

# 适宜生态流量计算方法研究

陈敏建, 丰华丽, 王立群, 陈清勇

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 从河流生态系统的特征出发, 提出了以鱼类生境法和鱼类生物量计算适宜生态流量的途径。采用鱼类生境法和鱼类生物量法, 对松花江流域的适宜生态需水开展应用研究。结果表明, 两种方法计算的结果基本一致。在一般情况下, 鱼类生境法和鱼类生物量方法可以互相验证, 二者计算成果相差 3% 以下。在没有回水顶托的影响下, 鱼类生境法适用于不同尺度的河流。而鱼类生物量方法, 一般适用于较大的平原型河流, 对于较小的山区河流, 该方法需慎重使用。

**关键词:** 鱼类生境法; 鱼类生物量法; 适宜生态流量; 松花江流域

**中图分类号:** TV133; S271; S931.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2007)05-0745-06

当前, 我国河流生态系统结构被破坏、功能退化, 主要表现为河道断流、水质恶化和水生物多样性降低等一系列生态、环境问题。现状生态用水远低于维持河流系统健康的用水, 甚至低于防止干涸或断流的最小生态需水。鉴于我国水生态系统的实际情况, 需要采用多参数研究生态需水问题。因此, 从河流生态系统的状态出发, “十五”国家科技攻关课题提出以最小生态流量、适宜生态流量和汛期生态流量构成的一个完整性体系研究河流系统需水问题。其中, 最小生态流量和适宜生态流量属于非汛期生态流量<sup>[1]</sup>。从非汛期和汛期生态需求角度提出的河流生态流量, 具有代表性、系统性和完整性, 能够刻画水文情势和生态系统的变化特征。生态流量计算方法内容丰富, 本文重点讨论适宜生态流量内涵和计算方法。

## 1 适宜生态流量之内涵

根据河流生态系统的特征, 需要综合分析径流的生态效应, 从水量(递减)过程的变化观察生态系统的变化, 从整体上分析河流系统的生态需水特征。河流生态系统被破坏是一个渐变过程, 水量减少是水体生态系统退化的关键因素。随着各种“破坏性”能量的积累, 逐渐逼近一种“突变”的状态, 导致出现不可逆转的生态退化。有两种状态最为关键: 第一种是生态链被破坏, 物种大规模减少, 生物完整性受到破坏; 第二种状态为水体自身消亡。这是两个需要关注的焦点。研究生态需水, 需要避免出现上述生态灾难。本文仅研究防止第一种情况出现下的生态需水问题, 称之为适宜生态流量或需水。

适宜生态流量, 是指水生态系统的生物完整性随水量减少而发生演变, 以生态系统衰退临界状态的水分条件定义为维持水体生物完整性的需水。适宜生态流量考虑目标水体水生生物生存、繁衍对水域水文、水力特性的要求, 当流量持续小于这一数值时, 将导致生物繁殖条件的破坏, 生物量减少, 进而生物完整性降低<sup>[2]</sup>。

## 2 适宜生态流量计算方法

河流是最重要的水生态系统类型之一。在水生态系统中, 水体作为生物的栖息环境, 水量和水质的变化对水生生物的影响巨大。

收稿日期: 2006-07-27; 修订日期: 2007-01-05

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划重大项目(2004BA610A-01); 国家自然科学基金资助项目(50509017)

作者简介: 陈敏建(1957-), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理、生态水文等方面研究。

E-mail: mjchen@nhri.cn

鱼类是水食物网中的高级消费者,是水生态系统的顶级生物。鱼类群落由草食性、杂食性、滤食性等不同食性鱼类组成。研究表明:在水生态系统中,理化因素、浮游植物、浮游动物对鱼类的组成和生物量产生影响,即所谓的上行效应;同时,作为淡水生态系统中的顶级生物,鱼类的捕食不仅在较低营养级上造成生物组成和密度的变动,而且还会引起水体的初级生产力和营养状况发生改变,即所谓的下行效应<sup>[3]</sup>。因此,鱼类群落结构的变化,能够全面和直接反映水体生物群落与水质状况的整体变化信息。因此选择鱼类作为研究对象,开展适宜生态流量计算方法研究合理可行。本文以鱼类生境法和鱼类生物量法两种方法计算适宜生态流量。

## 2.1 鱼类生境法

鱼类生境法,即通过分析鱼类生境指标与水流条件的关系,选择能够满足鱼类生境需求的水流条件,确定适宜生态流量的方法。本文在鱼类产卵期(汛前期)内,获取鱼类产卵繁殖所需要的流速信息(以观测试验等手段获得),然后通过控制断面的流速~流量关系曲线,确定适宜生态流量。

(1) 产卵繁殖流速 鱼类对水的需求从两个方面来看。一是水量的需求,鱼类生存对水量变化敏感;二是水流条件,鱼类产卵繁殖必须有足够的水流动力学条件,即流速。研究表明,河流水流速度是鱼类正常产卵所需的重要环境因子,并影响水中溶解氧等水质参数。据研究,在自然条件下,青、草、鲢、鳙等鱼的性腺在静水环境中可以发育,但成熟产卵却需要江河水流环境和水位上涨等生态条件<sup>[4,5]</sup>。根据实测推算,并参考国外鱼类生态学的研究成果,大多数鱼类产卵时的水流适宜流速为0.3~1.5 m/s。根据断面流速分布和流速~流量关系,取水面至相对水深为0.6处的流速大于0.3 m/s的情景计算适宜生态流量,能满足大部分鱼类产卵所需要的流速条件,可以基本维持水生态系统的生物完整性。

(2) 技术处理 河道中运动的水流,由于受到断面形状、坡度、糙率、水深、弯道、风、气压和潮汐等因素的影响,大多呈紊流状态,水流中任意点的流速随时间不断变化,但其时段平均值是稳定的。本文通过分析断面平均流速和鱼类产卵所需流速之间的关系,确定适宜生态流量,因此了解河道中的流速分布规律非常重要。

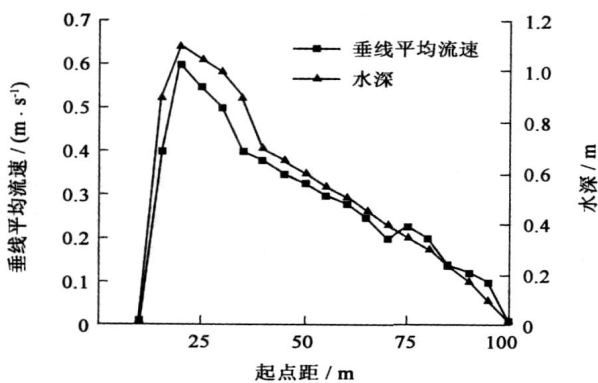


图1 垂线平均流速沿河宽示意图

Fig.1 Sketch of mean velocity in vertical

许多试验研究导出一些经验、半经验性的垂线流速分布公式,其中对数曲线型公式较接近于实际流速分布情况,对数型流速分布曲线的垂线平均流速接近于自水面起相对水深为0.6处的测点流速<sup>[6]</sup>。垂线平均流速沿河宽的变化与断面形状有关,在窄深河道上,垂线平均流速沿河宽的分布曲线的形状与断面形状相似,如图1所示。观测资料分析表明:河底与岸边附近流速最小,水面流速近两岸边的小于中泓,在最大水深处水面流速最大。

为了保证鱼类产卵繁殖,要求大部分水深的流速能够满足鱼类所需。当断面平均流速为0.27 m/s,根据垂线流速分布及垂线平均流速沿河宽的分布规律(图1),这些垂线自水面起至相对水深为0.6处的流速范围为0.30~0.49 m/s,断面水深与流速能够满足鱼类产卵的需求。因此,

以断面平均流速0.27 m/s为基准,采用长系列的水文年鉴资料,通过分析每一年的该流速与流量关系,以其多年平均值作为该控制断面的适宜生态流量。在实际应用过程中,需根据所研究流域的鱼类种群的具体试验数据确定产卵繁殖流速。采用鱼类生境法计算适宜生态流量时,选用的资料时段为汛前期的4、5月份,正值汛前涨水期,此时是鱼类产卵最适合的时期,符合鱼类的生境条件。

需要说明的是,本文所指的鱼类生境法,与国外的IFIM等生境法(Habitat Rating Methods)不同。国外的生境法,首先确定某一流量下控制断面的几何学、流速和底质等要素;其次,将以上信息与生境适宜性指数结合,确定该流量下的加权可用面积。生境适宜性指数处在0~1,这些指数是控制性因素,并假设和生境承载力之间正相关;最终,运行程序反复计算某一流量下的生境适宜性指数,建立流量和加权可用面积的关系<sup>[2]</sup>。

本文的生境法采用长系列的水文资料, 直接建立流速~流量关系, 未掺入主观信息; 国外的生境法, 需要大量的生物学实验信息, 一般难以应用。同时通过专家打分给出的生境适宜性指数, 具有较强的主观性。在我国未大规模开展河流试验研究的情况下, 本文提出的生境法具有很强的实用性和可操作性, 符合我国国情。

## 2.2 鱼类生物量法

鱼类生物量法, 即建立量纲为一的生物量与流量之间的关系, 依据生态恢复学的理论, 分析连续枯水年组流量与生物量的关系, 确定适宜生态流量的方法。据此算出的适宜生态流量, 包含生物量。在本文中, 鱼类生物量与流量的关系用渔业捕捞量与流量的关系代替, 进而通过渔业捕捞量和流量的关系确定适宜生态流量。

(1) 方法根据 许多野外观测试验表明, 在一定范围内, 随着流速增大, 物种多样性和物种丰度都呈增加趋势, 水力条件的多样性和物种多样性之间存在的相关关系, 说明随着流量的增加, 物种多样性呈增加之势<sup>[7]</sup>。河川流量与物种多样性和物种丰富度存在趋势变化关系。因此, 可通过水生物种多样性确定适宜生态流量。

鱼类是河流生态系统中的顶级生物, 其多样性的变化基本能反映整个河流系统的健康状况, 因此可建立鱼类多样性和流量之间的相关关系, 以鱼类的多样性作为评判的指标, 分析鱼类多样性变化与水流条件变化的关系。通过建立流量与鱼类多样性的相关关系, 确定满足大部分鱼类生长繁殖的适宜生态流量。在具有多年长系列实验资料的情况下, 根据建立的鱼类多样性与流量和水质的关系, 可以很容易的确定适宜生态流量。

(2) 重要条件 根据以上的分析, 获取鱼类多样性的资料是最关键的第一步。但事实上, 由于我国在水生态系统基础研究的薄弱, 缺失大规模的实测鱼类生物资料, 更缺少直接的鱼类多样性资料系列, 生物量信息实际上也难以获得。因此, 需要另辟蹊径, 以鱼类的其它信息资料间接反映鱼类多样性, 通过这些指标建立与流量的相关关系, 确定适宜生态流量。

条件之一: 鱼类多样性与流量间的相关关系, 以鱼类生物量与流量间的关系来代替。

研究表明, 物种生物量与生态系统功能之间存在着广泛的联系<sup>[8]</sup>。从理论上讲, 在一定的空间内生物量越高, 就有可能存在更多的物种。对鱼类来说, 该理论也是适用的, 即在鱼类生物量高的情况下, 鱼类生物多样性较为丰富(不包括水生态系统因富营养化或外来物种入侵伴随物种多样性骤然下降以及人工生态系统的情况)。因此, 在排除外来物种入侵等因素的影响下, 鱼类生物量能基本反映鱼类多样性的特征。

条件之二: 鱼类捕捞量的变化趋势, 可以反映鱼类生物量的变化趋势。

生物量是指某一时段(月、年等), 单位面积或单位水体中所积存的有机物质。鱼类生物量是指由不同鱼种构成的鱼类群落的总重量。鱼类生物量多的年份, 鱼类的年捕捞量也相对较多, 鱼类捕捞量的变化趋势能基本反映鱼类生物量的变化趋势, 因此以鱼类捕捞量变化可以近似地代替生物量变化。如果没有外来物种入侵, 鱼类生物量的变化基本能反映鱼类的生物多样性特征, 因此鱼类的捕捞量也基本能反映鱼类的多样性特征。

利用渔业资源调查资料, 假定渔业捕捞量的年际变化与鱼类生物量的变化同步, 将渔业捕捞量进行量纲一处理: 以年度渔业捕捞量除以多年平均渔业捕捞量, 其相对量可近似看成鱼类生物量的相对量。所以, 流量与鱼类多样性的关系可用流量与鱼类捕捞量的关系代替, 并通过渔业捕捞量和流量的关系确定适宜生态流量<sup>[9]</sup>。

(3) 计算原理 渔业资源的年际变化与鱼类生物量的变化同步, 将渔业捕捞量和同期的河流流量进行量纲一处理后, 得到的相对渔业捕捞量与相对河流流量, 其相关关系, 能够反映流量和鱼类生物量的相关关系。

每一个生态系统都具有固有缓冲环境变化的能力。这种特性是在进化的过程中对环境变化适应的结果。因此, 群落的结构在形态和生理方面对自然环境的变化具有一定的自我调节、自我组织和自我恢复的能力, 能维持一定的动态平衡。当河流持续处于低流量状态时, 鱼类由于来不及调整自身的生理特性, 生长和繁殖都受到限制。当这种胁迫的时间超过一定范围时, 敏感物种将大量消亡, 部分生态位较宽的鱼种相对可以维持, 但生长不良。当下一个水文年度的流量增加时, 流量条件对鱼类的生存限制性降低, 如果鱼类生物量能够回升或增加, 表明上一个水文年度的流量对鱼类群落的影响仍在其可忍受的范围内; 如果随着流量的增加, 鱼类的生物量仍然持续降低, 则表明了渔业资源已经遭受到破坏, 这就要求生态适宜流量大于上一个水文年度的流量, 以

避免渔业资源严重受损。

根据定义, 适宜生态流量是指维持鱼类群落生存繁殖所需的最小值, 即适宜生态流量的阈值。从生态系统的弹性和抗性的角度考虑, 若长时间维持在阈值的水平, 即河流生态系统持续处在临界状态, 好比弹簧一直处在最大的拉伸状态, 最终也将导致河流生态系统的破坏。从这个角度考虑, 适宜生态流量是一个警戒阈值, 此时生态系统只处于相对安全状态。为了保证河流生态系统的完整性, 河流生态流量不宜长期维持在此水平。河流枯水期, 流量大幅度降低, 鱼类繁殖将受到极大的威胁。如果在这个时期内, 鱼类能够存活并具有相当的产量(假设能维持 50 %左右), 说明鱼类对枯水期的低流量胁迫具有一定的忍耐性, 在基本能够忍耐的范围之内。枯水期流量是鱼类生存和繁殖最困难的时期, 因此, 依据生态恢复学理论, 具体分析相关水文年的枯水期流量与渔业捕捞量的关系, 以及流量增加后渔业资源的变化情况, 确定适宜生态流量。

为了便于实际操作和管理, 将渔业捕捞量和相应的流量进行量纲为一处理: 以年度渔业量除以多年平均渔业资源量, 得到渔业资源相对量, 以相应年的枯水期流量除以多年平均流量, 得到流量相对量。循此途径, 建立起河流鱼类捕捞量与流量之间的对应关系, 计算河流适宜生态流量, 同时包含生物量信息。具体计算时, 首先需要分析渔业捕捞量和流量间的相关关系。由于河流是一个连续体, 年际间的流量和捕捞量之间存在关联, 需要进行连续年份的相关分析。

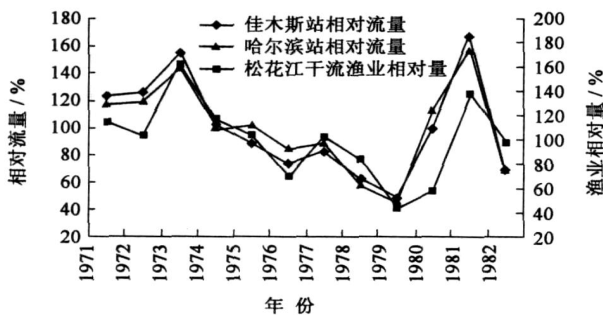


图2 松花江干流实测相对流量和渔业相对量关系

Fig.2 Relationship between relative observed flow and relative fishery yield in mainflow of Songhuajiang river

以哈尔滨站和佳木斯站为例, 描述鱼类生物量法计算适宜生态流量的过程。图2为哈尔滨站和佳木斯站相对实测流量与相对渔业量的变化关系。可以看出, 相对实测流量与渔业相对量的变化趋势一致, 即随着流量的增加, 鱼产量增加, 反之亦然。1977 - 1979年流量持续减少, 1979年达到最低值, 相应的渔产量也持续走低, 1979年降到最低值。1977 - 1979年的持续枯水年, 使得鱼类的生存环境遭到破坏。以1978 - 1979水文年和1979 - 1980水文年, 具体分析径流量与鱼产量的变化关系。

1978 - 1979水文年的枯水期, 鱼类的生存环境变得恶劣, 生长繁殖受到限制, 部分脆弱的鱼类可能难以维持生存, 部分鱼种消失, 导致鱼产量大幅度下降。但此时的流量条件仍在某些鱼类可以承受的弹性范围内, 由于部分鱼种的消失, 1979年的相对鱼产量降到最低值。1980年流量增加后, 相对鱼产量有所回升, 说明了绝大部分鱼类的生命和繁殖能够得以延续, 但由于鱼类群落恢复的滞后性, 其产量回升的幅度很小。

根据生物量方法计算原则分析, 以1978 - 1979水文年枯水期与1979 - 1980年枯水期的平均流量作为适宜生态流量。计算得到哈尔滨站和佳木斯站的适宜生态流量分别为  $425 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $609 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相应的适宜生态流量比分别为 28.3 %和 26.3 % (表1)。在此流量下, 鱼类生物量能维持在多年平均值的 51.8 %左右, 保存了大部分鱼类物种资源, 意味着在流量增加的情况下, 鱼类仍具有一定的恢复能力, 表明计算的适宜生态流量基本可靠。

表1 松花江干流不同控制断面的适宜生态需水计算结果

Table 1 Results for appropriate ecological flow at stations of Songhuajiang river

站名	年份	月份	平均流量 / $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	相对流量 / %	适宜生态 流量/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	适宜相对生 态流量/ %	相对生物量 / %
哈尔滨	1978 - 1979	10 ~ 5	382	25.4	425	28.3	51.8
	1979 - 1980		468	31.2			
佳木斯	1978 - 1979	10 ~ 5	562	24.3	609	26.3	
	1979 - 1980		655	28.3			

### 3 应用实例

松花江流域属于北方湿润地区,水资源相对丰富。但水土资源长期大规模的开发利用改变了径流流动的格局,引发了水分充足的湿地或者干涸,或者失去空间,造成湿地大规模消退;同时大范围出现连续枯水,对河流水生生物资源构成威胁,生物多样性大幅度降低,水生生态系统的完整性遭受破坏。为了保证水生生物链免遭破坏,需确保河流的适宜生态流量。在对松花江流域河流水力特性分析的基础上,根据松花江流域水文站点的分布和观测资料的可靠性、代表性以及控制性断面的稳定性,选取 23 个计算断面。采用资料为 1965 - 1985 年逐日流量、逐日水位、实测大断面和实测流量。松花江干流及其北源嫩江,是我国北方淡水鱼的重要产地之一,盛产鲤鱼、鲫鱼、白鲢、草鱼、鳊鱼等经济鱼类。在采用鱼类生物量法计算时,选用松花江干流和嫩江干流的 1971 - 1982 年的鱼类捕捞量资料<sup>[10]</sup>。

综合分析鱼类生境法和鱼类生物量的计算结果,给出适宜相对生态流量的推荐值,见表 2。

表 2 松花江流域适宜生态流量计算成果

Table 2 Results for appropriate ecological flow of Songhuajiang river watershed

水系	站名	生境法			生物量法			推荐的相对流量/ %
		流量/ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	流速/ (m s <sup>-1</sup> )	相对流量/ %	流量/ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	相对流量/ %	生物量比/ %	
松花江干流	下岱吉	360	0.27	33.9	331	31.2	51.8	26 ~ 28
	哈尔滨	405	0.27	26.9	425	28.3		
	通河	462	0.27	26.9	444	25.9		
	佳木斯	605	0.27	26.1	609	26.3		
松花江支流	蔡家沟	28.0	0.17	25.1	30.8	27.5	58.1	25 ~ 28
	莲花	19.0	0.33	25.0	20.7	27.4		
	长江屯	65.9	0.27	25.1	71.9	27.4		
嫩江干流	石灰窑	25.8	0.29	21.3	25.4	21.0	58.1	19 ~ 24
	阿彦浅	83.4	0.29	24.0	81.7	23.5		
	江桥	174	0.30	24.3	137	19.1		
	大赉	311	0.27	41.0	152	20.0		
	古城子	46.5	0.31	30.6				
嫩江右侧支流	碾子山	19.2	0.29	30.5			58.1	28 ~ 37
	两家子	20.7	0.25	29.3				
	洮南	15.1	0.28	28.0				
	加格达奇	23.0	0.29	37.0				
	柳家屯	35.8	0.27	28.9				
	镇西	14.1	0.35	28.0				
第二松花江	白云胡硕	12.7	0.27	28.0			58.1	29 ~ 31
	扶余	343	0.26	67.3				
	农安	3.64	0.30	31.1				
	五道沟	26.3	0.30	29.0				
	丰满	123.2	—	29.0				

在嫩江干流下游的大赉站,两种方法计算的结果相差很大。究其原因:是由于下游大赉站受第二松花江回水的影响,说明此时鱼类生境法不宜采用,因此以鱼类生物量法确定的适宜相对生态流量为准。扶余站因受嫩江顶托的影响也出现类似情况。

通过对松花江干流及其支流、嫩江干流及其支流,以及第二松花江的研究发现,在一般情况下,鱼类生境法和生物量方法可以互相验证,两者计算成果仅相差 3% 以下。在没有回水顶托的影响下,鱼类生境法适用于不同尺度的河流。而鱼类生物量方法,一般适用于较大的平原型河流,对于较小的山区河流,由于物种分布的差异,该法需谨慎使用。

## 4 结 论

(1) 提出了以鱼类生境法和鱼类生物量计算适宜生态流量的途径。鱼类生境法采用长系列的水文资料,利用水文学方法直接建立流速与流量关系确定适宜生态流量,未掺入主观信息,具有很强的实用性和可操作性;鱼类生物量法,依据河流恢复生态学理论,通过分析鱼类生物量随年径流量变化关系确定适宜生态流量。由于鱼类生物量资料缺失,以渔业捕捞量代替,进而通过渔业捕捞量和流量的关系确定适宜生态流量。

(2) 采用鱼类生境法和鱼类生物量法,计算了松花江流域的适宜生态流量。结果表明,松花江干流的适宜相对生态流量为 26%~28%,其支流的适宜相对生态流量为 25%~28%;嫩江干流的适宜生态流量比为 19%~24%,其支流的适宜生态流量比为 28%~37%;第二松花江支流的适宜生态流量比为 29%~31%。

(3) 通过实例研究发现,在一般情况下,鱼类生境法和鱼类生物量方法可以互相验证。在没有回水顶托的影响下,鱼类生境法适用于不同尺度的河流。而鱼类生物量方法,一般适用于较大的平原型河流。

### 参考文献:

- [1] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.中国分区域生态用水标准研究[R],南京:南京水利科学研究院,2005.
- [2] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.生态标准河流和调度管理研究[J],水科学进展,2006,17(5):631-637.
- [3] 黄玉瑶.内陆水域污染生态学——原理与应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [4] 刘建康,何碧梧.中国淡水鱼类养殖学[M].北京:科学出版社,1992.
- [5] 刘建康.高级水生生物学[M].北京:科学出版社,1999.
- [6] 李世镇,林传真.水文测验学[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [7] 宁 远,沈承珠,潭炳卿,等译.河流保护与管理[M].北京:中国科学技术出版社,1997.
- [8] 蔡晓明.生态系统生态学[M].北京:科学出版社,2000.
- [9] 陈敏建.流域生态需水研究进展[J].中国水利,2004(20):25-26.
- [10] 《中国渔业资源调查和区域》编委会.中国内陆水域渔业资源[M].北京:农业出版社,1988.

## Calculation methods for appropriate ecological flow<sup>\*</sup>

CHEN Min-jian, FENG Hua-li, WANG Li-qun, CHEN Qing-yong

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** From the perspective of the characteristics of river ecosystem, this paper put forward to some new approaches to calculate the appropriate ecological flow with fish habitat and fish biomass. The method utilizes the long-term hydrological data to set up the relationship by traditional hydrological method; while the fish habitat method, according to the theory of stream rehabilitation ecology, namely calculating the appropriate ecological flow through the analysis of the relation between fish biomass and annual flow. Because of the shortage of the fish biomass data, the fishery quantities are replaced in this paper, and then with the relation between fishery quantities and flow, we can calculate the appropriate ecological flow. With the fish habitat method and the fish biomass method, the appropriate ecological flow of Songhuajiang river basin is studied. It shows that the results of the two methods are almost consistent. Commonly, the two methods can be considered as the validation for each other, the account error of the two methods is below 3%. Without the influence of backwater, the fish habitat method is adaptive to the rivers of various scales. Though the fish biomass method is usually adaptive to large floodplain river, it should be used with cautions for the small stream in mountains.

**Key words:** fish habitat method; fish biomass method; appropriate ecological flow; Songhuajiang river basin

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50509017).