

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200048

# 基于生态保护目标的武江流域生态流量定值研究

高雪山<sup>1,2</sup>, 关 帅<sup>3</sup>, 刘树锋<sup>3</sup>, 冯 平<sup>1</sup>

(1.天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;

2.广东省水利厅,广东广州 510635; 3.广东省水利水电科学研究院,广东广州 510635)

**摘 要:**基于武江河道内的生物多样性和物种特征,提出适宜水力学指标法计算维持河道生态系统稳定性所需的生态流量。该方法以代表鱼类为生态保护目标,根据湿周、流速与流量的关系,求得鱼类不同生命周期的生态流量。结果表明:(1)越冬期鱼类所需流速下限为 0.2m/s,产卵期平均流速为 0.5~0.7m/s,肥育期流速范围为 0.3~0.6m/s;(2)产卵期河道生态流量为 116.3~150.3 m<sup>3</sup>/s,越冬期与肥育期中后阶段生态流量为 49.55 m<sup>3</sup>/s;肥育期初期(8月)生态流量为 71.97 m<sup>3</sup>/s;(3)提出的适宜水力学指标法以维持鱼类良好的生境条件为生态保护目标,计算结果符合 Tennant 法河流生态用水标准,且更能反映河流的丰枯变化,可为流域水资源开发利用提供参考。

**关键词:**生态保护目标;适宜水力学指标法;生态流量;武江

**中图分类号:**X826;TV133

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)05-0001-06

## 1 研究背景

我国水能资源丰富,理论蕴藏量达  $6.88 \times 10^8$  kW,居世界第一。截至 2018 年底,仅广东省就有小水电站 9 847 宗,占全国小水电宗数的 20% 以上。小水电属于可再生能源,开发主要集中在山区中小河流,其在推动山区经济社会发展、助力脱贫攻坚、优化能源结构等方面起到了积极作用。但由于早期过度开发和生态理念滞后,有关小水电造成生态环境破坏的问题愈来愈得到重视和关注。根据董哲仁等<sup>[3]</sup>流 4D 连通性生态模型,河流是物质流、物种流和信息流的载体,小水电的密集开发阻隔了河流的纵向连通,改变了自然的水文节律,导致河流水质、水量、泥沙与水温等发生改变,部分电站过分注重经济效益,在枯水期过度引水,下游河道减水甚至出现断流,造成河流生态系统中的物质流、物种流和信息流全面受到影响。国务院 2015 年印发的《水污染防治行动计划》(国发[2015]17 号)中明确提出“科学确定生态流量,维持河湖基本生态用水需求,

重点保障枯水期生态基流”,因此在保障小水电发电功能的同时,如何保障下游河道的生态流量已成为亟待解决的课题<sup>[2-4]</sup>。

目前,国内外有关生态流量计算的研究方法很多<sup>[5-11]</sup>,可以概括为四大类:水文学法<sup>[6]</sup>、水力学法<sup>[9]</sup>、生境模拟法<sup>[8]</sup>和综合分析法<sup>[10]</sup>等,不同计算方法的原理、侧重点、数据需求和适用条件均不相同<sup>[12-14]</sup>。由于国内大多数河流未开展系统的生态普查或生态调查资料,造成水文和生态的响应关系难以确定,限制了生境模拟法和综合分析法在国内大范围的应用,因此国内的研究以水文学法和水力学法为主。其中水文学法具有操作方便、资料需求少的优势,得到了最为广泛的应用,但其在计算时未考虑水力生境需求,计算结果缺乏生态学意义;传统的水力学法以湿周法和 R2-Cross<sup>[13]</sup>为主,计算中考虑了水生生物的水力参数特征,且只需进行简单的现场测量和水力学计算,但是此类方法体现不出河流流量季节性变化的特点。

鉴于此,本文在湿周法的基础上,以武江流域为

收稿日期:2020-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51779165);广东省水利科技创新项目(2017-12)

作者简介:高雪山(1976-),男,河南商丘人,博士研究生,主要研究方向为水资源及水利工程管理。E-mail:gshuai@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:冯平(1964-),男,黑龙江密山人,教授,博士,主要研究方向为水文学与水资源。E-mail:Fengping@tju.edu.cn

试点,以河道内代表性鱼类为生态保护目标,将典型鱼类不同生命周期对流速的需求为出发点,提出一种鱼类适宜水力学指标法的生态流量定值方法。

## 2 研究区概况及保护目标生态流速

### 2.1 研究区概况

武江是北江流域的一级支流,位于东经  $112^{\circ}23'$ ~ $113^{\circ}36'$ ,北纬  $24^{\circ}46'$ ~ $25^{\circ}41'$  之间。武江发源于湖南省三峰岭,于韶关市区沙洲尾汇入北江,全长 260km。武江河广东境内共有 7 个梯级,分别为乐昌峡水库、张滩电站、富湾电站、长安电站、七星墩电站、厢廊电站与溢洲电站。研究区域和水文站位置示意图 1。

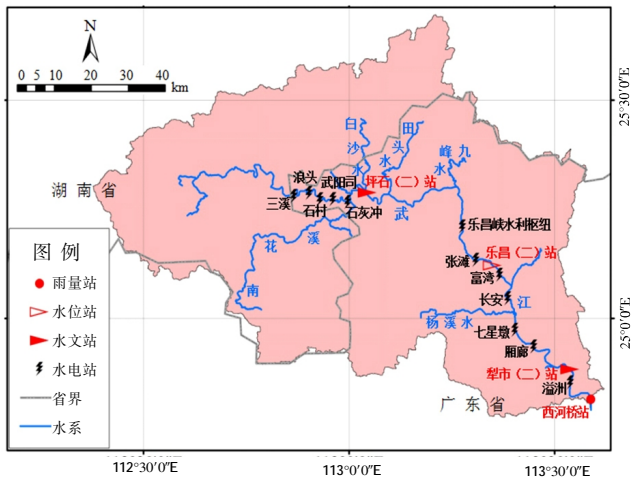


图 1 研究区域和水文站位置

Fig.1 The research area and location of hydrological stations

北江特有珍稀鱼类省级自然保护区的核心区位于乐昌峡下游的武江河上,保护区对象为北江特有的、珍惜的、濒危鱼类和主要经济鱼类及其栖息地,武江河上各梯级水利工程应重点保障鱼类自然保护区的需求。

本研究选取保护区内的犁市(二)站为代表站进行分析,犁市(二)站( $24^{\circ}52'59.3''N$ ,  $113^{\circ}32'12.0''E$ )站点以上集水面积  $6\,976\text{km}^2$ ,主要观测项目有:流量、水位、降雨量等。本研究共收集到犁市(二)站 1956~2016 年共 61a 的逐月流量资料与 2016 年的实测大断面资料。

### 2.2 保护目标的确定

北江特有珍稀鱼类省级自然保护区位于武江桂头大桥至韶关市区海关半岛(浚江、武江汇合处,北江起点)河段 ( $24^{\circ}48'17''$ ~ $24^{\circ}56'60''N$ ,  $113^{\circ}25'18''$ ~ $113^{\circ}15'19''E$ ),于 2008 年 9 月成立,保护区江段长度 36km,保护区总面积约  $28.2\text{km}^2$ 。保护区对象为北江特有的、珍惜的、濒危鱼类和主要经济鱼类及其栖息地;

独特的物种种质资源以及保护区内北江河流生态系统的完整性。保护区内鱼类共有 97 种,与 20 世纪 80 年代调查记录相比,鱼类种数明显减少,物种组成也发生明显变化。鱼类群落结构的变化,能够全面直接地反映水体生物群落与水质状况的整体变化信息。

本次计算选取保护区内珍稀鱼类和重要紧急鱼类中的赤眼鳟为代表鱼类。赤眼鳟为半洄游性鱼类,多栖息于江河湖泊流速缓慢的水体中,生活在水体的中上层,生活适应性强。

### 2.3 指示生物喜好流速的选定

鱼类生活习性是对天然河流长期以来的自适应过程,长期的自然选择决定了鱼类各生命周期对水流需求的差异。分析保护区内年内径流规律,鱼类流量需求较低的越冬期和肥育期河流水量较少,径流变化幅度较小;产卵期鱼类对水流变化敏感,通过目标鱼类喜好流速的控制,模拟流量脉冲、高流量及漫滩流量等水文过程,促进鱼类产卵。根据水利部南京水利科学研究所的相关研究<sup>[15]</sup>(见表 1),三个周期内生态流速选定如下:

表 1 目标鱼类流速适应能力  
Table1 The flow velocity adaptability of targeted fish

鱼的种类	体长/m	感应流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	喜好流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
赤眼鳟	0.2-0.4	0.2	0.3-0.6

(1)越冬期。鱼类对水温的变化非常敏感,能随着水温的升降主动选择适宜的栖息场所。冬季天然径流减少,水温下降,鱼类新陈代谢减缓,常选择水底或河床等温度条件相对适宜的水区越冬。赤眼鳟越冬期对流速要求较低,可将鱼类的感应流速  $0.2\text{m/s}$  作为越冬期流速下限。越冬期于 3 月下旬结束,鱼类对流速需求逐渐增大。

(2)产卵期。赤眼鳟繁殖季节为 4 月下旬~8 月上旬,其中 6~7 月为盛产期,产卵对流速要求高,据赤眼鳟产卵场的调查显示,其产卵场平均流速通常为  $0.5$ ~ $0.7\text{m/s}$ 。6、7 月为赤眼鳟产卵旺季,流速的需求于 6 月达到最大,为  $0.66\text{m/s}$ ,7 月底产卵期临近结束,所需流速降至  $0.5\text{m/s}$ 。

(3)肥育期。肥育期通常发生与产卵期之后,大部分鱼类产卵期停止摄食,因而产卵之后对食物的需求非常迫切。肥育期可进一步分为鱼苗的育幼期和成鱼的肥育期。赤眼鳟受精卵属漂流性卵,比重略大于水,在动水

中呈悬浮状态,静水情况立刻下沉,孵化时间通常为 13~24h;孵化后的仔鱼顺江而下,进入水流平缓、饵料丰富的水体中肥育。肥育期鱼类对流速需求适中,可参照鳊鱼肥育期流速适宜度曲线,肥育期流速范围为 0.3~0.6m/s。8 月份赤眼鳟进入肥育季节,其对流速需求有所降低,流速于 9 月上旬逐渐降至 0.3m/s,并一直维持至 11 月。

### 3 研究方法

本研究提出的适宜水力学指标法是一种综合湿周法和生物需求法的生态流量计算方法。该方法基于河道生态保护目标,分别运用湿周法和生物需求法计算生态流量,根据河道生物系统的需求,选取两种计算结果的上限值作为河道适宜生态流量。

#### 3.1 湿周法<sup>[13]</sup>

湿周法是目前国内外较为常用的计算生态流量的水力学方法,其关键在于建立单一、稳定的湿周~流量关系,关系曲线中的拐点流量可作为最小生态流量。该方法受河道断面形状影响很大,要求河床形状稳定。

建立湿周~流量关系,假设水流满足曼宁公式,则湿周可由曼宁公式推求而得:

$$Q = \frac{S^{1/2} A^{5/3}}{n P^{2/3}} \quad (1)$$

式中:Q 为流量(m<sup>3</sup>/s);S 为水力坡度;n 为糙率;A 为过水断面面积(m<sup>2</sup>);P 为湿周(m)。为在确定突变点时消除对坐标轴比例的影响,一般需要将流量和湿周进行标准化,映射到[0,1],即采用相对湿周 P<sub>相</sub>(实际湿周 P 与最大流量所对应湿周 P<sub>max</sub> 的比值)与相对流量 Q<sub>相</sub>(实际流量 Q 与最大流量 Q<sub>max</sub> 的比值)绘制湿周-流量关系曲线。

目前确定湿周与流量关系曲线突变点的方法主要有斜率法及曲率法。本研究选取曲率法来确定突变点。令曲率对流量的一阶导数为 0,其对应的流量值为河道最小生态需水量。根据曲率的定义,曲率 K 的表达式为:

$$K = \frac{\partial^2 P_{相}}{\partial Q_{相}^2} \left[ 1 + \left( \frac{dP_{相}}{dQ_{相}} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (2)$$

#### 3.2 生物需求法<sup>[9]</sup>

生物需求法重点分析水体运动指标中对鱼类繁殖影响较大的因素——流速,根据流速~流量关系确定适宜鱼类生存的最小流量。

流速~流量关系的建立。流速法的关键在于绘制单一、稳定的流速-流量关系曲线,在水文站资料缺失的情况下,河道断面平均流速可根据曼宁公式推求:

$$v = n^{-1} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

式中:n 为河道底部糙率;R 为水力半径,当河道宽深比较大时,水力半径 R 可由平均水深代替;S 为水力坡度。

生态流速的选取。查阅鱼类资料,选定各大江河主要经济鱼类作为生态保护目标鱼类,调查研究目标鱼类的生活习性及其产卵、洄游不同时段的良好流速,结合天然河流自然节律变化,确定各阶段生态流速阈值,并在流速~流量关系曲线上选定满足生态流速的河道生态需水量。

### 4 分析与讨论

#### 4.1 湿周法计算结果

本文从《中华人民共和国水文年鉴-珠江流域水文资料(北江区)》及广东省水文局等部门收集了犁市站 1956~2016 年共 61a 的逐月流量资料和 2016 年的实测大断面水位、流速及流量资料。

根据犁市(二)站 2016 年的实测大断面资料,可得出水文断面图(见图 2)。水位~流量及相对湿周~水位关系见图 3。经计算,犁市站湿周~水位曲线采用三次多项式拟合效果最好。由图 3 可知犁市站湿周~水位曲线拐点不太明显,根据宋兰兰等<sup>[16]</sup>的研究成果,“突变点”基本在平均水位下湿周的 80%左右,因此本次采用 80%湿周率对应的水位作为临界值。结合犁市站水位~流量关系,计算出犁市站生态流量为 49.55m<sup>3</sup>/s,占多年平均流量的 26.0%。

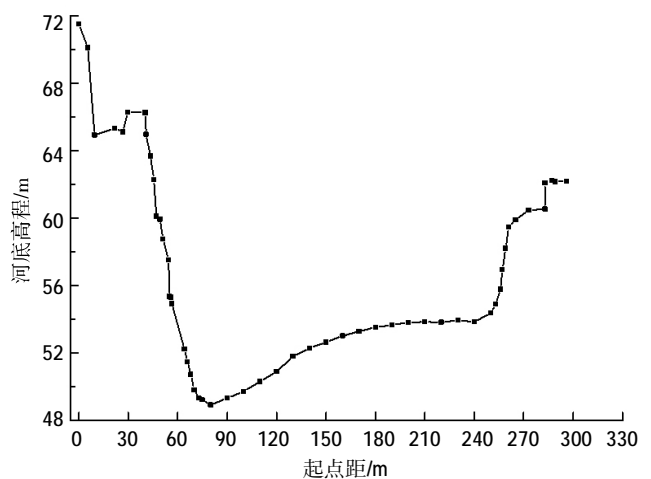


图 2 犁市(二)水文站断面  
Fig.2 The section of Lishi hydrological station

#### 4.2 生物需求法计算结果

根据实测的流速与流量序列,建立犁市(二)站的流量~流速关系曲线(见图 4)。根据流量~流速关系曲



表3 Tennant法对栖息地质量和流量关系的描述  
Table3 The description of relationship between habitat quality and discharge by Tennant method

流量及相应栖息地的定性描述	最大	最佳范围	极好	非常好	好	中	最小	严重退化	极好
推荐基流标准(平均流量百分比)	一般用水期(10-3月)	200	60-100	40	30	20	10	10	<10
	鱼类产卵育幼期(4-9月)	200	60-100	60	50	40	30	10	<10

4.4 生态流量合理性分析

Tennant 法<sup>[7]</sup>是目前应用最广泛的水文学方法,其通过对美国的多条河流进行实地研究,建立起流量与相应条件下栖息地的定性关系(见表3)。

为验证本方法的计算结果是否符合实际,将适宜水力学指标法计算结果与水文学法中的 Tennant 法所得结果相比较,比较结果见图6。由图6可知,10月~次年3月,适宜水力学指标法的计算结果介于 Tennant 法标准的“非常好”与“好”之间;4月及7月份,适宜水力学指标法的计算结果与“极好”标准相近;5月及6月份适宜水力学指标法的计算结果介于“最佳”与“极好”之间,而8月介于“好”与“中”标准、9月介于“中”与“最小”标准之间。综上分析可得,本研究提出的适宜水力学指标法计算结果符合 Tennant 法河流生态用水标准,且以代表鱼类为生态保护目标,能更好地反应鱼类生活习性及其河流的季节性变化。同时根据《河湖生态环境需水计算规范》(SL/Z712-2014),南方中小河流基本生态环境需水量的参考阈值为地表水资源量的15%~25%,目标生态环境需水量的参考阈值为地表水资源量的50%~60%,本次计算结果中,生态流量占多年平均流量的10%~60%,且绝大多数时间均在20%以上,因此计算结果符合规范的要求。

5 结论

本研究采用综合湿周法与生物需求法的适宜水力学指标法,选取北江特有珍稀鱼类省级自然保护区内的赤眼鲮为生态保护目标,根据湿周、流速与流量的关系,求得代表鱼类不同生长周期的适宜生态流量,主要结论如下:

(1)鱼类在越冬期、产卵期、肥育期对水流的需求有所差异。越冬期对流速的要求较低,流速下限为0.2m/s;产卵期为繁殖季节,所需流速较大,平均流速通常为0.5~0.7m/s;于6月达到最大流速(0.66m/s);肥育期对流速需求适中,流速范围为0.3~0.6m/s。

(2)根据鱼类适宜水力学指标法的计算结果,可得产卵期河道生态流量为116.3~150.3m<sup>3</sup>/s,越冬期与肥育期中后阶段生态流量为49.55m<sup>3</sup>/s;肥育期初期(8月)生态流量为71.97m<sup>3</sup>/s。计算结果均符合 Tennant 法

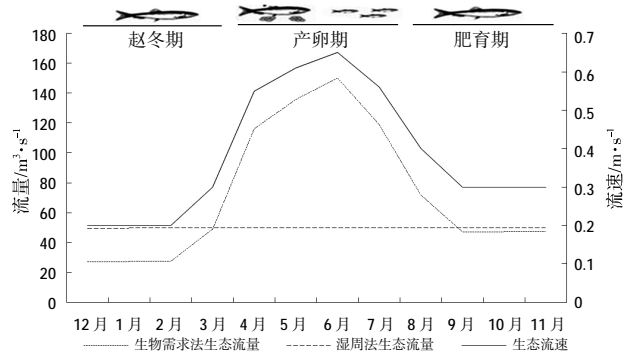


图5 鱼类适宜水力学指标法的生态流量计算结果  
Fig.5 The calculating results of ecological discharge based on fish-suitable hydraulic index method

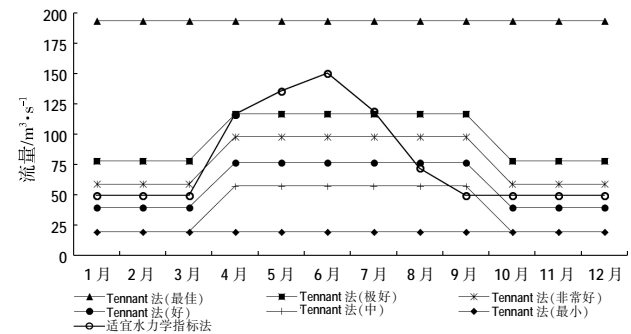


图6 适宜水力学指标法与Tennant法生态流量计算结果比较  
Fig.6 The comparison of ecological discharge between appropriate hydraulic index method and Tennant method

河流生态用水标准。

本文针对鱼类在不同生命周期内对生态流量的需求从方法上进行了一定的探索,新提出的鱼类适宜水力学指标法尚存在一定程度的局限性,例如此方法只适用于存在单一流速~流量关系的河道,对网河区及河口区的河流并不适用,此方法在今后的研究中尚需进一步丰富与完善。

参考文献:

[1] 董哲仁,赵进勇,张晶. 3流4D连通性生态模型[J].水利水电技术, 2019,50(6):134-141. (DONG Zheren,ZHAO Jinyong,ZHANG Jing. Three types flows via four dimensional connectivity ecological model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019,50(6): 134-141. (in Chinese))

[2] Xue L, Yang F, Yang C, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River basin, China [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):1-12.

- [3] Zhao C, Yang S, Liu J, et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: a practical method for streamflow regulation and pollution control [J]. *Water Research*, 2018,141:96-108.
- [4] Zhang Q, Zhang Z, Shi P, et al. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River basin, China [J]. *Global & Planetary Change*, 2018,160:61-74.
- [5] Tharme R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. *River Research and Applications*, 2003,(19): 397-441.
- [6] 孙涛,徐静,刘方方,等.河口生态需水研究进展[J]. *水科学进展*, 2010,21(2): 282-288. (SUN Tao, XU Jing, LIU Fangfang, et al. Advances in the assessment of ecological water requirements in estuaries [J]. *Advances in Water Science*, 2010,21(2): 282-288. (in Chinese))
- [7] Knight R R, Murphy J C, Wolfe W J, et al. Ecological limit functions relating fish community response to hydrologic departures of the ecological flow regime in the Tennessee River basin, United States [J]. *Ecohydrology*, 2015,7(5):1262-1280.
- [8] 刘贵花,朱婧瑄,熊梦雅,等.基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究[J].*水文*, 2016,36(1):51-57. (LIU Guihua, ZHU Jingxuan, XIONG Mengya, et al. Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at Meigang station of Xinjiang River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2016,36(1):51-57. (in Chinese))
- [9] 李梅,黄强,张洪波,等.基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J].*水利学报*, 2007,38(6):738-742. (LI Mei, HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, et al. Determination of ecological water demand based on necessary flow depth and velocity for specific ecological function [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,38(6):738-742. (in Chinese))
- [10] 齐悦,龙玉桥,卢文喜.大凌河流域河道生态需水量估算[J].*水文*, 2008,28(4):46-49. (QI Yue, LONG Yuqiao, LU Wenxi. Estimation of ecological water requirement in Dalinghe River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008,28(4):46-49. (in Chinese))
- [11] Marc V, Rodney K, Sandra P, et al. Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics [J]. *Water*, 2015,7:2358-2381.
- [12] 葛金金,彭文启,张汶海,等.确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法—以沙颍河周口段为例[J].*南水北调与水利科技*, 2019,17(2):75-80. (GE Jinjin, PENG Wenqi, ZHANG Wenhai, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river: a case study of Zhoukou hydrological station in Shaying River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019,17(2):75-80. (in Chinese))
- [13] 钟华平,刘恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述[J].*水科学进展*, 2006,17(3):430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. *Advances in Water Science*, 2006,17(3):430-434. (in Chinese))
- [14] 侯婷娟,高耶.资水河道内生态需水量研究[J].*水文*, 2019,39(5):40-44. (HOU Tingjuan, GAO Ye. Analysis of ecological water demand in Zishui River channel [J]. *Journal of China Hydrology*, 2019,39(5):40-44. (in Chinese))
- [15] 水利部南京水利科学研究所.鱼道[M].北京:电力工业出版社,1982. (Nanjing Hydraulic Research Institute of Ministry of Water Resources. *Fish Way* [M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982. (in Chinese))
- [16] 宋兰兰,陆桂华,刘凌.湿周法的改进和应用[J].*水利水电技术*, 2007,(10):13-16. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Application and improvement of wetted perimeter method [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007,(10):13-16. (in Chinese))
- [17] 徐志侠,陈敏建,董增川.河流生态需水计算方法评述[J].*河海大学学报:自然科学版*, 2004,32(1):5-9. (XU Zhixia, CHEN Minjian, DONG Zengchuan. Comments on calculation methods for river ecological water demand [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004,32(1):5-9. (in Chinese))

## Research on Ecological Discharge Based on Ecological Protection Objective in the Wujiang River Basin GAO Xueshan<sup>1,2</sup>, GUAN Shuai<sup>3</sup>, LIU Shufeng<sup>3</sup>, FENG Ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Water Resources Department of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China;  
3. Guangdong Research Institute of Water Resource and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** Based on the biodiversity and species characteristics in the Wujiang River, this paper proposed an appropriate hydraulic index method to calculate the required ecological flow to maintain its ecosystem stability. It took the representative fish as the ecological protection target, and obtained the ecological discharge of fish in different life periods according to the relationship between wetted perimeter, velocity and discharge. The results indicate that (1) the lower limit of flow velocity required for fish in the winter period is 0.2m/s, the average flow velocity in the spawning period is 0.5~0.7m/s, and the flow velocity range in the fattening period is 0.3~0.6m/s; (2) the ecological flow is 116.3~150.3 m<sup>3</sup>/s during the spawning period, 49.55m<sup>3</sup>/s in the winter and middle and late stage of fattening periods, and 71.97m<sup>3</sup>/s in the early stage of fattening period; (3) the method takes the maintenance of a better habitat condition as the goal of ecological protection, and the calculated results are in line with the Tennant method standard. In addition, the results could better reflect the changes of river abundance and drought.

**Key words:** ecological protection objectives; appropriate hydraulic index method; ecological flow; Wujiang River