

# 基于鱼类生物量法的河道生态需水过程研究及应用

欧阳丽<sup>1</sup>, 诸葛亦斯<sup>2</sup>, 温世亿<sup>3</sup>, 杜强<sup>2</sup>

(1. 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;  
3. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

**摘要:** 河流水资源开发利用与河流生态保护之间矛盾日益突出, 开展生态需水研究已迫在眉睫。提出了一种基于鱼类生物量的河道内生态需水过程确定方法。通过对鱼类栖息地的适宜性分析, 建立了单一目标鱼种特定生命史生物量与河道流量间的关系, 用于计算维持处于特定生命史的目标鱼种一定生物量时的需水量, 同时构建了多目标鱼种和鱼种生命史间的权重关系。针对所有目标鱼种各个生命史所需河道流量, 通过匹配相应的鱼种间、鱼种内权重系数, 要把研究区域河道内鱼类生态需水过程。以雅砻江锦屏河湾减水河段为例, 计算了维持河段鱼类生物量稳定的生态需水量, 并获得对应不同鱼类生物量保护目标的系列生态需水过程线。

**关键词:** 生态需水过程; 栖息地; 鱼类生物量

**中图分类号:** X171, TV 133      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0062-06

## Research and Application of Instream Ecological Water Requirement Based on Fish Biomass Method

OUYANG Li<sup>1</sup>, ZHUGE Yisi<sup>2</sup>, WEN Shiyi<sup>3</sup>, DU Qiang<sup>2</sup>

(1. *Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, in China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, in China*; 3. *Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, in China*)

**Abstract:** The contradiction between the river resource development and ecological protection is becoming increasingly conspicuous, and therefore research on the ecological water requirement is needed. In this paper, a method for determining the river ecological water requirement process based on fish biomass was proposed. Through the suitability analysis of fish habitat, the relationship between the single target fish biomass during the specific life history and the river discharge was developed, which can be used to determine the water demand of the target fish for maintaining a certain biomass amount in the particular biological life history. Moreover, the weight relationship between the multi target fish and the fish life history was established. By matching the needed river discharge for all target fishes in each life history with the corresponding weight coefficients in or among the fish fingerlings, the ecological water requirement process for the regional river was obtained. The method was applied in the water reduced reach of the Jinping Bay in the Yalong River to determine the ecological water requirement to maintain the stable fish biomass in the reach and the ecological water requirement process lines corresponding to different fish biomass conservation.

**Key words:** ecological water demand process; habitat; fish biomass

河道生态需水是指河道内为维持水生生物栖息地生态功能健康、保证水生生物生命过程中各种生理活动正常进行所需的水量。受水生生物种类及其生长、发育、繁殖和河道环境变化特征影响, 河道生态需水具有时空变化性、阈值性、静态性与动态性以及目标性等特征<sup>[1]</sup>。目前, 河道生态需水量计算方法<sup>[2]</sup>主要包括: 水文学法— 在自然状态河流多年水文数据的基础上, 根据简单的水文指标来确定河道生态需

水, 较简单易用, 适用于河道生态需水的初步确定, 但因计算过程完全脱离水生生物需求, 导致水道流的各种水力几何形态参数结果可信度不高<sup>[3]</sup>; 水力学法— 以确定诸如宽度、深度、流速、湿周等河道水力与几何形态参数为基础的计算方法, 并在一定程度上反映水生生物的间接需求水量, 可信度较水文学法有较大的提高; 生物栖息地法— 基于满足具体生物需求的水力条件, 有效地将水生生物信息与河流流量相结

收稿日期: 2013-08-13      修回日期: 2014-04-08      网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金“鱼类趋流行为的水动力触发机制研究”(5109978); “十二五”水专项“重点流域环境流量保障与容量总量控制管理关键技术与应用示范”课题(2013ZX07501-004)

作者简介: 欧阳丽(1983-), 女, 湖北洪湖人, 工程师, 主要从事水利生态方面的工程设计与研究工作。E-mail: ou\_yli@ecidi.com。

合, 计算结果具有一定的说服力<sup>4</sup>。本文尝试提出一种基于鱼类生物量的河道生态需水计算方法, 简称鱼类生物量法, 并以雅砻江锦屏大河湾为例, 通过分析河道内来水过程及其相应栖息地数量、质量, 结合天然鱼类生产力的保护目标, 建立研究区域内河流流量过程与鱼类生物量之间的关系。

## 1 鱼类生物量法原理

### 1.1 基本概念

鱼类生物量法以鱼类栖息地模拟为基础, 计算维持一定数量处于特定生命史的目标鱼种所需的水量, 建立目标鱼种间、鱼种生命史之间的权重关系, 按鱼种及生命史组合的需水量和对应权重关系构建需水过程。

鱼类生物量法基于以下假定<sup>5</sup>: (1) 单位体积的鱼类生物量与栖息地适宜性成正比; (2) 栖息地适宜性是流量的函数; (3) 水深、流速、基质等环境因子变化基于流量变化, 是对鱼类生物量和分布造成影响的主要因素, 彼此间相互影响, 共同确定河流微生物环境条件; (4) 河床形态在整个模拟的过程中保持不变。

鱼类生物量法涉及的相关概念包括: (1) 鱼类栖息地适宜性, 是衡量特定鱼种特定生命史对于生境因子适应程度的量化指标。鱼类栖息地适宜性指标用 0~1 之间的数值表示生境因子(水深、流速、水温、河床基质和遮蔽物)对鱼种的影响, 对于生境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。(2) 天然鱼类生产力, 指在某种特定天然环境里, 水体中各种鱼类对各营养级生物和无机、有机营养物质的转化能力。(3) 生态需水过程, 是指生态需水量的时间序列值, 它兼顾了水文周期变化性和区段水生生物特定生命史的需水动态性。

### 1.2 分析方法与内容

#### 1.2.1 生境要素空间分布模拟

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。某些环境因子的变化对于鱼类存活、分布和丰度的制约作用显著, 被称为生境要素, 如水温、水深、流速、基质和溶解氧等因子。因此模拟生境要素的空间分布情况, 建立生境要素分布与鱼类栖息地数量、质量之间的定量关系, 是确定研究区域鱼类栖息地适宜性的基础, 也是预测研究区域的鱼类种群数量、分布以及动态变化规律的基础。

#### 1.2.2 栖息地适宜性分析

运用栖息地空间范围内生境要素的综合适宜性表征整个栖息地适宜性, 见式(1)。

$$\begin{cases} CSF_i = f_v(v_i) \times f_D(D_i) \times f_C(C_i) \times f_{DO}(DO_i) \times f_T(T_i) \\ CSF_i = (f_v(v_i) \times f_D(D_i) \times f_C(C_i) \times f_{DO}(DO_i) \times f_T(T_i))^{0.5} \\ CSF_i = \text{MIN}(f_v(v_i) \times f_D(D_i) \times f_C(C_i) \times f_{DO}(DO_i) \times f_T(T_i)) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_i$ 、 $D_i$ 、 $C_i$ 、 $DO_i$ 、 $T_i$  表示  $i$  单元内流速、水深、河道指标(包括河床基质和遮蔽物)、溶解氧和水温等生境要素的平均值;  $f()$  是单一生境要素的适宜性函数;  $CSF_i$  表示单元  $i$  中

生境要素的综合适宜性值。

栖息地的质量、数量和分布可通过栖息地适宜性和加权可利用体积  $WUV$  (Weighted Usable Volume) 的数量与分布分别予以表现, 不同鱼种或同一鱼种不同生命史所对应的  $WUV$  特征不相同。 $WUV$  计算见式(2)。

$$WUV = \left( \sum_{i=1}^n CSF_i \times V_i \right) \quad (2)$$

式中:  $WUV$  表示研究区域水体中某鱼种、某生命史可利用体积;  $V_i$  是  $i$  单元水体体积。

#### 1.2.3 天然鱼类生产力计算

研究区域天然鱼类生产力计算公式<sup>6</sup>如下:

$$Pf_N = \frac{\sum (P/B) \times B_{\text{bait}} \times U_{\text{bait}}}{C_{0\text{bait}}} \quad (3)$$

式中:  $Pf_N$  为研究区域的天然鱼类生产力;  $P/B$  系数按饵料种类不同分别选取不同值, 浮游植物、浮游动物和底栖动物的  $P/B$  系数分别为 100、30 和 6;  $B_{\text{bait}}$  为饵料平均生物量;  $U_{\text{bait}}$  为鱼类对饵料的利用率, 本文将鱼类对浮游植物、浮游动物和底栖动物的利用率分别定为 25%、30% 和 50%;  $C_{0\text{bait}}$  为饵料系数, 浮游植物、浮游动物和底栖动物的饵料系数分别定为 40、10 和 2。

#### 1.2.4 生态需水过程确定

美国和欧洲等国的河道内生态需水确定标准是“栖息地加权有效面积 ( $WUA$ , Weighted Usable Area) - 流量关系曲线”中  $WUA$  最大值对应的流量, 或是  $WUA$  最大值的一定百分比对应的流量<sup>9</sup>。此标准虽然能够保证下游鱼类栖息地的生态效益, 但必将造成发电、灌溉等社会效益的损失, 致使河流综合效益降低<sup>7</sup>。本文将鱼类生物量保护目标作为生态需水确定标准, 由于鱼类生物量保护目标与天然鱼类生产力决定实际鱼类生物量, 因此本文以实际鱼类生物量计算对应的实际鱼类栖息地加权可利用体积 ( $WUV$ ), 并通过  $WUV-Q$  曲线量化上游河道下泄流量。对于所有目标鱼种各个生命史所需的河道下泄流量, 通过匹配相应的鱼种间、鱼种内权重系数, 汇总后获得研究区域河道内鱼类生态需水过程。上述生态需水过程数学表达式如下:

$$\begin{cases} Pf_{R_{ij}} = Ta \times Pf_{N_{ij}} \\ WUV_{ij} = F^t(Pf_{R_{ij}}) \\ Q_{ij} = f_{ij}^{-1}(WUV_{ij}) \\ Q^T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij}^T \times Q_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Pf_{N_{ij}}$  为研究区内鱼种  $i$  生命史  $j$  天然鱼类生产力;  $Ta$  为鱼类生物量保护目标, 0~1 的无量纲数;  $WUV_{ij}$  为鱼种  $i$  生命史  $j$  的栖息地加权可利用体积;  $Pf_{R_{ij}}$  为鱼种  $i$  生命史  $j$  实际鱼类生物量;  $F^t$  为鱼产量与鱼类栖息地体积间的关系函数;  $Q_{ij}$  为鱼种  $i$  生命史  $j$  的生态需水量;  $f_{ij}$  为鱼种  $i$  生命史  $j$  的  $WUV-Q$  函数;  $\alpha_{ij}^T$  为鱼种  $i$  生命史  $j$  时段目标  $T$  的权重;  $Q^T$  为河道生态需水过程;  $n$  为鱼种数;  $m$  为划分的鱼种生命史数。

## 2 研究区域概况

四川省雅砻江锦屏二级水电站为长隧洞引水式电站, 它是通过修建拦水闸坝调节锦屏一级下泄水体引水至大水沟厂房进行发电的。引水发电造成猫猫滩闸址至大水沟厂

址间长约 119 km 的河段不同程度减水,使得水深变浅,流速趋小,水温骤变。水文情势的变化又使水生生物的生存空间和生存环境受到影响,栖息地质量锐降,生物量锐减。尤其在枯水季节大部分河段都会断流,对区间河道内生态环境造成极为不利的影响<sup>[8]</sup>。

为保障减水河段具备水生生物栖息地功能,维持河段内水生生物总量,本文选取猫猫滩至磨子沟之间 2.5 km 河段为研究区域,按不同季节对应的水生生物生命史的生境要素需求,确定研究河段生态需水过程。猫猫滩为锦屏二级拦河闸的闸址,磨子沟为锦屏大河湾内,猫猫滩下游第一条主要支流。为剔除支流对水动力学条件的影响,将磨子沟前端段面设为最终段面。整个区域共设置 10 个控制段面,将河道断面图和标志点高程间进行插值计算,得到研究区域三维地形图,见图 1。

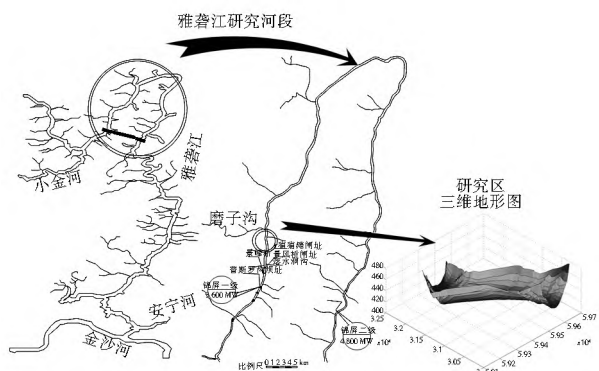


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

### 3 研究区鱼类栖息地模拟

#### 3.1 鱼种研究

##### 3.1.1 目标保护鱼种确定

根据 2007 年-2008 年间对锦屏大河湾减水河段的多次野外考察结果,结合四川师范学院 1991 年-1994 年的调查资料,以及四川大学生命科学学院 2002 年 4 月中旬至 5 月上旬、9 月下旬至 10 月上旬的两次调查结果和其它史料,获得以下数据:锦屏大河湾减水河段中鲤科鱼类占 50% 以上,鳅科占有 15%,其他科类则均少于 10%;裂腹鱼亚科在鲤科中占绝大多数,属优势种;细鳞裂腹鱼(*Schizothorax choragi*)、长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)、鲈鲤(*Percocypris pingi*)等属于四川省重点保护野生动物,雅砻江鱼类中并无国家Ⅰ、Ⅱ级保护的珍稀鱼类;裂腹鱼、鲈鲤肉质鲜美,经济价值占优,是当地主要的经济鱼类。

综合调查结果,本文将细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤定为目标保护鱼种。

##### 3.1.2 目标鱼种生命史的确定

鱼类生命史可以划分为不同阶段:卵(egg)、仔鱼(larva)、稚鱼(juvenile)、幼鱼(young)、成鱼(adult)、衰老期(aged or senility)。考虑到不同鱼类生长阶段对环境的敏感程度差异和便于计算,考虑到目标鱼种不同生命史对流量的敏感程度,本文将生命史简化为三个阶段,分别为产卵期、稚鱼

期、幼鱼期。产卵期是鱼类个体在卵膜内进行发育的时期,是鱼类繁衍的关键时期;稚鱼期是体形迅速趋近成鱼的时期,是鱼类早期生命史的代表时期;幼鱼期是从幼鱼能独立觅食开始,经历着鱼体的长度、重量不断增长、内脏器官及生理功能不断变化的过程,生活习性与成鱼大致相同且对环境变化更为敏感。这三个时期鱼类的生物学习性不尽相同,且具有明显的生境要求。

#### 3.2 鱼类栖息地适宜性分析

根据前文研究方法,得到四季温度条件下,细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼、鲈鲤不同生命阶段的栖息地适宜性与来水条件的关系曲线,即共计 36 条加权可利用体积-流量( $WUV-Q$ )关系曲线,见图 2。

### 4 研究区域生态需水过程确定

#### 4.1 天然鱼类生产力计算

对雅砻江下游的调查显示,鱼类饵料以毛翅目、浮游目幼虫最多,生物量亦最大;浮游动物以龟甲轮虫的钗水蚤为优势种,动物量 0.27~0.79 万个/L(12.42~36.34 g/m<sup>3</sup>);雅砻江 6 月-9 月浮游植物生物量约为 100~300 万个/L(0.37~1.1 g/m<sup>3</sup>);雅砻江锦屏河湾底栖无脊椎动物的春季生物量为 1.552 g/m<sup>3</sup>,冬季生物量为 0.623 g/m<sup>3</sup>,平均生物量为 1.088 g/m<sup>3</sup>。

经公式(3)计算,得到猫猫滩闸址至磨子沟河段的天然鱼类生产力总量共计 22 190.16 kg。邓其祥<sup>[9-10]</sup>等于 1990 年-1994 年,先后 8 次到锦屏一二级水电站影响区干流调查鱼类资源,鲈鲤捕获量占总量的 3.53%;细鳞裂腹鱼占总量 0.34%;长丝裂腹鱼占总量 30% 左右。于 2007 年 4 月与 2008 年 6 月分别调查发现,目前鱼类生物总量与 20 世纪 90 年代相比有所下降,但各目标鱼种间的比例基本保持一致,但细鳞裂腹鱼比重有所提高,长丝裂腹鱼有所减少。综合已有文献和野外调查结果,细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤的生物量比例为 1:10:4,分别占总生物量的 2.4%、24%、9.6%,据此推算研究区内细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤的生物量为 532.56 kg、5 325.61 kg、2 130.25 kg。

#### 4.2 生态需水确定标准(以 30% 保护目标为例)

本文以鱼类生物量保护目标作为生态需水确定标准,得到上游河道来流过程差别较大。以 30% 鱼类生物量保护目标为例,即假设实际鱼类生物量为天然鱼类生产力的 30%,得到研究区域细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤的实际生物量为 177.52 kg、1 775.20 kg、710.08 kg。

已知细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤等鱼种的实际生物量,通过捕获物的年龄组成,确定各鱼种各个生命史的生物量。根据已有调查,统计目标鱼种捕获物的比例组成见表 1。虽然目标鱼种稚鱼期、幼鱼期、产卵期等生命史的定义有严格对应鱼龄,但由于野外调查和文献的缺乏,无法得到鱼种间各个生命史共存的数量、质量比例关系,因而对目标鱼种生命史组成做一定程度简化,本文将稚鱼期、幼鱼期、产卵期对应的鱼龄定义为 1 龄以下、1 龄到 2 龄、3 龄以上。目标鱼种属一次性产卵鱼类,雄性约 3 龄成熟,雌性约 4 龄成熟,本文假设 50% 实际生物量处于性成熟阶段,具备产卵条件。

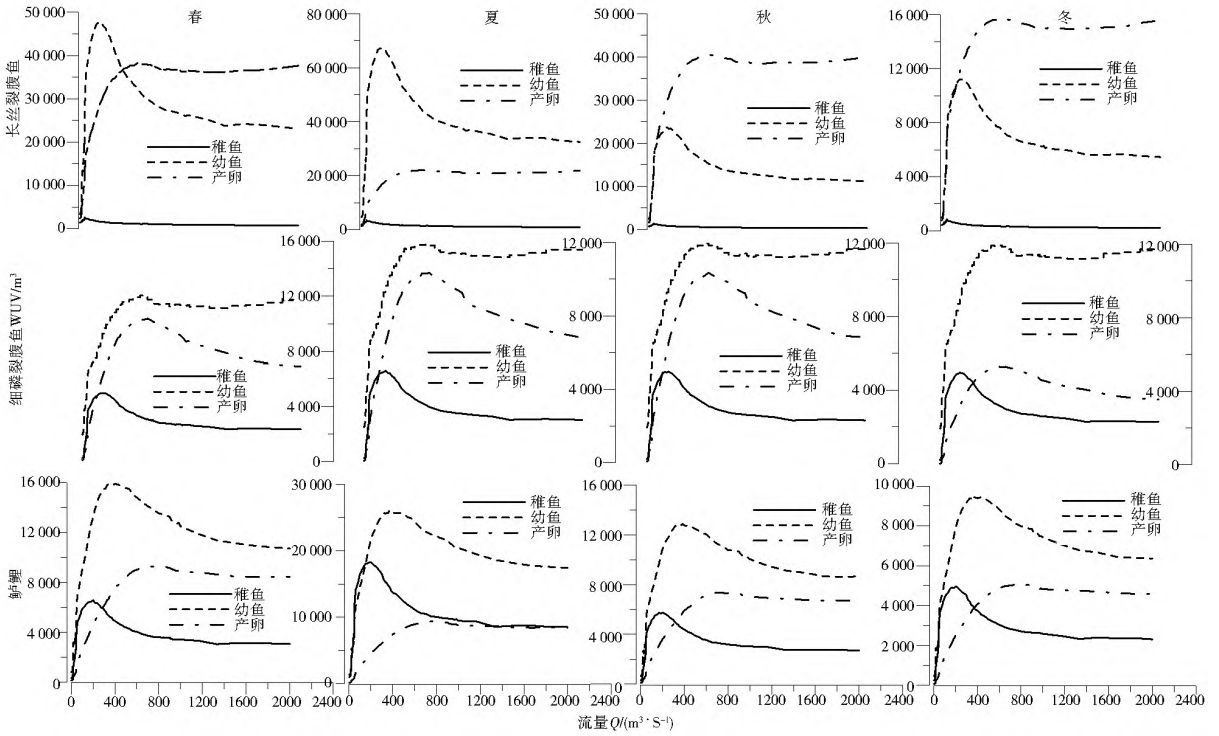


图 2 目标鱼种栖息地加权可利用体积与下泄流量关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between WUV of target species and upstream discharge

表 1 目标鱼种捕获物的年龄组成

Table 1 Age composition of target fingerling haul

鱼种	细鳞裂腹鱼		长丝裂腹鱼		鲈鲤	
	标本数 /尾	百分数 (%)	标本数 /尾	百分数 (%)	标本数 /尾	百分数 (%)
1	9	34.62	10	22.73	13	37.14
2	6	23.08	16	36.36	7	20
3	8	30.77	12	27.27	11	31.43
4	2	7.69	3	6.82	3	8.57
5	1	3.84	3	6.82	1	2.86

根据对雅砻江猫滩猫滩闸址至磨子沟河段野外调查,处于

天然饵料条件且流速、水温、水深、基质等生境因子均为最佳状态下,鲤科鱼类最高产量为  $0.20 \text{ kg/m}^3$ ,一般单产  $0.10\sim 0.16 \text{ kg/m}^3$ ,且春、夏、秋、冬四季温度、溶解氧水平差异,本文设四季每立方米加权可利用体积的鱼产量分别为  $0.12$ 、 $0.16$ 、 $0.20$ 、 $0.18 \text{ kg/m}^3$ 。据此,可以得到 30% 鱼类生物量保护目标下,目标鱼种的总生物量、各生命史的生物量及其对应的栖息地权重有效体积和下泄流量,见表 2。可见,保护目标不同,目标鱼类生物量不同,其它数据将会相应调整。

### 4.3 建立权重关系矩阵

基于咨询相关专家和野外调查,对不同保护级别的鱼类赋予不同的权重,保护级别越高权重越大,权重值确定标准见表 3。

表 2 鱼类生物量保护目标 30% 下鱼种各生命史 WUV 及对应生态需水量  $Q_{需}$

Table 2 WUV and corresponding ecological water requirement under protective objectives of 30% for target species during various life stages

目标鱼种及总生物量	生命周期	目标生物量/kg	春(3月-5月)		夏(6月-8月)		秋(9月-11月)		冬(12月-2月)	
			WUV/m <sup>3</sup>	$Q_{需}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	WUV/m <sup>3</sup>	$Q_{需}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	WUV/m <sup>3</sup>	$Q_{需}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	WUV/m <sup>3</sup>	$Q_{需}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
细鳞裂腹鱼 177.52 kg	稚鱼	61.46	512.17	0.69	384.125	0.22	307.3	0.46	341.44	0.26
	幼鱼	40.97	341.42	0.10	256.0625	0.05	204.85	0.13	227.61	0.29
	产卵	75.1	625.83	0.89	469.375	1.17	375.5	0.15	417.22	0.43
长丝裂腹鱼 1775.20 kg	稚鱼	403.5	3362.5	49.72	2521.875	45.82	2017.5	41.26	2241.67	42.49
	幼鱼	645.46	5378.83	45.49	4034.125	29.44	3227.3	17.67	3585.89	18.56
	产卵	726.2	6051.67	181.9	4538.75	128.38	3631	94.12	4034.44	256.69
鲈鲤 710.08 kg	稚鱼	263.7	2197.5	37.61	1648.125	15.6	1318.5	25.81	1465	32.04
	幼鱼	142	1183.33	14.04	887.5	0.68	710	9.44	788.89	15.51
	产卵	304.3	2535.83	95.35	1901.88	74.42	1521.5	74.54	1690.56	125.01

研究区内,细鳞裂腹鱼系四川特有鱼类,长丝裂腹鱼系金沙江水系特有鱼类,鲈鲤系长江上游特有鱼类,以上鱼种虽同属于“省、流域特有种”同一类别,但由于影响范围有较

大差异,因此将三类鱼种的权重比例初步定义为 3.5:4:5。再结合研究区域不同鱼种生物量的关系,以及各鱼种捕获物的年龄组成,最终确定鱼种间、生命史间权重系数:

表 3 物种保护重要性权重比例

Table 3 Weight ratios of the importance of species conservation

类别	权重	类别	权重
国家一级保护物种	10	省、流域特有种	4
全国特有种	8	省级保护物种	2
国家二级保护物种	6	无保护级别非特有种	1

首先,确定鱼种间权重系数。细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤的生物量比值为 1:10:4,其物种保护重要性权重比为 3.5:4:5,将对应项相乘得到最终鱼种间的权重系数为 0.06:0.62:0.32。

表 4 鱼种间权重系数和生命史间权重系数

Table 4 Weight coefficients of fishes and lifestyles

目标鱼种及权重系数	生命周期	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
细鳞裂腹鱼 0.06	稚鱼期	0.58	0.40	0.17	0.17	0.17	0.40	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
	幼鱼期	0.42	0.30	0.13	0.13	0.13	0.30	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	产卵期	0	0.30	0.70	0.70	0.70	0.30	0	0	0	0	0	0
长丝裂腹鱼 0.62	稚鱼期	0.59	0.41	0.18	0.18	0.41	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
	幼鱼期	0.41	0.29	0.12	0.12	0.29	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	产卵期	0	0.3	0.7	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0
鲈鲤 0.32	稚鱼期	0.57	0.57	0.57	0.40	0.17	0.17	0.40	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
	幼鱼期	0.43	0.43	0.43	0.30	0.13	0.13	0.30	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
	产卵期	0	0	0	0.3	0.7	0.7	0.3	0	0	0	0	0

#### 4.4 面向鱼类生物量保护目标的生态需水过程

以 30% 的鱼类生物量保护目标为例,计算得到的生态需水过程见图 3。分析发现,每年 3 月-7 月为目标鱼种产卵期,特别是 4 月-6 月为集中产卵季节,产卵活动对流速有较高的要求,需要流水的刺激,因此应适当增加下泄水量,使之保持在 100 m<sup>3</sup>/s; 8 月-11 月非鱼类产卵期,且该时节锦屏河湾单位水体产量较高,下泄 60 m<sup>3</sup>/s 即能满足恢复、保持鱼类资源量的要求;12 月-2 月属于枯水期,减水河段区间支流汇水量较少,且冬季鱼类饵料的密度、生境质量下降,需要通过增加栖息地体积弥补单位水体鱼种产量的降低,下泄流量要保持在 80 m<sup>3</sup>/s 左右;2 月-3 月情况比较特殊,虽属于枯水期水量较少,但春季藻类及浮游动植物大量生长,栖息地质量较前期不断提高,因而对栖息地体积即上游下泄流量要求降低,保持在下泄流量 60 m<sup>3</sup>/s 左右。

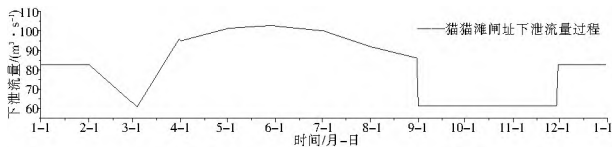


图 3 鱼类生物量保护目标 30% 锦屏大河湾研究区域生态需水过程

Fig. 3 Ecological water requirements in study area of Jinping River under protective objectives of 30%

以研究区域内天然鱼类生产力为基准,若鱼类生物量保护目标定量为 1,即保持 100% 天然鱼类生产力;若鱼类生物量保护目标定量为 0.8,则保持天然鱼类生产力的 80%。以此类推,根据鱼类生物量保护目标的变化,可以得出不同目标下的上游流量下泄过程见图 4。

其次,确定生命史间的权重系数。根据目标鱼种的产卵季节和捕获物年龄组成,考虑到鱼类产卵在鱼类生活史中的重要性,设产卵季节的产卵期权重为 0.7,过渡季节的产卵期权重为 0.3,非产卵季节的产卵期权重为 0,同一季节各生命史权重系数累加值为 1。幼鱼期和稚鱼期权重均按捕获物中幼鱼、稚鱼比例进行分配。细鳞裂腹鱼产卵期为 3 月-5 月,长丝裂腹鱼产卵期为 3 月-4 月,鲈鲤产卵期为 5 月-6 月。以细鳞裂腹鱼为例,3 月-5 月产卵期的权重为 0.7,2 月和 6 月作为过渡季节其权重为 0.3。研究区域细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼和鲈鲤捕获物的年龄组成见表 1。最终确定的权重矩阵见表 4。

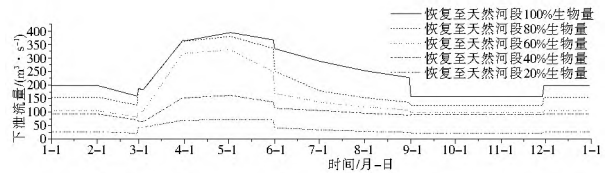


图 4 不同鱼产目标下锦屏大河湾研究区域生态需水过程

Fig. 4 Ecological water requirements in study area of Jinping River under different protective objectives

#### 5 结语

本文通过对目标鱼种栖息地适宜性的分析,建立了生物量与河道流量间的关系,并提出了河道生态需水计算新方法。研究结果表明:(1) 基于鱼类生物量法的河道生态需水量计算结果,真实反映了研究区域目标鱼种生命史流量需求。例如,研究实例中每年 3 月-7 月为目标鱼种产卵期,特别是 4 月-6 月为集中产卵季节,产卵活动对流速较高的要求,需要流水的刺激,应适当增加下泄水量。(2) 依靠鱼种间、鱼种生命史之间的权重关系,可以较为客观地确定不同鱼种、同鱼种不同生命史共存状况下的综合生态需水过程,而且可以得出不同下游鱼类栖息地保证率所对应的不同生态需水过程。

需要说明的是,生态需水过程应为连续光滑曲线,但由于本文考虑栖息地水温因子影响时,将水温定义为代表性四个季节的非连续温度水平,因而造成生态需水过程线的局部突变。

#### 参考文献(References):

[1] 王西琴,张远,刘昌明. 河道生态及环境需水理论探讨[J]. 自然资

- 源学报, 2003, 18(2): 240-246. (WANG Xi qin, ZHANG Yuan, LIU Chang ming. A Theoretical Discussion of Ecological and Environmental Water Requirements of River Course[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 240-246. (in Chinese))
- [2] Armstrong J D, Kemp P S, Kennedy G J A, et al. Habitat Requirements of Atlantic Salmon and Brown Trout in River and Streams[J]. Fisheries Research, 2003(62): 143-170.
- [3] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Estimation of Instream Flow Based on Hydrological Indexes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1336-1341. (in Chinese))
- [4] 王玉蓉, 李嘉, 李克锋, 等. 雅砻江锦屏二级水电站减水河段生态需水量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 81-85. (WANG Yurong, LI Jia, LI Kefeng, et al. Ecological Water Demand of Reducing Reach of Yalong River Downstream of Jinping Waterpower Station Stage II[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 81-85. (in Chinese))
- [5] Denis A, Hughes, Pauline Hannart. A Desktop Model Used to Provide an Initial Estimate of the Ecological Instream Flow Requirements of Rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2003, (270): 167-181.
- [6] 邢玉杰, 林治宝, 胡志平, 等. 坤龙水库浮游生物调查及鱼产力分析[J]. 水利渔业, 2007, 27(2): 61-62. (XING Yujie, LIN Zhibao, HU Zhiping, et al. Investigation of Plankton and Analysis of Fish Productivity for Kunlong Reservoir[J]. Reservoir Fisheries, 2007, 27(2): 61-62. (in Chinese))
- [7] 吴春华. 雅砻江干流河道内生态需水量生境模拟法研究[J]. 生态科学, 2007, 26(6): 536-539. (WU Chunhua. The Habitat Simulation Method of Research on the Ecological Flow in River Course of Yalong Mainstream[J]. Ecological Science, 2007, 26(6): 536-539. (in Chinese))
- [8] 邓其祥, 余志伟. 锦屏一二级水电站影响区的鱼类资源[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 1999(20): 1-5. (DENG Qixiang, YU Zhiwei. The Fish Species Resources of the Affected Area of the Second\_Level and First\_Level Hydroelectric Power Stations in Jinping Yalongjiang River[J]. Journal of Sichuan Teachers College(Natural science), 1999, (20): 1-5. (in Chinese))
- [9] 邓其祥. 雅砻江下游地区的鱼类区系和分布[J]. 动物学杂志, 1996, 31(5): 5-12. (DENG Qixiang. The Fish Fauna and Distribution of the Lower Reaches of the Yalong River[J]. Chinese Journal Of Zoology, 1996, 31(5): 5-12. (in Chinese))
- [10] 汤洁, 余孝云, 林年丰, 等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学, 2005, 25(3): 367-372. (TANG Jie, SHE Xiaoyun, LIN Nianfeng, et al. Advances in Researches on the Theories and Methods of Ecological Environmental Water Demand [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(3): 367-372. (in Chinese))
- [11] 王玉敏, 周孝德. 流域生态需水量的研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 142-144. (WANG Yumin, ZHOU Xiaode. Research Development of Ecological Water Demand for Watershed[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(6): 142-144. (in Chinese))
- [12] 粟晓玲, 康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 740-744. (SU Xiaoling, KANG Shaoshong. Concept of Ecological Water Requirement and It's Estimation Method[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 740-744. (in Chinese))
- [13] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析. 生态水利研究[J]. 中国水利, 1999, (10): 18-20. (LIU Changming. Analysis on Water Supply and Demand in China in Twenty first Century. Study on Ecological Water Conservancy[J]. China Water Resources, 1999, (10): 18-20. (in Chinese))
- [14] 赵博, 王铁良, 周林飞, 等. 生态环境需水计算方法概述[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 53-57. (ZHAO Bo, WANG Tieliang, ZHOU Linfei, et al. Research Development and Prospect of Ecological Environmental Water Demand [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(2): 53-57. (in Chinese))
- [15] 李文生, 许士国. 太子河河道生态环境需水量研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 116-120. (LI Wensheng, XU Shiguo. Study of Water Required for Ecological Environment in Taizi River [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(1): 116-120. (in Chinese))
- [16] Qian ZY, Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China. [M] Beijing: Water Power and Water Electric Press, 2001.
- [17] GLEICK PH. Water in Crisis: Paths to Sustainable Water use [J]. Ecological Applications, 1996, 8(3): 571-579.
- [18] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 617-622. (ZHAO Xining, WU Pu-te, WANG Wan zhong, et al. Research Advance on Ecological Environmental Water Requirement [J]. Advances In Water Science, 2005, 16(4): 617-622. (in Chinese))