学条件的特征量分为 4 种类型,第 1 类是描述水流运动的量,如流速等. 第 2 类是描述河道形态的量,如水深、湿周等. 第 3 类是工程水力学中常用的无量纲量,如弗劳德数(Froude)、雷诺数(Reynolds)等. 这 3 类特征量见表 1. 第 4 类是通过流体力学的相关方程导出的,用来描述水流复杂状况的特征量,主要包括 Crowder 和 Diplas 提出的用来描述栖息地水流复杂程度的 4 个特征量,见表 2. 动能梯度 M_1 表示的是 2 个近距离空间点之间由于流速不同产生的动能梯度. 该值越大说明流态越紊乱. 动能梯度增率 M_2 表示的是单位质量的物体从流速较低点到流速较高点,每移动单位距离所耗费的能量与原来位置处动能的比,也与流态的紊动程度正相关. 垂直涡强度 M_3 和水平涡强度 M_4 都是用来统计一定范围内出现的小涡的频率. 其数值越大体现流场中的漩涡越多,也就是流场越紊乱.

表 1 常见的描述鱼类栖息地的水动力学量

Table 1 Hydrodynamic variables for description of fish habitats

	名称	天然河流中一般情况下 常见实测值范围	数学表示	注释	矢量 标量	应用于
水流特征量	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0~5.0	实测基本量	标量用来与鱼的感应流速、喜好流速和极限流速比较,矢量用来描述流场散乱程度	矢量或 标量	单点
	流速梯度/(s^{-1})	0~5.0	$\frac{ v_1-v_2 }{\Delta s}$	用以描述流场的散乱程度	标量	单点
	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		实测基本量,多种水文方法确定	与时间序列结合,反映栖息地空间随时间的变化	标量	断面
	含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		实测基本量	对黏性鱼卵的附着有影响	标量	断面
河道特征量	水深/m	0~50	实测基本量	水面到河床的距离	标量	单点
	底质类型	卵石、砾石、砂、细沙、泥	采样	影响底栖生物分布和鱼类对产卵场的选择	标量	区域
	湿周/m		实测断面	过水断面与固体边界和气体边界交界线的长度	标量	断面
无量纲量	弗劳德数		$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$	无量纲的量,反映水深和流速的共同影响	标量	单点
	雷诺数		$Re = \frac{Ud}{\nu}$	无量纲的量,反映流速和某一特征长度共同的影响	标量	单点

3 特征量评述

3.1 水流特征量

绝大多数鱼类都有趋流特性,因此流速在栖息地水力学特征中占有重要地位. Barmuta^[17]在关于卵石底质和流速共同作用的研究中,发现流速是最有影响的环境变量. Semperki 等^[18]调查了法国 Pollon 河和 Suran 河的河鲢(Grayling)产卵场,发现两处产卵场流速相近,说明河鲢对产卵场的流速是有选择的. 很多研究都表明,鱼类大多数生态行为都与流速密切相关^[19],甚至有些鱼类由于不同的流速会使其外表形态发生改变^[20]. 为了修建葛洲坝水利枢纽,1979 年曾在南京水利科学研究所进行过中华鲟克流试验. 试验结果表明,中华鲟对流速有一定的选择范围. 20 世纪 80 年代初南京水利科学研究所在进行鱼道研究工作期间也相应进行了大量的鱼类趋流实验^[21].

表 2 河流栖息地中描述水流复杂程度的特征量^[16]

Table 2 Variables for description of flow complexity of riverine habitats

特征量	含义	一般情况下 实测值范围	物理意义	数学定义	应用于	差分形式
M_1	单位距离 单位质量 空间动能 梯度	$0 \sim 0.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	正比于作用在生 物体上的拉力, 度量从一个位置 到另一个位置耗 费的能量	$\frac{\partial V^2}{\partial s}$	单点	$\bar{V} \left \frac{V_2 - V_1}{\Delta s} \right $
M_2	M_1 除以较低 流速点的动能	$0.9 \sim 1.3 \text{ m}^{-1}$	度量一个生物 从流速较低位 置到较高位置 需要消耗的额 外能量	$\frac{\frac{\partial V^2}{\partial s}}{\frac{V^2}{2}}$	单点	$2\bar{V} \left(\frac{\left \frac{V_2 - V_1}{\Delta s} \right }{\frac{V_{\min}^2}{2}} \right)$
M_3	与河道垂直 的横断面上 旋度的加权 平均值	$0.2 \sim 1.0 \text{ s}^{-1}$	度量涡的强度 和频次以及其 他复杂流态	$\frac{\int_s \xi \Delta A}{A_{\text{TOT}}} \quad M_3, \xi = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \hat{i}$	区域	$\frac{\sum \left \left(\frac{\Delta w}{\Delta y} - \frac{\Delta v}{\Delta z} \right) \right g \Delta y g \Delta z}{\sum \Delta y g \Delta z}$
M_4	水平面上旋 度的加权平 均值	$0.001 \sim 0.200 \text{ s}^{-1}$	度量涡的强度 和频次以及其 他复杂流态	$\frac{\int_s \xi \Delta A}{A_{\text{TOT}}} \quad M_4, \xi = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{k}$	区域	$\frac{\sum \left \left(\frac{\Delta v}{\Delta x} - \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) \right g \Delta x g \Delta y}{\sum \Delta x g \Delta y}$

注 4 个特征量均为标量。

由于测得的流速是在连续流体中的离散采样. 为了描绘流速的空间变化, 可以通过流速计算流速梯度. Biggs 等^[22]在进行河流中附着生物的研究时, 认为流速梯度在营养物质的掺混中有重要作用。

流量是一个宏观量, 在更多的时候人们关心的是流量的时间过程, 具体而言是其他特征随流量的变化, 如 Booker 等^[23]在通过三维数值模拟进行栖息地流场模拟时指出, 在流量增加的情况下, 近河床的流速和切应力在浅滩处减小, 在深槽处增加. 也有的研究者直接考虑流量和生物行为之间的关系, 危起伟^[24]在分析中华鲟产卵与流量关系时认为, 中华鲟产卵一般都发生在退水阶段。

含沙量主要在三方面影响栖息在河流中的鱼类: (a) 含沙量影响下游河床的冲刷或者淤积, 改变河道的形态. (b) 含沙量会改变产卵场中黏性卵的着床率. 当含沙量较低而流速较高时可以带走下游产卵场中的泥沙, 有利于产卵场的清理; 反之会降低黏性卵的着床率. (c) 悬移质含沙量会影响栖息地饵料的组成, Thorp 等^[25]在对美国干旱地区 5 条河流进行研究后指出, 轮虫等饵料生物的数量和分布明显受到悬移质含沙量的影响。

3.2 河道特征量

事实上, 水深是一定的水位与河道地形相叠加的结果. 不同鱼类对水深的选择在文献中有大量的记载^[26]. 通常水深主要在两方面影响鱼类: 一方面是为底栖型鱼类提供适当的活动空间; 另一方面是为沉性卵提供适当的孵化环境. 研究资料表明, 作为底栖型鱼类的中华鲟在葛洲坝下游产卵场主要的分布水深范围为 8 ~ 14 m, 很少发现中华鲟出现在超过 19 m 水深处. 张燕萍等^[27]对水深与黄鳝受精卵孵化率之间的关系进行了研究, 指出水深 2 cm 时, 孵化率最高。

底质类型在很大程度上影响产沉性卵的鱼类对产卵场的选择. Sempeski 等^[18]通过对法国 2 条河鲮鱼产卵场的调查, 得出鲮鱼产卵场的底质为卵石和砾石. Kondolf^[28]建议要在改进产卵场的工程中评估河床底质粒径。

湿周主要用在河道湿周法和 R2Cross 法 2 种估计栖息地流量的方法上. 湿周法假设在浅滩急流环境下, 鱼的栖息地和湿周有直接的关系, 用湿周法来度量超过一定流量范围的水生栖息地的有效面积. 湿周法基于湿周和流量关系曲线. 来决定保护栖息地所需的流量^[29]. R2Cross 法是沿着河流选择一个临界浅滩, 并且假定在浅滩处选择的流量可以满足鱼类和其他生物在深槽附近大多数生命阶段的需要. 临界浅滩处主要考虑平均水深、平均流速和湿周 3 个水力学参数的取值. 湿周法和 R2Cross 法需要浅滩区详细的物理和水力学数据. 如, 河道型式、一定流量下的平均流速和平均水深. 其优点是两者数据来源都基于现场观测, 不需要水文站数据, 但是选择合适的浅滩很重要, 不同的浅滩会得到不同的适应流量^[29]。

3.3 无量纲量

Moir 等^[30]在对苏格兰大西洋鲑产卵场的水力学和沉积特性进行研究时指出, 以水深、流速和弗劳德数

为代表的局部水力学变量越来越重要.认为弗劳德数是一个有用的单值水力栖息地描述量,作为无量纲数它可以用来在不同的河流和鱼类之间进行比较. Milner 等^[31]在对欧洲河流中大型水生底栖动物进行研究时使用了包含弗劳德数的通用附加模型(Generalized Additive Model),并认为包括弗劳德数在内的几项指标可以解释河流间 79% 的物种丰度差别.

Lamoureux 等^[32]在从栖息地条件预测种群特征时指出,综合的种群结构指标与弗劳德数和雷诺数等简单独立的水力学特征量相联系,并对综合的种群结构指标进行了良好的预测.这些指标能解释水力学、地形、流量和种群结构之间的关系. Lamoureux 等在对大河的栖息地模型结果进行预测时,使用雷诺数和弗劳德数分别表示河流内和河流间有效栖息地的变化. Baumgartner 等^[33]研究了维也纳附近的真蜉幼体在河流各级支流的纵向分布,也将雷诺数和弗劳德数作为考查指标.

3.4 其他特征量

Crowder 等^[16]提出了用来描述水流复杂程度的栖息地特征量,见表 2. Crowder 等^[16]认为,由于复杂的河道地形,大石、沉水障碍、曲流等的存在,形成了复杂流态.这些流态存在于多种空间尺度中,为很多水生生物提供栖息地.通过简单的流速、水深等水力学特征量不能充分刻画水流的空间特性.

对于由复杂地形造成的局部能量梯度,由大石、河岸等造成的流速遮蔽等是水生栖息地的基本组成.在二维数值模拟的基础上, Crowder 等^[16]提出了用特征量 M_1, M_2 表示栖息地流态的空间描述方法量化局部流速梯度和动能变化.

Crowder 等^[16]用 2 个特征量对不同的位置进行评价得出,空间流态变化明显的位置特征量值较大,而在空间流态趋向统一的位置特征量值较小. Crowder 等^[16]通过比较其他研究者的野外数据得出,鱼类休息和进食位置分别显示不同的特征量.同时 Crowder 等^[16]指出,由水流速率和动能改变,栖息地特征量也可以被整合进生物能量模型,用来计算鱼类的能量消耗率.进一步地,基于详细河道地形的二维水力学模拟, Crowder^[34]发展涡(单点量)和环流(区域量)成为量化空间流动特征的量.他通过涡和环流对一个鱼类栖息地区域进行计算得出,涡量在单一流动区域值较小,在复杂流动区域值较大.而环量值在完全不同的区域里围绕一个固定值变化.同时 Crowder 等^[34]用环流量来量化鲑卵所在处的水流复杂程度,进而发展了旋度频率的表示 M_3, M_4 .

4 结 语

为了了解影响鱼类行为的水力学因素,研究者不但分析鱼类行为与常规水力学量之间的关系,而且还构建了一些新的特征量对鱼类栖息地水流特征进行量化描述.对于鱼类而言,贯穿其生活史中的主要行为包括巡游、避害、索饵以及繁殖.不同的特征量所描述的侧重点不同.对于不同鱼类的生命阶段及生活行为应该选择合适的特征量进行分析.例如对于体外受精的鱼类,在繁殖过程中通常会选择水流紊乱程度较高的区域进行交配行为,甚至只有在水流达到一定的紊乱程度才会刺激交配行为的产生,而在产卵前后可能会停留在相对平静的水域休息.

在进一步研究鱼类栖息地水力学特征的过程中,还需要通过统计学手段,如线性回归、对数回归等寻找特征量与鱼类行为的内在规律,用来预测无生命组分或生命组分对鱼类种群的影响,进一步了解鱼类种群和栖息地的关系,量化鱼类种群对栖息地的需求^[35].

参考文献:

- [1] INGRAM B, SUNGAN S, GOOLEY G, et al. Induced spawning, larval development and rearing of two indigenous Malaysian mahseer, *Tor tambroides* and *T. douronensis* [J]. *Aquaculture Research*, 2005, 36(10): 983-995.
- [2] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989: 177-179.
- [3] BEMIS W E, KYNARD B. Sturgeon rivers: an introduction to acipenseriform biogeography and life history [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1997, 48(1/4): 167-183.
- [4] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩亮. 长江干流草、青、鲢、鳙四大家鱼产卵场的分布、规模和自然条件[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988.
- [5] ILLIES J, BOTOSEANU L. Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout

- du point de vue faunistique[M]. Stuttgart Science Publishers,1963 357.
- [6] HAWKES H. River zonation and classification[M]. Oxford Blackwell Scientific Publications,1975 312-374.
- [7] CRESPIEN DE B V,USSEGLIO-POLATERA P. Traits of brown trout prey in relation to habitat characteristics and benthic invertebrate communities[J]. Journal of Fish Biology,2002,60(3) 787-714.
- [8] FREMLING C R,RASMUSSEN J L,SPARKS R E,et al. Mississippi river fisheries :A case history[C]//Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science 106 Proceedings of the International Large River Symposium. Ottawa Department of Fisheries and Oceans, 1989.
- [9] DETENBECK N E,ELONEN C M,TAYLOR D L,et al. Effects of hydrogeomorphic region,catchment storage and mature forest on baseflow and snowmelt stream water quality in second-order Lake Superior Basin tributaries[J]. Freshwater Biology,2003,48(5) 912-927.
- [10] BLACHUTA J,WITKOWSKI A. The longitudinal changes of fish community,in the Nysa Kłodzka River (Sudety Mountains) in relation to stream order[J]. Polskie Archiwum Hydrobiologii/Polish Archives of Hydrobiology,1990,38(1/2) 235-242.
- [11] KEMP J L,HARPER D M,CROSA G A. Use of ' functional habitats ' to link ecology with morphology and hydrology in river rehabilitation[J]. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems,1999,9(1) 159-178.
- [12] SCRUTON D A,HEGGENES J,VALENTIN S,et al. Field sampling design and spatial scale in habitat-hydraulic modelling :comparison of three models[J]. Fisheries Management and Ecology,1998,5(3) 225-240.
- [13] NYKANEN M,HUUSKO A. Suitability criteria for spawning habitat of riverine European grayling[J]. Journal of Fish Biology,2002,60(5) 1351-1354.
- [14] VILIZZI L,COPP G H,ROUSSEL J-M. Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use[J]. River Research and Applications,2004,20(5) 605-618.
- [15] BARMUTA L. Habitat patchiness and macrobenthic community structure in an upland stream in Temperate Victoria,Australia[J]. Freshwater Biology FWBLAB,1989,21(2) 223-236.
- [16] CROWDER D W,DIPLAS P. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2000,57(7) 1497-1507.
- [17] BARMUTA L. Interaction between the effects of Substratum,Velocity and location on Stream Benthos :and experiment[J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research,1990,41(5) 557-573.
- [18] SEMPESKI P,GAUDIN P. Habitat selection by grayling. Spawning habitats[J]. Journal of Fish Biology,1995,47(2) 256-265.
- [19] 何大仁,蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门 厦门大学出版社,1998 388-389.
- [20] IMRE I,MCLAUGHLIN R L,NOAKES D L G. Phenotypic plasticity in brook charr :changes in caudal fin induced by water flow[J]. Journal of Fish Biology,2002,61(5) 1171-1181.
- [21] 南京水利科学研究所. 鱼道[M]. 南京 电力工业出版社,1982 278-279.
- [22] BIGGS B J F,GORING D G,NIKORA V I. Subidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form[J]. Journal of Phycology,1998,34(4) 598-607.
- [23] BOOKER D J,SEAR D A,PAYNE A J. Modelling three-dimensional flow structures and patterns of boundary shear stress in a natural pool-riffle sequence[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2001,26(5) 553-576.
- [24] 危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学 with 资源评估[D]. 武汉 中国科学院,2003.
- [25] THORP J H,MANTOVANI S. Zooplankton of turbid and hydrologically dynamic prairie rivers[J]. Freshwater Biology,2005,50(9) 1474-1491.
- [26] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京 中国农业出版社,1995.
- [27] 张燕萍,周秋白,吴小波. 水深对黄鳝受精卵孵化率的影响[J]. 水产科技情报,2005,32(6) 243-245.
- [28] KONDOLF G M. Some suggested guidelines for geomorphic aspects of anadromous salmonid habitat restoration proposals[J]. Restoration Ecology,2000,8(1) 48-56.
- [29] PARKER G W,ARMSTRONG D S. Preliminary assessment of streamflow requirements for habitat protection for selected sites on the assabet and charles rivers,Eastern Massachusetts[R]. Northborough U S Department of the Interior U S Geological Survey,2001 42.
- [30] MOIR H J,SOULSBY C,YOUNGSON A. Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Gironck Burn,Scotland[J]. Fisheries Management and Ecology,1998,5(3) 241-254.
- [31] MILNER A M,BRITTAIN J E,CASTELLA E,et al. Trends of macroinvertebrate community structure in glacier-fed rivers in relation to environmental conditions :a synthesis[J]. Freshwater Biology,2001,46(12) 1833-1847.
- [32] LAMOUROUX N,OLIVIER J M,PERSAT H,et al. Predicting community characteristics from habitat conditions :fluvial fish and

hydraulics[J]. Freshwater Biology,1999,42(2) 275-299.

[33] BAUMGARTNER N, WARINGER A, WARINGER J. Hydraulic microdistribution patterns of larval fire salamanders (*Salamandra salamandra salamandra*) in the Weidlingbach near Vienna, Austria[J]. Freshwater Biology,1999,41(1) 31-41.

[34] CROWDER D W, DIPLAS P. Vorticity and circulation :spatial metrics for evaluating flow complexity in stream habitats[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2000,59(4) 633-645.

[35] AHMADI-NEDUSHAN B, ST-HILAIRE A, BÉRUBÉ M, et al. A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment[J]. River Research and Applications,2006,22(5) 503-523.

Description and review of hydraulic conditions of fish habitats

YANG Yu¹, YAN Zhong-min¹, QIAO Ye²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Institute of Hydroecology of MWR and CAS, Wuhan 430079, China)

Abstract The study on the hydraulic problems about fish habitats was reviewed. According to different objectives, the hydraulic variables to describe the characteristics of fish habitats were divided into flow variables, channel variables, dimensionless variables, and complex flow variables. Based on the former achievements, the methods for obtaining each characteristic variable and the ranges of their application were summarized.

Key words fish habitat ; ecohydraulics ; protection of fish resources ; spatial flow feature

欢迎订阅 2007 年《水资源保护》
全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是河海大学和环境水利研究会主办的科学技术期刊,1985 年创刊,国内统一连续出版物号 CN32-1356/TV,现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊,国内外公开发行。

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究,应用技术,工程措施,综合述评,专题讲座,国外动态,书刊评介,科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制等方面的文章。近年来,重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容。

主要读者对象 全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校的师生。

《水资源保护》邮发代号 28-298,双月刊,8 元/期,全年 48 元,每逢单月 30 日出版。请向当地邮局订购,若无法从邮局订阅,亦可与编辑部联系索取征订单。

地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部
电话 :(025)83786642 传真 :(025)83786642
电子信箱 bh@hhu.edu.cn