

河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用

英晓明¹, 李凌^{1,2}

(1. 河海大学, 水生态环境模拟中心, 南京 210098; 2. School of Engineering, The University of Queensland, St Lucia, QLD4172 Australia)

摘要:河道内流量增加方法 IFIM 是用于河流规划、保护和管理等的决策支持体系, 由一系列水力、水质、水文、生态等专业模型和各类方法组成, 模拟流量和水生生物栖息地可利用性之间的定量关系。它不仅有助于河流管理者对水资源进行科学合理的分配, 也为河流生态修复的结果提供了有效的评估工具。该方法在国外有着广泛的应用, 而在国内尚未见其应用。对此方法进行详细的阐述, 给出国外应用的例子。最后指出在国内应用的前景和需要注意的问题。

关键词: IFIM; 生态环境需水; 栖息地; 模拟; 生态修复评价

文章编号: 1000-0933(2006)05-1567-07 **中图分类号:** P33, X171.1 **文献标识码:** A

Review on Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) and applications

YING Xiao-Ming¹, LI Ling^{1,2} (1. Center for Eco-Environmental Modelling, Hohai University, Nanjing 210098; 2. School of Engineering, The University of Queensland, St Lucia, QLD4172 Australia). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1567 ~ 1573.

Abstract: Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) has been developed to assist decision-making in river system planning, protection and management. The methodology consists of a series of hydraulics, water quality, hydrology and ecology models as well as various methods for simulating quantitative relationships between the discharge and habitat availability. This method provides not only a scientific basis for rational allocation of water resources but also an effective means for evaluating programs of river ecological restoration. While the method has been utilized widely overseas, its application in China has not been reported. This paper introduces the method in detail and illustrates its application based on an example. Finally the paper discusses the prospect of the method's application in China and problems that may need to be addressed.

Key words: IFIM; eco-environmental water demand; physical habitat; modeling; ecology restoration evaluation

随着社会和经济的发展, 人们逐渐意识到健康河流生态系统的重要性。围绕恢复和维持健康的河流生态系统, 开展了一系列河流生态方面的理论研究和工程应用。人们不再只考虑生产用水和生活用水, 开始重视生态用水; 为恢复生物多样性, 开始河道生态修复, 重现生境的多样性。早期研究生态环境需水量的相关方法有水文学方法和水力学方法等, 其中蒙大拿方法由于简单实用, 成为美国第2种最常使用的方法^[1]。水文学方法和水力学方法提供了最小需水量(minimum flow), 当天然来流量低于这个值时, 不允许其它方面的用水。最小流量存在一个严重问题, 当水用户对他们的需要作增加的评估时, 例如, 一个灌溉区域, 能计划到灌溉面积任何增加的水量需要, 但生物学家却不能对不同灌溉面积情形下增加的水量对河流生态的影响做出评价^[2]。在干旱时期, 最小河道内流量并不能提供河流资源充分的保护, 在丰水时期, 它也不能为有最佳的鱼种数量创造机会^[3]。因此, 需要一种能够量化河道内流量增加变化带来的影响并能评价水资源分配的方法。

1 IFIM 方法的来源

在20世纪70年代末, 美国鱼类和生物服务调查中心(US Fish and Wildlife Service)构思和开发了河道内流

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50425926)

收稿日期: 2005-06-16; **修订日期:** 2006-03-10

作者简介: 英晓明(1979~), 男, 辽宁昌图人, 硕士生, 主要从事河流生态环境模拟研究. E-mail: xmying2005@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was supported by Chinese National Outstanding Youth Fund (No. 50425926)

Received date: 2005-06-16; **Accepted date:** 2006-03-10

Biography: YING Xiao-Ming, Master candidate, mainly engaged in water eco-environmental modeling. E-mail: xmying2005@yahoo.com.cn

量增加方法 IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), 该方法是用于河流规划、保护和管理等的决策支持体系, 由一系列水动力、水质、水文、生态等专业模型和各类方法组成, 通过将水力学模型和生物信息模型结合, 建立流量和鱼类适宜栖息地之间的定量关系, 再由水文模型确定栖息地时间序列, 为水资源规划提供科学的依据^[2-5]。由于 IFIM 法以栖息地模拟为主, 因此可以用来评价河道修复的效果^[6-8]。IFIM 法的栖息地模型或类似方法不仅在美国, 而且在法国、德国、日本和英国等国家也得到了广泛的应用^[6]。

IFIM 法选择鱼类作为指示物种, 一方面由于鱼类处于水生生物群落食物链的顶层, 对环境的变化最为敏感, 作为顶级群落的鱼类, 对其它类群的存在和丰度有着重要作用^[9]; 另一方面, 它与人类的关系十分密切, 对人类有着食物、科研、美学价值等作用。流量、栖息地和鱼种产量之间的关系十分密切, 在缺少种群数量记录的情况下, 可以通过建立可利用的栖息地的数量和质量与流量之间的关系, 评价流量变化和栖息地管理对鱼类栖息地的影响。鱼类栖息地是指鱼类能够正常生活、生长、觅食、繁殖以及进行生命循环周期中其它重要组成部分的环境总和。影响鱼类生存的因素包括非生物因素和生物因素。非生物因素主要包括: 微生境 (microhabitat) 因素水深、流速、基质、覆盖物, 中生境 (mesohabitat) 因素河道形态 (深潭、浅滩、急流等), 大生境 (macrohabitat) 因素水质、水温、浊度和透光度等。生物因素主要包括: 食物链的组成和食料种类丰度等。通常所说的栖息地是指物理栖息地。

IFIM 方法是一个理论体系框架, 通过模拟物种可利用栖息地和流量之间的关系, 为水资源规划提供依据。它本身并不产生特定的河道内流量值, 而是通过用水用户各方通过协商确定。虽然国内有些文献^[10, 11]也提及了 IFIM 方法, 但并不详尽。因此, 本文着重阐述栖息地的模拟过程。

2 栖息地模拟

栖息地模拟过程为: 微生境模拟、大生境模拟、栖息地整合和确定栖息地时间序列。

2.1 微生境模拟

微生境模拟模型以物理栖息地模拟模型 PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model) 为主, 随着对 IFIM 法的研究不断深入, 又出现了 RHABSIM、EHVA、RHYHABSIM^[12] 和 River-2D^[7] 等模型。各种模型模拟栖息地的思想基本相同, 下面以 PHABSIM 模型为例介绍微生境模拟过程。

2.1.1 准备工作

(1) 确定研究物种 首先确定在被选河流中要研究的典型鱼种及其生命阶段, 然后绘制该鱼种的生命阶段历史的周期图表, 以此明确研究的时间和物种生命阶段。

(2) 确定河段和设置断面 研究河段设在鱼种对流量敏感的地区, 依据鱼种中生境类型设置断面。

(3) 栖息地映射 (mapping) 栖息地映射用于通过计算在研究区域内中生境类型 (深潭、浅滩等) 的比例, 决定在评价每个河段的栖息地可利用面积 (WUA) 时, 不同断面应赋予的权重。

(4) 划分单元 一个断面内划分成间隔相等的若干个单元, 一般划分的单元应包含河道形态变化明显的地方。

(5) 测定流量 在水文站处测定至少 3 个流量, 通常选择年内高、中和低流量作为率定流量。

(6) 数据采集 沿断面与河流垂直方向, 测定每个单元中线处的水深、流速、基质 (substrate)、覆盖物 (cover) 的组成和河床底高程以及每个断面的水质和水温。为便于计算, 用数字表示基质和覆盖物的不同组成。对于鱼种的取样, 依栖息地适宜性标准而定, 将在确定适宜性标准中阐述。

2.1.2 确定适宜性标准 栖息地适宜性指标 HSI (Habitat Suitability Indices) 定量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。栖息地适宜性标准将鱼种的数量和微生境影响因子 (水深、流速、基质和覆盖物) 关联, 用 0~1 之间的数值表示影响因子对鱼种的影响, 对于影响因子最适宜鱼种生存的情况, 赋予数值为 1; 最不宜鱼种生存的情况, 赋予数值为 0。

栖息地适宜性标准有 3 种: 二元格式 (binary format) (图 1), 单变量格式 (univariate format) (图 2) 和多变量格式 (multivariate format)。二元格式只有两个值, 影响因子适宜鱼种生存的范围对应数值为 1, 不适宜对应数值

为 0。单变量格式克服了二元格式缺少中间状态的缺点,是单个影响因子的适宜性连续曲线。多变量格式同时计算一个计算单元内几个变量的适宜性值。单变量适宜性曲线是普遍应用的格式。但目前研究工作也应用了双变量格式^[13]和多变量格式^[14]。双变量格式考虑水深和流速之间的相关性,采用回归方法拟合成双变量函数。多变量格式应用了模糊理论。多变量格式考虑影响因子之间的相关性,符合实际情况,具有较好的应用性。尽管多变量格式有多种优点,但 PHABSIM 并不支持多变量格式。

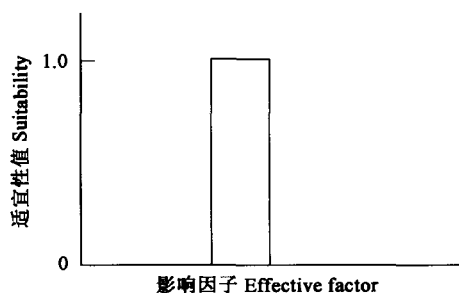


图 1 二进制适宜性曲线(引自文献[5])

Fig.1 Binary habitat suitability curve (adapted from [5])

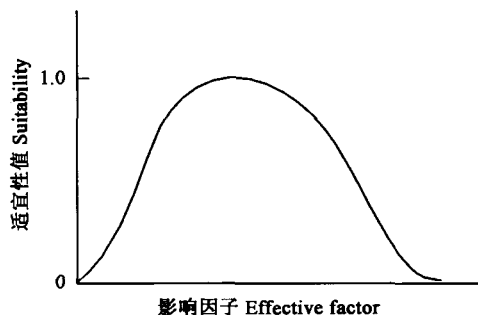


图 2 单变量适宜性曲线(引自文献[5])

Fig.2 Univariate habitat suitability curve (adapted from [5])

确定单变量栖息地适宜性曲线的方法^[2,5]:

(1)专家观点或文献曲线 这种方法的适宜性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。在研究河段内,确定所有适合鱼种生存的位置,然后通过潜水员水下观察或电击的方式,对随机选择的位置预设网格取样,得到每个位置鱼种的数量。对于每一个取样位置,测量在网格四个角处的栖息地属性(即水深,流速,基质和覆盖物等数据),然后求平均值。取样结束以后,建立目标鱼种生命阶段使用的栖息地原始数据频率柱状图(图 3),使用频率值为落在区间内观察到的鱼种数量与总数的比值。包含最大数量的鱼种对应区间中心值的适宜性值为 1,其它区间中心值的适宜性值由频率图的相对比值确定。最后用这些数值绘制单变量栖息地适宜性曲线。该方法取自数据,具有一定的可靠性。由于在没有最佳栖息地的条件下,物种能忍耐质量一般的栖息地,这使得对于将物种经常使用的栖息地确定为最佳栖息地令人质疑。

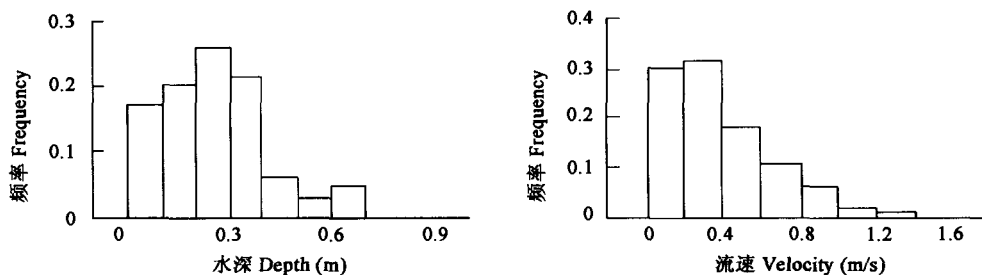


图 3 水深和流速使用频率分布(引自文献[15])

Fig.3 Distribution of sampling depth and velocity(adapted from [15])

(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。鱼种取样方式同前。已有许多数学指标用于计算栖息地偏好值。最常用的公式如下^[13,16]:

$$P_i = \frac{U_i}{A_i} \quad (1)$$

式中, i 代表栖息地影响因子的第 i 个区间; P 是栖息地影响因子未正则化的偏好值; U 是栖息地影响因子的使用比例, 它等于区间内观察到的鱼种的数量除以鱼种的总数量; A 是栖息地影响因子的可用比例, 它等于落在区间内的影响因子的数量除以观察到的影响因子的总数量。经过正则化后得到影响因子每个区间的适宜性值。最后用回归方法模拟出该影响因子的适宜性曲线。该方法考虑了栖息地的可利用性, 但在高流速下却对使用曲线修改较多, 例如, 当栖息地使用值和可利用值都接近于 0 时, 栖息地使用值很小, 但偏好值却很大, 这与实际不符。Hampton^[17] 为了减少无关因素的影响, 对在 90% 的置信区间内包括 90% 使用观察的每个频率分布应用了非参数公差限制, 使用落在 90% 的置信区间的那些频率值, 重新计算使用标准和偏好标准, 结果较好。

2.1.3 水力模拟 PHABSIM 以一维水力学公式为基础进行水力模拟, 模拟水深和流速, 适用于断面和水力糙率变化缓慢的稳态水流。水深的计算来自程序中模拟的水表面高程。水位模拟假定同一断面的水表面高程相同, 其模拟有 3 种方法: ①水位流量关系法 ②曼宁方程法 ③水表面轮廓法。流速使用曼宁方程进行模拟。

2.1.4 栖息地模拟 栖息地模拟基于以下假定^[11]: ①栖息地适宜性是流量的函数, 且与物种数量之间存在一定的比例关系; ②水深、流速、基质和覆盖物是流量变化对物种数量和分布造成影响的主要因素, 它们之间相互影响, 共同确定河流微生境条件; ③河床形状在模拟的过程中保持不变。

栖息地模拟利用栖息地适宜性曲线得到每个单元影响因子的组合适宜性值, 利用公式(2)计算研究河段总的微生境适宜性, 并称其为加权可利用面积 WUA(Weighted Usable Area):

$$WUA = \sum_{i=1}^n CSF(V_i, D_i, C_i) \times A_i / \text{河段长度} \quad (2)$$

式中, WUA 是研究河段每单位长度的微生境适宜性; $CSF(V_i, D_i, C_i)$ 是每个单元影响因子的组合适宜性值, C 是河道指标, 包括基质和覆盖物; A_i 是长度为有效断面距离的每个单元水平面积。栖息地组合适宜性值确定有 3 种公式:

$$CSF_i = V_i \times D_i \times C_i \quad (3)$$

$$CSF_i = (V_i \times D_i \times C_i)^{1/3} \quad (4)$$

$$CSF_i = \min(V_i, D_i, C_i) \quad (5)$$

公式(3)将影响因子的适宜性值相乘, 体现了它们的综合作用结果。公式(4)考虑当某一影响因子较为不利时, 组成栖息地值影响因子之间的补偿影响。公式(5)将最不适于鱼种生存的影响因子适宜性值作为组合适宜性值。

2.2 大生境模拟

大生境模拟主要模拟水温、溶解氧、氨氮、有毒物质等。在鱼类的生活条件中, 温度是一个极其重要的因素。温度是影响鱼类产卵和饲养的适宜性的重要水质参数。鱼类成熟和产卵开始的时期, 主要取决于水温的高低, 一般都在 18℃ 开始产卵^[18]。水温可以用 SSTEMP 模型模拟。而其它如氨、氮等物质, 含量过高会引起富营养化, 影响鱼类等水生生物的生存。水质模型比较多, 如 QUAL-2E 等。

2.3 栖息地整合

将大生境和微生境模拟结果整合到一起, 有两种方法: 二元法和数值法。

2.3.1 二元法 二元法是整合大生境和微生境的最简单的方法。在这种方法下, 大生境适宜性标准是二元格式, 即要么适宜要么不适宜。此时, 在每个模拟流量下, 从大生境模型中得到的结果是目标物种的适宜河段长度。对于研究的河流部分, 总的栖息地面积计算如下:

$$HA(m^2) = SL(km) \cdot WUA(m^2/km) \quad (6)$$

式中, HA 是在流量 Q 下研究河流的目标物种总的栖息地适宜面积, SL 是在流量 Q 下有适宜的水质和水温的河流的长度(同时满足水温和水质适宜), WUA 是在流量 Q 下物种的每单位长度的微生境适宜性面积。

2.3.2 数值方法 数值方法使用单变量格式的标准, 该方法的适宜性值在 0 和 1 之间连续变化。变化的数

值范围允许多种标准的使用。以水温为例,为了将给定流量下的大生境和微生境整合到一起,首先确定需要考虑温度的河流长度(例如 1km)。温度适宜性值从温度标准曲线内插得到,用于计算该段河流的总的栖息地:

$$HA_{(Q)} = \sum_{i=0}^n (WUA_{(Q)}) (SI_{(Q,i)}) (L_i) \quad (7)$$

式中, $HA_{(Q)}$ 是在流量 Q 下河段的总的栖息地适宜面积, $WUA_{(Q)}$ 是在流量 Q 下单位长的微生境适宜性面积, $SI_{(Q,i)}$ 是在流量 Q 下第 i 小段河流的温度适宜性值, $L_{(i)}$ 是第 i 小段河流的长度。

2.4 确定栖息地时间序列

将不同流量下的总的栖息地可用面积计算好以后,便可以绘制 HA 与流量关系曲线。利用流量与时间的关系和栖息地可用面积与流量之间的关系,可以得到栖息地可用面积与时间的关系和栖息地可用面积持续时间曲线。产生栖息地时间序列可以使用 TSLIB 模型,或者自己编写程序。 HA 与流量之间呈非线性关系,曲线的峰值对应的流量是鱼种某一生命阶段的最佳需水量。尽管 HA 和流量之间的关系可以直接使用,尤其对栖息地修复评价十分有用,但最佳需水量持续时间短,实测表明,该流量仅占一个月时间的 10% ~ 15%^[2],持续时间短暂的栖息地对于鱼种来说,并没有多大的意义,因此要建立栖息地可用面积持续时间曲线。从栖息地可用面积与时间关系曲线上,可以看出超过某一水平的 HA 在给定时间内分布的概况。从栖息地可用面积持续时间曲线上,可以得到某一时间保证率的 HA ,进而得到 HA 对应的一个低流量,便于水资源规划使用。在下面的例子中,将会体现出如何使用栖息地模拟结果。

3 国外应用的例子

在英国,地下水和地表水资源的开发已经引起了许多地下水主导的河流的低流量问题。由于公众和灌溉用水而抽取地下水,导致了英国南部白垩河含水层变干。以往土地利用和洪水防御工程等的河流管理已经使河流栖息地质量发生了较大变化。在人们的生态意识提高后,开始了河流生态保护和生态修复的工作。Elliott 等^[6]运用 IFIM 法,使用 PHABSIM 模型,为解决英国地下水主导的河流——艾伦河和比斗河的水资源规划问题提供了依据,并对韦河河道修复的结果作出了评价。

3.1 应用 IFIM/PHABSIM 解决水资源问题

研究鱼种为褐色鲑鱼。由于艾伦河和比斗河的水温有利于褐色鲑鱼的生长,食物没有成为限制因素,物理栖息地成为决定褐色鲑鱼数量的主要因素。因此模拟结果是物理栖息地可利用性和流量之间的关系,并通过使用在由于抽取地下水导致流量减少和没有减少两种情况下的流量时间序列,建立栖息地时间序列,以此评价由于流量变化导致 WUA 的变化。在艾伦河中褐色小鲑鱼栖息地模拟结果如图 4 所示。

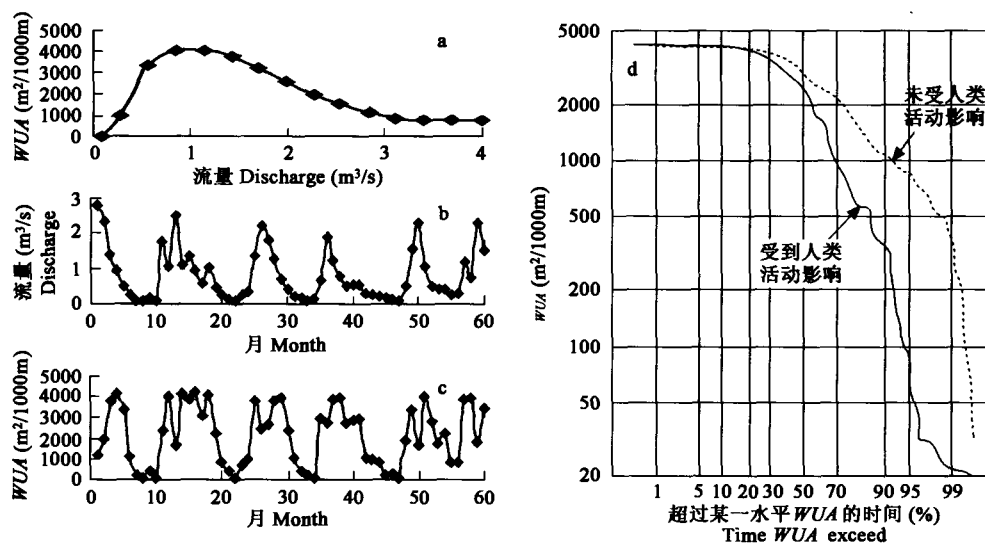
从图中可以看出,在天然流量(没有取水)条件下超过 70% 时间(1970 ~ 1992 年)的小鲑鱼的栖息地可用面积大约是 2000m²/km。在有类活动(取水)的流量下,相同超过数水平的栖息地的面积小于 1000m²/km。因此,从 1970 到 1992 年的 30% 时间,在艾伦河河段,由于人类取水引起天然条件下鲑鱼的可用栖息地的减少量超过了 50%。

在艾伦河上研究结果表明,小鲑鱼栖息地主要受到取水的影响。根据该项研究结果,英国国家环保局 and 博内茅斯水公司之间进行协商,最终达成河流取水量减少 50% 的协议。

3.2 使用 PHABSIM 评价栖息地重建方案

1994 到 1995 年,韦河进行了提高物种可用栖息地的重建工程,通过减少河道在低流量下的容量增加河道形态的多样性和砂砾基质的可利用性。研究鱼种有 3 种:成年白鲑(chub),成年褐色鲑鱼(brown trout)和成年斜齿鳊(roach)。在工程进行之前(1993 年)和之后(1996 年),分别采集了数据,对 PHABSIM 模型进行了率定。

在工程前后某一流量下水深、流速和基质覆盖的对比表明,方案已经使这 3 个物理栖息地参数的多样性得到了增加。将工程前后 3 个物种的可利用栖息地和流量之间的关系比较,结果表明,尽管可利用的栖息地发生了一些变化,但主要的增加并不理想。例如,成年鲑鱼可利用栖息地整体上下降,但在低流量下,只是微

图4 栖息地可用面积与流量和时间关系曲线^[6]Fig.4 Temporal variations of habitat suitability area and discharge^[6]

量的减少。在低流量下,成年白鲢可利用栖息地没有什么变化,而后随着流量增加而减少。成年斜齿鲃可利用栖息地在低流量和中等流量范围内增加。工程前后种群数量的研究表明,成年白鲢种群数量下降,而另外两个鱼种种群数量增加,这支持了 PHABSIM 的研究结论。

4 结束语

随着全球生态意识的提高,国内也开始了河流生态方面的研究工作。我国不仅面临着水资源短缺的问题,也面临着以往忽视河流生态系统健康需要的工程带来的水体污染、河道生境多样性和水生生物多样性下降等严重问题。为了解决这些问题,人们开始研究生态环境需水量和河流生态修复的理论和工程技术方法。国内在河流生态方面的研究上,处于起步探索阶段。如何科学合理的分配生产、生活和生态用水,如何利用水库调节河流生态环境需水量,如何对河流生态修复后的结果做出有效的评价,在国内尚未研究出一个有效的方法之前,IFIM 法是一个很好的选择。

IFIM 法研究水量、水质和水生生物之间的关系是以水体污染较轻为基础的,在水体污染严重的地方,必须先解决河流污染问题,在恢复河流水质达标的基础上,才能够应用 IFIM 法。IFIM 方法得到的结果是栖息地可用面积与流量之间的关系,但不能由此认为栖息地可用面积越大,物种数量就一定很多。在使用 IFIM 法研究河流生态环境需水量时,必须有充分的流量时间关系数据。在 IFIM 法中,有多种模型可以使用,水力模型从一维到三维,均可以根据研究需要选用。如何在栖息地模拟输出结果和鱼种产量之间建立有效的关系,如何将栖息地动力学与鱼种群和群落特征动力学关联起来等方面的研究是当前 IFIM 研究的主要方向^[5]。河流生态环境需水量不仅有生物需水量,还有维持河流系统水沙平衡需水量^[19]等,在决定某一时段河流生态环境需水量时,要综合考虑。

References:

- [1] Xu Z X, Dong Z C, Zhou J K, et al. Montana method and its application in ecological water requirements. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, 34(11): 15 ~ 17.
- [2] Midcontinent Ecological Science Center. PHABSIM for windows manual and exercise. U. S. Geological Survey, USGS, 2001.
- [3] Stalnaker C, Berton L L, Henriksen J, et al. The instream flow incremental methodology-a primer for IFIM. U. S. Department of the Interior National Biological Service. March, 1995.
- [4] Wu F C, Wang C F. Effect of flow-related substrate alteration on physical habitat: a case study of the endemic river loach *Sigastromyzon puliensis* (cypriniformes, homalopteridae) downstream of Chi-Chi diversion weir, Chou-Shui creek, Taiwan. *River Research and Applications*, 2002, 18: 155 ~ 169.

- [5] Bovee K D, *et al.* Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD, 1998.
- [6] Elliott C R N, Dunbar M J, Gowing I, *et al.* A habitat assessment approach to the management of groundwater dominated rivers. *Hydrological Processes*, 1999,13:459 ~ 475.
- [7] Gallagher. Use of two dimensional hydrodynamic modelling to evaluate channel rehabilitation in the Trinity River, California. Fish and Wildlife Service, 1999.
- [8] Lacey R W J, Robert G M. Reach Scale Hydraulic Assessment of Instream Salmonid Habitat Restoration. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 2004,40(6):1631 ~ 1644.
- [9] Xu Z X, Wang H, Tang K W, *et al.* Minimum ecological water requirements for lakes taking in-sending out water. *Resources Science*, 2005,27(3):140 ~ 144.
- [10] Song L L, Lu G H. Review on eco-environmental water requirements. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004,24(3):57 ~ 61.
- [11] Yang Z F, Zhang Y. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels. *Journal of Hydrodynamics*, 2003,18(3):294 ~ 301.
- [12] Lamouroux N, Jowett I G. Generalized instream habitat models. *Can.J.Fish.Aquat. Sci.*, 2005,62:7 ~ 14.
- [13] Vismara R, Azzellino A, Bosi R, *et al.* Habitat suitability curves for Brown Trout (*Salmo Trutta Fario L.*) in the River Adda, Northern Italy: comparing univariate and multivariate approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*, 2001,17:37 ~ 50.
- [14] Jorde K, Schneider M, Peter A, *et al.* Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics Copyright © 2001, ISEH.*
- [15] Jowett I G, Richardson J. Habitat preferences of common, riverine New Zealand native fishes and implications for flow management. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1995,29:13 ~ 23.
- [16] Vilizzi L, Copp G H, Roussel J M. Assessing Variation in Suitability Curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use. *River Research and Applications*, 2004,20(5):605 ~ 618.
- [17] Hampton H. Development of Habitat Preference Criteria for Anadromous Salmonids of the Trinity River. U.S. Dept. Int., Fish Wildl. Serv., Div. Ecol. Serv., Sacramento, California., 1988.
- [18] Wang Y, Zhang L, Zhang X E. Water temperature of river model and its forecast for downstream flow of Nuozhadu reservoir. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2003,19(3):235 ~ 239.
- [19] Li L J, Zheng H X. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000,55(4):495 ~ 500.

参考文献:

- [1] 徐志侠,董增川,周健康,等.生态需水计算的蒙大拿法及其应用. *水利水电技术*, 2003,34(11):15 ~ 17.
- [9] 徐志侠,王浩,唐克旺,等.吞吐型湖泊最小生态需水研究. *资源科学*, 2005,27(3):140 ~ 144.
- [10] 宋兰兰,陆桂华.生态环境需水研究综述. *水利水电科技进展*, 2004,24(3):57 ~ 61.
- [11] 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.
- [18] 王颖,臧林,张仙娥.河道水温模型及糯扎渡水库下游河道水温预测. *西安理工大学学报*, 2003,19(3):235 ~ 239.
- [19] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. *地理学报*, 2000,55(4):495 ~ 500.