

# 基于环境水力学的产漂流性卵鱼类早期资源量估算方法改进

任杰<sup>1,2</sup>, 彭期冬<sup>1</sup>, 林俊强<sup>1</sup>, 董国栋<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;  
3. 山东省诸城市水利水产局, 诸城 262200)

**摘要:**针对鱼类早期资源量估算方法误差大的问题,基于环境水力学,建立鱼卵移流扩散的瞬时点源二维模型,并对模型进行参数选取、守恒验证,分析了鱼类早期资源量传统估算方法的误差,提出一种新的基于环境水力学的产漂流性卵鱼类早期资源量估算方法。结果表明,中心产卵群体,从产卵点到下游约80 km范围内的断面,鱼卵密度呈钟形分布,由传统方法估算得到的早期资源量低于真实值,最大误差为17.5%;对于近岸产卵群体,从产卵点到下游约200 km范围内的断面,鱼卵密度随距离增加呈指数下降,由传统方法估算得到的资源量高于真实值,最大误差为-33.9%;当断面鱼卵密度均匀分布,即中心产卵和近岸产卵时,产卵场下游80 km和200 km后的断面鱼卵密度沿断面分布均匀,传统方法估算结果较为准确,不必进行校正。改进的估算方法可用于计算产漂流性鱼卵的鱼类早期资源量。

**关键词:**环境水力学;早期资源量估算;漂流性卵;瞬时点源扩散

**中图分类号:**Q141 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)03-0082-06

鱼类早期资源研究对渔业资源的保护和管理意义重大,是鱼类生态学和渔业生物学研究的重要手段。国内外对鱼类早期资源的研究很多,但大多是通过观测来分析其分布规律,仅对观测数据进行了分析,并没有结合水力特性从理论上进行深入研究。刘建康(2007)研究了长江下游南京江段的四大家鱼卵苗的分布,发现其在垂直分布上没有明显规律;常剑波(1995)对长江洪湖段卵苗空间分布特征调查显示,在水平分布上鱼苗总密度随采集点离岸距离的增加而减小;Johnetond(1997)调查了加拿大2条河流的早期资源,发现河中心的卵苗密度高于两岸。上述研究均没有从理论上给出卵苗密度分布不均匀的原因,卵苗在水体中的运动也属于物质输移扩散,可以用环境水力学的模式进行理论分析。武周虎等(2012)给出了河流宽度和水质模型方程的分类准则及其对应的解析解,为环境水力学的广泛应用提供了可能。

本文采用瞬时点源二维移流扩散模型,提出一种新的基于环境水力学的产漂流性卵鱼类早期资源

量估算方法,以长江四大家鱼产卵场重庆江津区的珞璜江段的水力参数为例,估算产漂流性卵鱼类的早期资源量,探究其时空分布规律。

## 1 方法

### 1.1 传统估算方法

目前国内对于产漂流性卵鱼类早期资源量( $M$ )的估算方法如下式:

$$M = \sum M_1 + \sum M_2 \quad (1)$$

式(1)中: $M_1$ 为采集所得的鱼卵量, $M_2$ 为前后2次采集时间之间计算出的鱼卵量。

1次定时采集断面的鱼卵量( $M_1$ )为:

$$M_1 = (Q/q) \times m \times c' \quad (2)$$

2次采集时间之间的鱼卵量( $M_2$ )采用插补法计算:

$$M_2 = \frac{t'}{2} \left( \frac{M_{0-1}}{t_{0-1}} + \frac{M_{1-2}}{t_{1-2}} \right) \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: $Q$ 为采集点断面的平均江水流速( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $q$ 为流经网内的江水流速( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $m$ 为断面固定点1次采到的鱼卵数量(粒); $t'$ 为前后2次采集的时间间隔(s); $t_{0-1}, t_{1-2}$ 为前后2次采集的持续时间(s); $M_{0-1}, M_{1-2}$ 为前后2次采集的鱼卵量(粒); $c'$ 为断面鱼卵流量系数,是调查断面各采集点(一般为左、中、右和表、中、底层6个点)的卵苗平均密度( $\bar{D}$ )与常规采集点的卵苗密度( $d$ )之比,即:

收稿日期:2015-08-15

基金项目:国家“十二五”科技支撑课题(2012BAC06B04);国家自然科学基金青年项目(51409280);国家自然科学基金面上项目(51579247);国家自然科学基金青年项目(51509262)。

作者简介:任杰,1987生,女,博士研究生,主要从事生态学和水环境研究。E-mail: renjie\_2013@qq.com

通信作者:彭期冬。E-mail: pengqd@iwhr.com

$$c' = \bar{D}/d \quad (4)$$

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n d_i/n \quad (5)$$

式(5)中:  $\sum_{i=1}^n d_i$  为断面各采集点的鱼卵密度之和;  $n$  为断面所设采集点的数量;  $d$  为常规采集点的鱼卵密度。

从式(2)、式(4)、式(5)可以看出,传统产漂流性卵鱼类的早期资源量估算是基于调查断面各采集点卵苗密度的简单算术平均值。然而,在天然河流中,受环境水流影响,漂流性卵沿河道断面的分布并不均匀,采用断面卵苗平均密度来估算鱼类早期资源量可能存在误差。因此,本文尝试应用环境水力学原理,建立相应的数学模型,估算产漂流性卵鱼类的早期资源量,并将其估算结果与传统方法进行对比分析。

### 1.2 基于环境水力学的数学模型

在未出膜之前,鱼卵没有主动游泳能力,鱼卵沿河流的输移可看作是瞬时点源扩散,方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial D}{\partial t} + u \frac{\partial D}{\partial x} + v \frac{\partial D}{\partial y} + w \frac{\partial D}{\partial z} \\ & = E_x \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 D}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $D$  为鱼卵密度(粒/ $\text{m}^3$ );  $t$  为时间(h);  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为河流的纵向、横向和垂向,其中  $x$  沿河流指向下游为正,  $y$  沿河宽指向对岸为正,  $z$  沿河深指向河底为正;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为河流在纵向、横向和垂向的平均速度;  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  分别为河流的纵向扩散系数、横向扩散系数和垂向扩散系数。

### 1.3 模型参数

本文基于上述环境水力学模型,在直线河道条件下,推导鱼卵密度的解析解公式。以每年 5-6 月为四大家鱼的产卵季节,该时期珞璜断面的平均宽度( $B$ )为 1 000 m,平均水深( $H$ )为 10 m,平均水力坡降( $J$ )为 0.00032,河流纵向平均流速为 1.5 m/s。产漂流性卵鱼类的繁殖一般随着涨水的发生而发生,所以在第 1 次产卵高峰期(2008 年 5 月 19-23 日),产漂流性卵鱼类的早期资源量约为  $5 \times 10^7$  粒。从鱼卵发育到具有独立的游泳能力,大部分鱼卵需要 80~100 h(姜伟,2009)。相比河流的纵向流速,河流在横向和垂向的流速远小于纵向,因此可以假定横向速度和纵向速度均为 0 m/s。

纵向扩散由纵向离散和纵向紊动扩散组成。一般来说,可以忽略由速度梯度引起的纵向紊动扩散,因为其远低于纵向离散系数。水流速度的不均匀分

布导致了流速的纵向离散,这与河道水流条件密切相关。本文参考李锦秀等(2000)的方法,江津地区下游 660 km 纵向扩散系数的计算公式如下:

$$E_x = 0.007 \left(\frac{B}{H}\right)^{2.1} \left(\frac{u}{u_*}\right)^{0.7} Hu_* \quad (7)$$

式中:  $B$  为研究河段平均宽度(km);  $u_* = \sqrt{gHJ}$  为剪切流速,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $J$  为水力坡降。

横向扩散系数由河流的湍流扩散特性所决定。横向扩散系数与河流深度和宽度( $B/h$ )之间的关系如下:

$$\frac{E_y}{Hu_*} = -0.92 + 0.82 \times \log_{10}\left(\frac{B}{H}\right) \quad (8)$$

垂向扩散系数根据 Fisher 给出的公式计算(Hugo et al,1979):

$$E_z = \alpha_z Hu_* \quad (9)$$

式中:  $\alpha_z$  为系数,因为鱼卵属于中性物质,且其比重与水基本一致,因此取 0.067。横向和垂向密度分别达到均匀混合的时间约等于:

$$t_y \sim \frac{H^2}{4E_y}, \quad t_z \sim \frac{H^2}{4E_z}$$

本次研究发现,  $t_z/t_y = 0.0001$ ,即垂向实现均匀混合所用的时间远小于横向。由于溶解性物质在垂向的扩散,导致其沿水深方向存在浓度分布问题,但鱼卵的比重与水基本相同,因此不会发生垂向扩散,故忽略水深对鱼卵的影响。

综上所述,可得出产漂流性卵鱼类早期资源的密度分布公式:

$$D_{(x,y,t)} = \frac{m}{4\pi t \sqrt{E_x E_y}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4E_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4E_y t} \right] \quad (10)$$

式中:  $y_0$  为产卵点在河断面的位置。

### 1.4 模型验证

质量守恒验证是密度扩散数学模型计算结果可靠性的有力佐证。对于固定的时间,令  $\xi = x - ut$ , 则式(10)为:

$$D = \frac{m}{4\pi t \sqrt{E_x E_y}} \exp \left( -\frac{E_y \xi^2 + E_x \delta^2}{4E_x E_y t} \right) \quad (11)$$

$$\text{令: } \frac{E_y \xi^2 + E_x \delta^2}{\sqrt{E_x E_y}} = r^2$$

$$\text{则: } D = \frac{m}{4\pi t \sqrt{E_x E_y}} \exp \left( -\frac{r^2}{4t \sqrt{E_x E_y}} \right)$$

对某时刻的密度分布进行扩散区的水体体积积分,得到扩散物质的总质量为:

$$m \equiv \int D dA = \frac{m}{4\pi t \sqrt{E_x E_y}} \int_0^\infty \exp \left[ - \left( \frac{r}{\sqrt{4t \sqrt{E_x E_y}}} \right)^2 \right] (\pi r dr) \quad (12)$$

$$\text{令: } \eta = \left( \frac{r}{\sqrt{4t \sqrt{E_x E_y}}} \right)^2$$

$$\text{则有: } d\eta = \frac{2r dr}{4t \sqrt{E_x E_y}}$$

将其代入式(12)得:

$$m \equiv \int D dA = m \int_0^\infty \exp(-\eta) d\eta$$

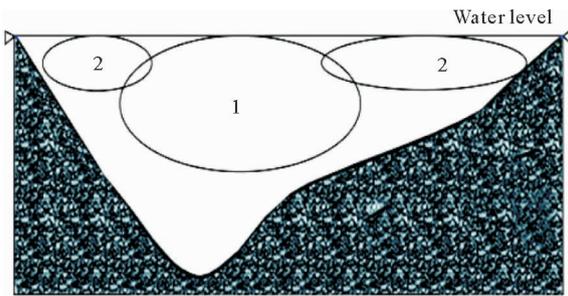
$$\int_0^\infty \exp(-\eta) d\eta = 1$$

$$m \equiv m$$

上述证明了中心排放二维移流扩散密度分布公式的质量守恒性,可反映出产漂流性卵鱼类的密度分布情况,并可用于产漂流性卵鱼类的早期资源量估算。

## 2 结果

产漂流性卵鱼类沿断面的产卵位置与式(10)中的  $y_0$  相关。本文为方便计算,将产卵位置概化为河流中央和近岸,如图1所示。



(1:产卵位置在河流中央;2:产卵位置在靠近岸边)

图1 产卵位置沿断面分布情况示意

(1: Spawning site located in the middle of the river; 2: Spawning sites located near the bank of river)

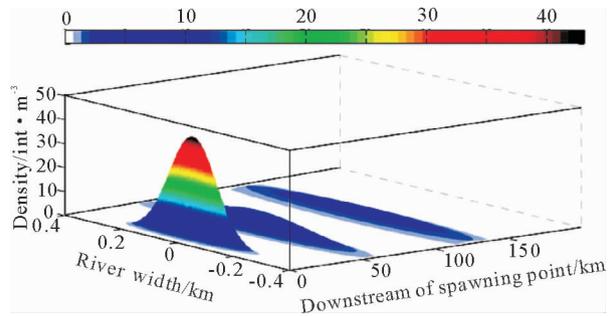
Fig. 1 River cross section indicating the spawning site locations

### 2.1 中心产卵

假设瞬时点源位于河流中心,即  $y_0 = 0$ ; 此时,漂流性鱼卵的二维扩散模型在 2 ~ 30 h 的空间分布如图2所示。图像在 XOY 坐标上的投影方程可以转化为:

$$\frac{(x - ut)^2}{4E_x t \times \ln[D_{\max}/D_{(x,y,t)}]} + \frac{(y - y_0)^2}{4E_y t \times \ln[D_{\max}/D_{(x,y,t)}]} = 1 \quad (13)$$

$$\text{式中: } D_{\max} = \frac{m}{4\pi t \sqrt{E_x E_y}}$$



( $t = 2 \text{ h}, t = 15 \text{ h}, t = 20 \text{ h}$ )

图2 中心产卵情形下鱼卵密度的时空分布

( $t = 2 \text{ h}, t = 15 \text{ h}$  and  $t = 20 \text{ h}$ )

Fig. 2 Temporal-spatial distribution of pelagic fish eggs for migration fishes (spawning at the center of the cross section)

由图2可以看出,不同断面鱼卵的密度分布不同,呈钟形分布,越接近产卵场,沿断面分布的落差越明显,随着距离的增加,鱼卵沿断面分布的落差越小,到下游 80 km 处,基本达到均匀混合,即沿断面均匀分布。当  $x = ut$  时,可得到漂流性卵沿断面的最大密度分布(图3)。公式如下:

$$D = D_{\max} \exp(-y^2/4E_y t) \quad (14)$$

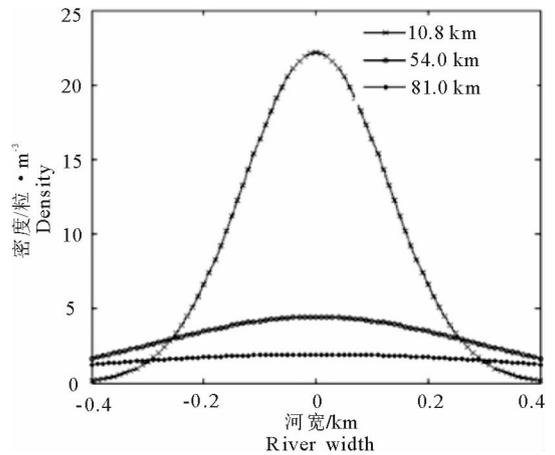


图3 中心产卵情形下不同断面的鱼卵密度分布

Fig. 3 Density distribution of eggs spawned at the center of the cross section

从图3可以看出,在产卵场下游 80 km 处,漂流性卵沿断面达到均匀混合,在此处设置采样点估算出的早期资源量误差最小。图4为传统计算方法的误差,可见由传统方法计算出的早期资源量较大,且随着与产卵场距离的增加误差逐渐减小,这是由于随着与产卵点距离的增加,断面鱼卵密度分布越均匀,平均计算各采样点的鱼卵密度对结果影响越小。传统估算方法中,采用所设置 3 ~ 5 个采样点的平均值估算早期鱼类资源量误差较大,可基于原有的估算结果进行适当的调整,乘以相应的偏差系数减小

误差。通过对时间进行积分,计算早期资源量(每一截面相应的质量守恒验证在表 1 中给出),公式如下:

$$m' = \left[ \sum_{i=0}^{40} D(t_i) \Delta t_i \right] \cdot u \cdot y$$

$$= \left[ \int_{i=0}^{40} D(t) dt \right] \cdot u \cdot y \quad (15)$$

$$m_v = \frac{1}{1 + \text{deviation}} \cdot m' = \alpha \cdot m' \quad (16)$$

式中: $m_v$  为校验后的产漂流性卵鱼类早期资源量(粒); $m'$  为产漂流性卵鱼类的早期资源量估算结果(粒)。

在实际河流中,鱼类早期资源量可以根据采样点与产卵场的距离来确定偏差系数,然后用传统的计算结果乘以相应的偏差系数。表 1 给出了不同断

面采样点的偏差系数。

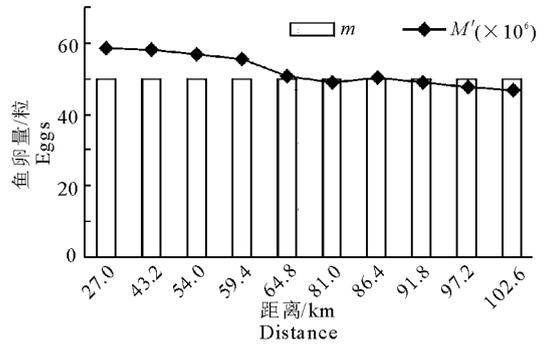


图 4 中心产卵情形下改进方法与传统方法的估算结果误差  
Fig. 4 Comparison of early life stage resource estimated by the improved and traditional methods with spawning at river center

表 1 中心产卵情形下鱼类不同断面早期资源量计算偏差系数

Tab. 1 Deviation analysis of the estimated early resources at different section under the condition of spawning in the center of the river

距离/ km	不同采样点鱼卵量/粒				M'/ 粒	误差/ %	误差 系数
	y=0.2 km	y=0 km	y=-0.1 km	y=-0.3 km			
27.0	12688717	20776366	18355517	6912368	58732968	17.5	0.851
43.2	13542895	18426368	17058456	9236952	58264671	16.5	0.858
54.0	13439720	17190976	16163468	9891525	56685689	13.4	0.882
59.4	13299705	16633920	15728307	10064195	55726127	11.5	0.897
64.8	9327309	16108529	15303102	10163100	50902040	1.8	0.982
81.0	10151161	14672792	14083485	10151161	49058599	-1.9	1.019
86.4	12203629	14230149	13693717	10074545	50202040	0.4	0.996
91.8	11943535	13801031	13311218	9971517	49027300	-1.9	1.020
97.2	11676381	13383924	12934550	9846457	47841311	-4.3	1.045
102.6	11402875	12976866	12563852	9702750	46646342	-6.7	1.072

### 2.2 近岸产卵

对于近岸产漂流性卵的鱼类,其产卵场一般是靠近岸边的位置。假设  $y_0$  等于 0.2 km,考虑河岸的边界反射。因此密度分布的表达式包括 3 个部分的总和: $y_0 = 0$  km,  $y_0 = 0.6$  km 以及  $y_0 = 1.0$  km,边界条件为  $y \in (-0.4, -0.4)$ 。图 5 给出了不同断面的密度分布。

鱼卵达到全断面均匀混合时距离产卵场下游约 200 km 处。如果采样点所在断面与产卵场的距离小于 200 km,那么应对采用传统估算方法得到的早期资源予以校准,即采用传统估算结果乘以相应的偏差系数。偏差系数在表 2 中给出。图 6 为不同断面鱼卵密度最大值的分布情况,图 7 为近岸产卵情形下改进方法与传统方法的估算结果误差。

不同断面的鱼卵密度随着离岸距离的增加,密度逐渐减小,断面与产卵场的距离越大,鱼卵密度随

离岸距离增加而以较小的趋势越小,直到全断面均匀混合,较小量趋于 0。对于近岸产卵群体,由传统估算方法计算得到的早期资源量比真实值小,越到下游,传统估算方法越接近真实值。

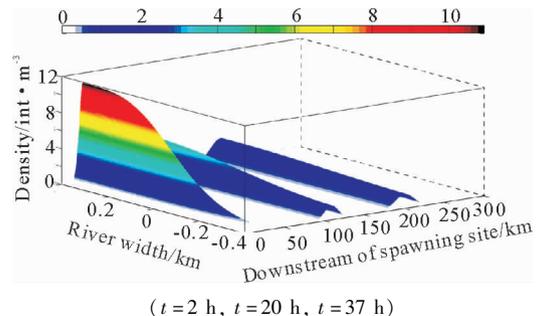


图 5 近岸产卵情形下鱼卵密度的时空分布  
(t = 2 h, t = 20 h and t = 37 h)

Fig. 5 Temporal-spatial distribution of egg density for non-migrating fishes (spawning near the bank)

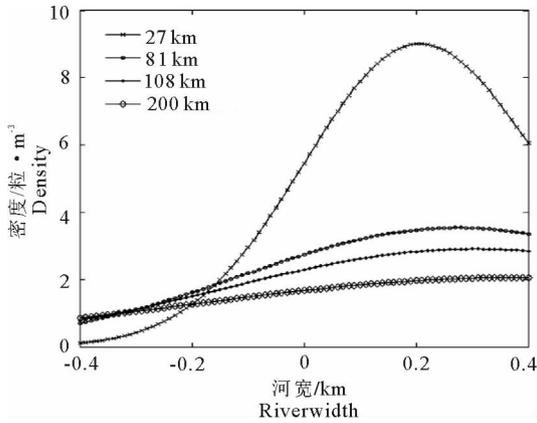


图6 近岸产卵情形下不同断面的鱼卵密度

Fig. 6 Density distribution of eggs spawned near the river bank

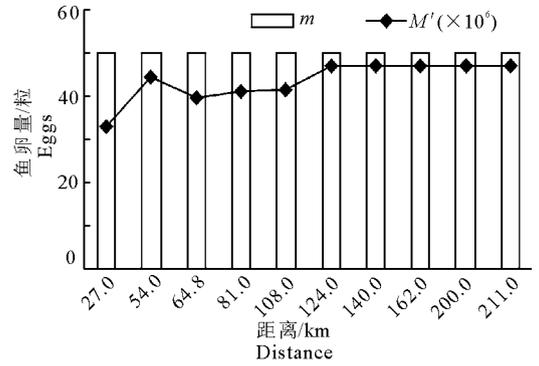


图7 近岸产卵情形下改进方法与传统方法的估算结果误差

Fig. 7 Comparison of early life stage resource estimated by improved and traditional methods under the condition of spawning near the bank of river

表2 近岸产卵情形下鱼类不同断面早期资源量计算偏差系数

Tab. 2 Deviation analysis of the estimated early resources at different section under the condition of spawning near the bank of river

距离/ km	不同采样点鱼卵量/粒				$M'$ / 粒	误差/ %	误差 系数
	1	2	3	4			
27.0	70074578	38291472	20595513	3326975	33072134	-33.9	1.512
54.0	76712400	50008800	35418000	15463200	44400600	-11.2	1.126
64.8	64829801	44139890	32894152	17115381	39744806	-20.5	1.258
81.0	62036122	44699739	35284298	21787689	40951962	-18.1	1.221
108.0	56907773	44284199	37371315	27083981	41411817	-17.2	1.207
124.2	61650000	49795200	43238400	33196800	46970100	-6.1	1.065
140.4	59546400	49639200	44083200	35290800	47139900	-5.7	1.061
162.0	57200400	49360800	44857200	37383600	47200500	-5.6	1.059
199.8	53988000	48715200	45506400	39686400	46974000	-6.1	1.064
210.6	53221200	48500400	45571200	40116000	46852200	-6.3	1.067

### 3 结论

(1) 鱼类早期资源的分布规律与河流的水力特性有密切关系。当产漂流性卵鱼类的产卵位置接近河中央,即中心产卵时,其密度分布呈钟形体,等密度线为同心圆;当产卵位置接近岸边,即近岸产卵时,密度分布为钟形体的50%,等密度线为半圆,产卵点下游密度随距离的增加而减小。

(2) 当采样点距离产卵场较近时,鱼类早期资源在河流中的密度分布不均匀,传统估算方法得到的结果存在误差,需要进行校正。中心产卵和近岸产卵时,下游80 km和200 km后的断面鱼卵密度沿断面分布均匀,传统方法估算出的早期资源量误差较小,不必进行校正。

在天然河道中,由于河道地形蜿蜒起伏,水流条件复杂,难以直接求解鱼卵密度的解析解公式。因此还需在环境水力学基本方程的基础上,根据河道真实地形和水流条件,借助数值模型,模拟鱼卵运动情况和断面浓度分布,以此进一步提高鱼类早期资源

源的估算精度。

### 参考文献

- 常剑波,1995. 洪湖灌江纳苗的可行性及效益评价[M]. 北京:科学出版社:220-231.
- 姜伟,2009. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流江段鱼类早期资源研究[D]. 武汉:武汉大学.
- 李锦秀,黄真理,吕平毓,等,2000. 三峡库区江段纵向离散系数研究[J]. 水利学报,31(8):84-88.
- 刘建康,2007. 江中家鱼苗垂直分布的初步观察[M]. 北京:化学工业出版社:237-242.
- 武周虎,2012. 基于环境扩散条件的河流宽度分类判别准则[J]. 水科学进展,23(1):53-58.
- Hugo B F, John E L, C Robot K, et al, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters[M]. New York: Academic Press: 81-90.
- Johnston T A, 1997. Downstream movements of young-of-the-year fishes in Catamaran Brook and the Little Southwest Miramichi River, New Brunswick[J]. Journal of Fish Biology, 51(5):1047-1062.

(责任编辑 万月华)

## An Instantaneous Point-Source Diffusion Model for Pelagic Eggs for Estimating Early Life Stage Fish Resources

REN Jie<sup>1,2</sup>, PENG Qi-dong<sup>1</sup>, LIN Jun-qiang<sup>1</sup>, DONG Guo-dong<sup>3</sup>

- (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China;
2. Beijing Normal University, College of Water Science, Beijing 100875, P. R. China;
3. The Bureau of Water Resources and Fisheries of Zhucheng, Zhucheng 262200, P. R. China)

**Abstract:** Research on the early life history of fish is important for conservation and management of fishery resources. The large body of research on the early life history of fish at home and abroad focuses mostly on estimating fish resources based on monitoring data, often resulting in large errors for estimates of fish eggs. To better estimate the larval reserves of fish, pelagic eggs were selected as the subject of this study. A hydrology based, two-dimensional instantaneous point source model for diffusion of fish eggs by advection was developed for estimating pelagic egg numbers and their spatial distribution. After parameter selection and model validation, the distribution of pelagic fish eggs was estimated in the Luohuang section of the Yangtze River (Chongqing City), spawning grounds of the four major Chinese carp. The results were compared with those from the traditional approach for estimating fish larval resources and errors for the two methods were analyzed. Results show that the distribution of fish eggs is closely related to the river's hydrologic characteristics. For fish spawning at the center of the river, the cross-sectional distribution of fish eggs is bell-shaped from the spawning point to 80 km downstream and the larval resource calculated using the traditional approach was higher than the true value, with a maximum error of 17.5%. For fish spawning near shore, fish egg distribution decreases exponentially along the cross section (single-tailed) from the spawning point to 200 km downstream and the larval resource calculated by the traditional approach was lower than the true value, with a maximum error of -33.9%. The calculation results of the larval resources were more accurate at the section farther than 80 km for fishes spawning at the center of the river and 200 km for fishes spawning near the bank where the fish eggs distributed uniformly. In summary, the approach proposed in this paper can improve estimates of early life-stage fish resources.

**Key words:** environmental hydraulics; estimation of early resource; fish with pelagic eggs; instantaneous point source diffusion