

# 基于栖息地模型的新安江坝下生态流量研究

刘国民<sup>1</sup>, 姜翠玲<sup>1</sup>, 王维琳<sup>1</sup>, 巩风田<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 山东省农业广播电视学校 菏泽市分校, 山东 菏泽 274000)

**摘要:** 通过水力学模型与物理栖息地模型的耦合建立,揭示水文水力学与河流生物生命过程的响应关系,探索水生生物最佳生境所需的生态流量,为构建系统理论提供依据。基于物理栖息地模型,运用 MIKE 21 二维水力学模型模拟新安江坝下江段不同流量条件下的水深、流量分布,利用 PHABSIM 栖息地模型作出流量 - WUA 关系曲线,并得出虹鳟鱼适宜生态流量为 160 m<sup>3</sup>/s,该值介于 tennant 评价标准极好与最佳之间,分析认为该计算结果更为合理,可为虹鳟鱼的保护和新安江水库的生态调度提供参考。

**关键词:** 生态流量; MIKE21; PHABSIM 模型; 虹鳟鱼; 数值模拟; 生态调度

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0061-05

## Study on ecological flow under Xin'An River dam based on habitat model

LIU Guomin<sup>1</sup>, JIANG Cuiling<sup>1</sup>, WANG Weilin<sup>1</sup>, Gong Fengtian<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Agricultural Broadcasting and Television School in Shandong Province(The Heze City Branch), Heze 274000, China)

**Abstract:** The coupling of hydraulic model and physical habitat model is used to demonstrate the response relation between hydraulics and biological life process in Xin'An River, and also to explore the optimal habitat of aquatic organisms and provide the gist in establishing a system theory. Based on the model of physical habitat, the paper simulated the water depth and flow distribution of Xin'An River under different flow conditions by MIKE 21 - two - dimensional hydraulic model. The curve of flow - WUA is drawn by PHABSIM model, which shows that the appropriate ecological flow of rainbow trout is 160 m<sup>3</sup>/s. The value is between very good and the best line. The calculated result is reasonable and can provide reference for the protection of rainbow trout and the ecological scheduling of Xin'An river reservoir.

**Key words:** ecological flow; MIKE21; PHABSIM model; rainbow trout; numerical simulation; ecological scheduling

随着人类的发展需求,一大批水电站、引水工程的投入运行,使得河流遭到人为因素的干扰,下泄流量若没有达到生物的需求,将会在很大程度上影响水工建筑物下游的生态系统<sup>[1-2]</sup>。为应对此类问题,越来越多的学者开始关注保持生物系统稳定的方式,关于生态流量的研究在近几十年便不曾间断<sup>[3-6]</sup>。生态流量的概念最早是由美国渔业与野生生物保护组织在 20 世纪 40 年代提出的,指防止河道生态系统退化的最小流量<sup>[4]</sup>。生态流量对生态环境系统功能的影响重大,生态流量的减少会造成

不可逆转的生态破坏,若无法保证生物在关键时期的生态流量,将会影响流域水生生态系统<sup>[4-6]</sup>。常见的计算河流生态流量方法有水文水力学法、生态环境法和整体分析法<sup>[4-6]</sup>。水文水力学方法注重水文资料和水力资料的运用,得出的生态流量缺乏生态学意义<sup>[7]</sup>,但生态环境法中的河道内流量增加法(IFIM 法)以栖息地模型方法为核心,把栖息地生物对水深、流速等水文要素的喜好性纳入考虑,之后通过建立流量与栖息地面积之间的关系找到最优生态流量,越来越得到生态学者的重视<sup>[8-15]</sup>。PHABSIM

收稿日期:2016-02-25; 修回日期:2016-04-06

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-013-02)

作者简介:刘国民(1992-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事生态水文与水环境修复方面研究。

通讯作者:姜翠玲(1966-),女,山东青岛人,博士,教授,博士生导师,主要从事水生态环境保护的理论和方法研究。

模型是目前应用最为广泛的栖息地模型,部分学者选取不同的指示鱼种,将 HEC - RAS、Delft3D、MIKE11 等水力学模型与 PHABSIM 栖息地模型相耦合<sup>[13-15]</sup>,利用水力学模型更加精确地确定了河流的水深流速,从而更好地计算出最佳生境流量作为生态流量推荐值。栖息地模型方法能够从生物角度出发,考虑鱼类对水体流速、水深以及底质的要求,体现出生态流量的生物学意义,应用前景广泛。

我国生态水利发展要求,需将生态因素考虑到水利工程的建设中,但水文水力学与河流水生生物生命过程响应关系的理论基础仍处于构建阶段<sup>[16]</sup>。因此本文旨在通过水力学模型与物理栖息地模型的耦合建立,揭示水文水力学与河流生物生命过程的响应关系,探索水生生物最佳生境所需的生态流量,为构建系统理论提供依据。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

钱塘江流域水系干流自上而下有新安江、富春江和钱塘江。新安江发源于安徽省黄山西南麓,经安徽省南部边界、浙江省淳安等县境,穿行新安江水库,经建德市城西南,在梅城镇东汇合兰江水系后,东流称富春江,后经桐庐、富阳至萧山闻家堰,与浦阳江汇合后称钱塘江,东流经杭州湾入东海。新安江、富春江、钱塘江素来便是著名的鱼产地,鱼类资源丰富。1959 年新安江水库建成,平均水深 34 m,库容量  $178.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1968 年,富春江水库建成发电,水库正常高水位 23 m,库容  $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。两座水库落成运行后,新安江坝下江段由山溪性河流变成低温而缓流性水域,其上下游边界分别受到新安江电站大坝以及富春江电站大坝下泄流量的控制,其间有寿昌江、兰江等两条主要支流汇入。该河段河床狭长,属河道型水库,总长约 66 km,河宽平均约 400 m,最宽处约 1 000 m,水深平均约 10 m。底质特点为兰江汇入前的新安江段多为石块、卵石;而富春江段以卵石及沙底居多。目前耐低温鱼类,虹鳟鱼、鲫鱼、鲤鱼、草鱼、蒙古红鲌、银鲌、鳊、蛇等在此栖息,生长情况良好。

千岛湖引水工程是浙江省的一项重大水资源配置工程,工程拟从千岛湖淳安县境内的金竹牌取水,采用重力流方式,通过输水隧洞和管道将千岛湖优质水直接输送至杭州市区及沿线的建德、桐庐、富阳部分区域。工程实施后,进入下游河道的总水量将减少,可能对下游河道的水文情势产生影响,尤其是

生态流量会受到很大的影响<sup>[1]</sup>。引水工程拟年引水  $9.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占多年平均入库流量的 9.5%,如此大的流量损失必然会对下游河段造成一系列的影响,由此需计算下游河道的生态流量以指导水电站的优化调度。

研究区为新安江大坝坝下的低温水域,研究范围上至新安江水库大坝,下至富春江水库大坝,区间内主要支流为寿昌江、兰江等。其主要的生态目标就是保证鱼类的正常繁殖生长。根据新安江坝下白沙和梅城自来水厂两个监测断面 2004 - 2011 年监测均值分析,新安江坝下水质为 I ~ III 类(不计总氮)。研究河段水质基本良好,所以水质不是研究区鱼类栖息地的限制因素,而流速、水深等水文要素才是该研究区主要的限制因素,因此本文主要通过物理栖息地模型研究鱼类产卵场河段的生态流量。

### 1.2 计算方法

PHABSIM 模型主要分为水力学模型和栖息地模型两部分<sup>[11]</sup>。水力学模型主要通过对数 - 对数回归法(L - L 法)、渠道输送法(C - C 法)、步推回水法(S - B 法)推估流速分布,速度算法(1 - Vel Calibration)、速度回归算法(Regression Calibration)、水深算法(Depth Calibration)推估水深分布。栖息地模型通过建立栖息地对象物种的适应度曲线,依据不同流量下的断面流速与水深分布,找出对应的栖息地适应度指数,赋予各自权重之后计算出可使用的栖息地面积(WUA)。本文运用 MIKE21 二维水力模型模拟不同流量条件下的流速、水深分布,用 PHABSIM 模型建立流量 - WUA 的关系曲线图并选取最小生态流量和最适宜生态流量。

1.2.1 目标物种的适宜度曲线 建立流速、水深与栖息地生物之间的适应度曲线关系。新安江大坝建成之后,坝下 15 km 水域水温常年较低且水质状况良好,目前适宜养殖虹鳟鱼。虹鳟鱼为引进鱼种,但其生长迅速,肉质鲜美,该江段成为鱼种供应基地,给当地带来了巨大的经济创收,且适宜该研究区低温条件的土著鱼类较少,所以该段选取虹鳟鱼作为目标物种。根据相关鱼类专家研究和文献专著介绍<sup>[17-21]</sup>,鱼类克服流速能力受其体型、体长等影响,各种鱼类的感应流速多在 0.2 m/s 左右,适应流速为 0.3 ~ 0.6 m/s。虹鳟鱼稚鱼体长约 1.7 ~ 5 cm,一龄鱼体长约 25 ~ 38 cm,成鱼体长约 43 ~ 50 cm。根据虹鳟鱼养殖发展研究概况<sup>[19]</sup>获悉,虹鳟鱼在流速 0.02 m/s 即可适宜生存,综合考虑虹鳟鱼不同生长时期分布情况,建议其适宜流速应在 0.02 ~ 0.4

m/s。水深条件上,过深或过浅的水深都不适宜鱼类的移动,故考虑虹鳟鱼体长将水深限定在6 m以上。根据以上相关资料,建立了比较粗糙的水深、流速适宜度曲线,如图1、2。

1.2.2 水力学模型 本文主要使用 MIKE 21 的二维水动力学模块,该模块可模拟河流的水位变化和由于各种力的作用而产生的水流变化。本次研究区选取为新安江坝下的低温水域,计算范围上至新安江水库大坝,下至富春江水库大坝,区间内主要支流为寿昌江、兰江等。首先进行模型的参数率定,其上边界采用流量边界,选取新安江水库2011年1月1日至2月10日逐日下泄流量;下边界采用水位边界,选取富春江水库对应的逐日水位;兰江采用固定流量边界,

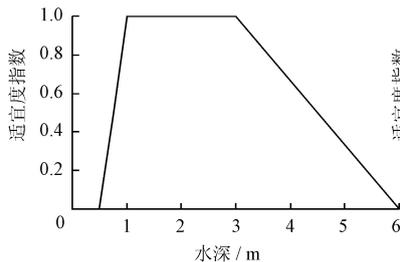


图1 虹鳟鱼水深-适宜度指数关系曲线

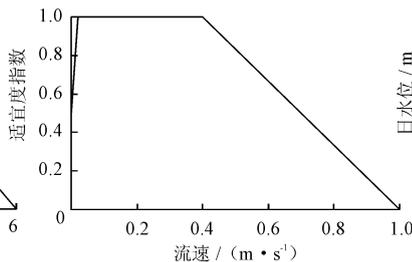


图2 虹鳟鱼流速-适宜度指数关系曲线

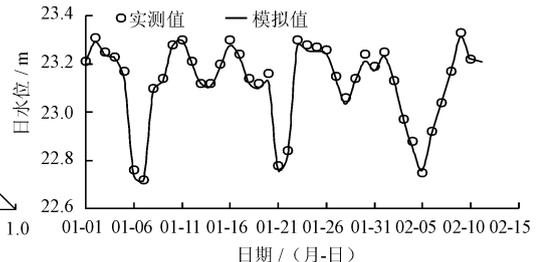


图3 2011梅城站逐日水位实测与模拟对比图

1.2.3 栖息地模型 根据 MIKE 21 模型模拟了不同流量条件下河段的水深、流速分布,再结合虹鳟鱼适宜度曲线,可获得各个网格流速、水深对应的适宜度指数,由计算公式(1)可计算出整个栖息地的加权可利用面积  $WUA$ 。

$$WUA = \sum_i F[f(V_i), f(D_i), f(C_i)] \cdot A_i \quad (1)$$

式中:  $A_i$  为研究河段第  $i$  个网格的水域面积;  $F[ ]$  为第  $i$  个网格的组合适宜度因子 (combined suitability factor, 简称  $CSF$ );  $f(V_i)$ ,  $f(D_i)$ ,  $f(C_i)$  分别为第  $i$  个网格的流速、水深、河床底质适宜度值。由于新安江坝下缺乏一定的实测资料,本文中默认该区域底质状况好,并将  $f(C_i)$  设为 1。

对于  $CSF$  的计算,PHABSIM 模型提供了 4 种方法,分别为加权平均法、最小值法、乘积法和几何平均法。加权法是依据专家的决策对研究区的流速、水深、底质适宜度值各自加权相加,最小值法是取该研究区最小适宜度值最为  $CSF$  值,几何平均法是对 3 种适宜度值的乘积做三次开方处理,乘积法假设 3 种适宜度值影响力相同。本文采用乘积法,公式如下:

$$CSF = f(V) \cdot f(D) \cdot f(C) \quad (2)$$

1.2.4 流量- $WUA$  关系 根据新安江坝下多年(1961-2012年)平均径流量为  $324 \text{ m}^3/\text{s}$ ,且多年水

取多年年平均流量值  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ ;寿昌江多年平均汇入流量较其他远小,故而忽略。梅城站对应逐日水位数据与模拟值对比如图3所示,可见模拟数值比较理想,该模型可用于水位、流速的模拟。在实际模拟中,新安江坝下多年(1961-2012年)平均径流量为  $324 \text{ m}^3/\text{s}$ ,且多年水库下泄流量约在  $0 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  之间,按比例选取了 24 个流量条件,将其作为上边界;下边界采用水位边界,由于富春江水库正常蓄水位为 23.0 m,水库的坝前设计消落深度仅 0.2 m,坝前水位变化较小,因此进行简化,将坝址处的计算水位定于 23.0 m;其他条件不变。主要选取新安江坝下一段 3km 河长作代表分析,该段是虹鳟鱼主要栖息地,并将其划分为 22 个四边形网格。

库下泄流量约在  $0 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  之间,按比例选取了 24 个流量条件计算出了各网格不同的流速、水深,利用栖息地模型中的公式(1)和(2)计算出各流量条件下的  $WUA$  值,并绘出流量- $WUA$  关系曲线图。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 计算结果

PHABSIM 模型中假设  $WUA$  与鱼类生物量成正相关关系,即  $WUA$  值越大,鱼类的生物量也就越多,所以本文选取流量- $WUA$  关系曲线图中  $WUA$  值最大时对应的流量作为最适宜生态流量,可得其流量为  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流量- $WUA$  关系曲线图见图4。一方面,流量增大之后可用栖息地面积基本不变,若流量过大可能造成洪水灾害,在一定程度上并不适宜生物生存,故可用栖息地面积必然降低。另一方面,在水库调度过程中,由于考虑水电站的经济效益,下泄流量往往不会太大。新安江坝下多年(1961-2012年)平均径流量为  $324 \text{ m}^3/\text{s}$ ,且多年水库下泄流量约在  $0 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  之间,超过此流量区间并不在本次模拟范围内,故并未作出更大流量下的可用栖息地面积 ( $WUA$ )。综合两方面因素,本文取其生态流量值为  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

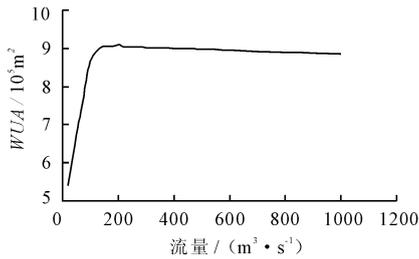


图4 流量 - WUA 关系曲线

## 2.2 分析与讨论

本次在新安江大坝坝下运用 MIKE21 模型和 PHABSIM 模型计算出的最适宜虹鳟鱼栖息的生态流量值为  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在此流量值区间内,虹鳟鱼的物理栖息地面积呈最大状态。虽然随着流量的增大,物理栖息地的面积也很大,但是呈降低趋势,而且生态流量越大对水库的发电调度可能产生影响,降低经济效益,故计算出的适宜生态流量值宜在合理范围内取小值。

虹鳟鱼主要产卵时间为冬季和早春,对应的月份应为 10 月至次年 3 月。为了评价计算结果的合理性,本文将该结果与 Tennant 法得出的结果进行对比。Tennant 法检验值如表 1 所示。可见,由 MIKE21 模型和 PHABSIM 模型计算出的生态流量值介于极好与最佳之间。但是利用 Tennant 法计算出的生态流量值范围过大,最佳流量在丰水期可以满足,在虹鳟鱼产卵繁殖时期很难满足,而由 MIKE21 模型和 PHABSIM 模型计算出的生态流量值小于最佳流量,且其计算结果是利用栖息地目标生物流量与面积关系所得,考虑了水深、流速、断面条件等要素,其值更加可信可靠,故本文建议 10 月至次年 3 月最佳生态流量取值在  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最低生态流量不低于 Tennant 法评价标准“好”即  $64.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时的物理栖息地面积占最大物理栖息地面积的 81%,应能适宜虹鳟鱼产卵,对其影响不大。

表1 Tennant method 检验值  $\text{m}^3/\text{s}$ 

时间段	好	非常好	极好	最佳
10月 - 次年3月	64.8	97.2	129.6	194.4 ~ 324
4月 - 9月	129.6	162.0	194.4	194.4 ~ 324

表 2 为虹鳟鱼主要产卵时间的引水前新安江水库多年平均和 90% 枯水代表年的月下泄流量,生态流量取值  $64.8 \sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$  可知,引水前多年月平均下泄流量满足其最佳生态流量,可为虹鳟鱼生存提供最佳栖息地生境;但 90% 枯水代表年中,1、2、3、

10 月均满足其最佳栖息地生境要求;11 月下泄流量也能非常好地满足其生境要求,此时的物理栖息地面积占最大物理栖息地面积的 93%;12 月平均下泄流量仅为  $42.24 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时物理栖息地面积占最大物理栖息地面积的 70%。由此可见,调水前枯水年的枯水期仍有部分月份尚未达到最佳的生物栖息地生境,有可能会对虹鳟鱼等水生生物的生存造成一定影响。若按照现有调度方式进行水库调度,调水后下泄水量总体将减少,难免会对虹鳟鱼等水生生物在产卵繁殖期的最佳栖息地生境造成更大的影响,所以建议优化水库调度方案,重点保障枯水年的枯水期下泄流量,以期满足虹鳟鱼在产卵繁殖期的栖息地生境要求。

表2 引水前新安江水库月平均下泄流量  $\text{m}^3/\text{s}$ 

下泄流量	月份					
	1	2	3	10	11	12
多年平均	262.45	341.59	310.97	246.48	243.90	239.66
90% 枯水代表年 (2005年)	221.20	211.70	287.38	231.87	93.80	42.24

## 3 结论

(1) 生态流量对于河流生态环境系统的重要性不言而喻,生态流量的增加或者减少都会影响河流生态环境系统。千岛湖引水工程建成之后必然造成下泄水量的减少,生态流量作为生物赖以生存的保障必须科学制定,由此指导水电站的优化调度。

(2) 本文基于物理栖息地模型,制定了虹鳟鱼的水深、流速适宜度曲线,运用 MIKE21 二维水力学模型模拟了研究区 24 个流量条件下的水深、流速分布,利用 PHABSIM 模型作出流量 - WUA 关系曲线,并得出虹鳟鱼适宜生态流量为  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ,该结果比普通水文学方法要更加合理可靠。最低生态流量不低于 tennant 法评价标准“好”,即  $64.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时的物理栖息地面积占最大物理栖息地面积的 81%。对比引水前新安江水库月平均下泄流量,建议优化水库调度方案,重点保障枯水年的枯水期下泄流量。该结果为引水后新安江大坝的生态调度提供了参考,也为研究生态流量提供了一种新的方法,同时也在一定层面上揭示了水文水力学与河流生物生命过程的响应关系,为构建系统理论提供了一定依据。

(3) 文章由于缺少一定资料,可能会影响计算结果,因此当在获得更多资料的基础上,有必要制定精确的适宜度曲线,并将水质、底质因素集成一并加

入模型,将模型的多种参数细化,以便作更加深入的研究。然而,对所有河流作栖息地调查成本巨大,笔者主张对重点河流或者优先级较高的河流要进行全面的调查,包括水质水文资料、断面水力资料、水生生物资料等,从而将该模型更加高效地利用于河流生态的保护与修复。

### 参考文献:

- [1] 孙小利,赵云,于爱华,等. 国外水电站生态流量的管理经验[J]. 水利水电技术,2010,41(2):13-16.
- [2] 姜翠玲,严以新. 水利工程对长江河口生态环境的影响[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(6):547-551.
- [3] 倪深海,崔广柏. 河道生态环境需水量的计算[J]. 人民黄河,2002,24(9):37-38.
- [4] 王西琴,刘昌明,杨志峰,等. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展,2002,13(4):507-514.
- [5] 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.
- [6] 陈敏建,丰华丽,王立群,等. 适宜生态流量计算方法研究[J]. 水科学进展,2007,18(5):745-750.
- [7] 杨志峰,于世伟,陈贺,等. 基于栖息地突变分析的春汛期生态需水阈值模型[J]. 水科学进展,2010,21(4):567-574.
- [8] 英晓明,李凌. 河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用[J]. 生态学报,2006,26(5):1567-1573.
- [9] Spence R, Hickley P. The use of PHABSIM in the management of water resources and fisheries in England and Wales [J]. Ecological Engineering,2000,16(1):153-158.
- [10] Garcia-Rodriguez E, Martinez-Austria P F, de Jalon-Lastra DMGD, et al. Physical habitat simulation in a stretch of the Lozoya River using the PHABSIM system [J]. Ingenieria Hidraulica En Mexico,2008,23(4):41-52.
- [11] Wu R S, Mao C T. The assessment of river ecology and habitat using a two-dimensional hydrodynamic and habitat model[J]. Journal of Marine Science and Technology-Taiwan,2007,15(4):322-330.
- [12] 班璇. 物理栖息地模型在中华鲟自然繁殖生态流量决策中的应用[J]. 水生态学杂志,2011,32(3):59-65.
- [13] 张文鸽,黄强,蒋晓辉,等. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. 水科学进展,2008,19(2):192-197.
- [14] 潘明祥. 三峡水库生态调度目标研究[D]. 上海:华大学,2010.
- [15] 李建,夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报,2011,42(6):678-684.
- [16] 姜翠玲,王俊. 我国生态水利研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):168-175.
- [17] 赵希坤,韩桢镔. 鱼类克服流速能力的试验[J]. 水产学报,1980,4(1):31-37.
- [18] 陈马康,童合一,俞泰济,等. 钱塘江鱼类资源[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1990:48-49.
- [19] 王金娜,郇定敏,安苗,等. 虹鳟鱼养殖发展研究概况[J]. 河北渔业,2015,(3):62-65.
- [20] 诸葛亦斯,刘德富,谭红武,等. 鱼类栖息地流速适宜性曲线实验方法[J]. 水利学报,2013,44(z1):1-7.
- [21] 刘稳,诸葛亦斯,欧阳丽,等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究[J]. 水科学进展,2009,20(6):812-817.