

河流鱼类产卵场紊动能计算与分析

王远坤^{1,*}, 夏自强², 王 栋¹, 李 帆², 李 建²

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:通过对鱼类产卵场地形分析,认为水流能量损失是鱼类产卵场形成的重要原因之一,这种能量损失主要是由于特殊河道地貌形成的水流紊动而产生的。在此基础上探索性地推导了考虑这种河道水流能量损失的明渠非恒定流方程。以中华鲟为例,对产卵场河段进行了三维水流数值模拟,计算了产卵河段紊动能的分布,探讨了中华鲟产卵行为与水流紊动之间的关系,结果表明产卵区因紊动产生的能量损失明显大于非产卵区。以期为了保护中华鲟和其他鱼类产卵场水力学环境提供参考。

关键词:鱼类产卵场;紊动能;中华鲟

文章编号:1000-0933(2009)12-6359-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Turbulent kinetic energy calculation and analysis in fish spawning ground

WANG Yuan-Kun^{1,*}, XIA Zi-Qiang², WANG Dong¹, LI Fan², LI Jian²

1 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources And Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6359 ~ 6365.

Abstract: Basing on the analysis of fish spawning ground's topography characteristics, the paper pointed out that flow-energy loss caused by turbulence of special riverway physiognomy is one of the important forming causes of fish spawning sites. Deduction of unsteady open channel flow equations which considers the special flow-energy loss was carried out. The special flow-energy loss deduced by the equation can be expressed by turbulent kinetic energy. Take Chinese sturgeon for example, the turbulent kinetic energy distributions were calculated on the basis of 3-D numerical simulation to the spawning site and then we discussed the relation between Chinese sturgeon spawning behavior and turbulent kinetic energy. The results show that, because of the turbulence, the flow-energy loss of spawning regions is much higher than that of non-spawning regions. This paper could provide reference for protecting the hydraulic environment of Chinese sturgeon and other fishes.

Key Words: fish spawning ground; turbulent kinetic energy; Chinese sturgeon

自然界中的天然河流,经过长期的演变,形成了河湾、急流和浅滩等丰富多样的生境^[1,2],为鱼类的生存创造了条件。这些特殊生境与河流地貌、河道形态有密切关系。图 1 所示为长江流域中华鲟、四大家鱼产卵场河道地形^[3]。这些产卵场河道中水流运动复杂,流态紊乱,流向多变,其水流中的能量损失因紊动而区别于其他河道。这种能量损失恰是鱼类在此河段栖息、产卵的重要原因之一。紊动水流影响了河流中鱼类和其他水生生物栖息地的分布^[4~6],对鱼类的洄游、产卵和觅食等生物学行为具有重要作用。目前国内外学者对河流鱼类产卵场做了大量的研究工作,Moir 等在对苏格兰大西洋鲑产卵场的水力学和沉积特性进行研究时指出,以水深、流速和弗劳德数为代表的局部水力学变量越来越重要^[7]。Baumgartner 等也将雷诺数和弗劳德数作为考查指标,研究了维也纳周边的真鳗幼体在河流各级支流的纵向分布^[8]。Biggs 在进行河流中附着生

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(30490235)

收稿日期:2008-06-28; 修订日期:2008-12-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuankunw@tom.com

物的研究时,认为流速梯度在营养物质的掺混中有重要作用^[9]。Power 模拟了真实的对流和扩散,估计了其对于浮游生物的丰富度和种群组成的影响^[10]。Crowder 等在数值模拟的基础上提出使用动能梯度作为水力学特征量,并发展了涡(单点量)和环流(区域量)成为量化鱼类产卵场水流空间特征的量^[11~13]。在对产卵场特殊地形和产卵场水流能量特征的研究涉及较少,这种特殊地形地貌带来的能量变化对水生生物的生存、繁衍是非常重要的,传统的非恒定流方程不足以描述这种现象。因此本文在圣维南方程的基础上探索性地推导了考虑这种能量损失的水流方程。同时选取紊动能作为反映紊动状态的特征量,对中华鲟产卵区进行三维水流数值模拟,分析紊动能与鱼类产卵行为之间的关系。

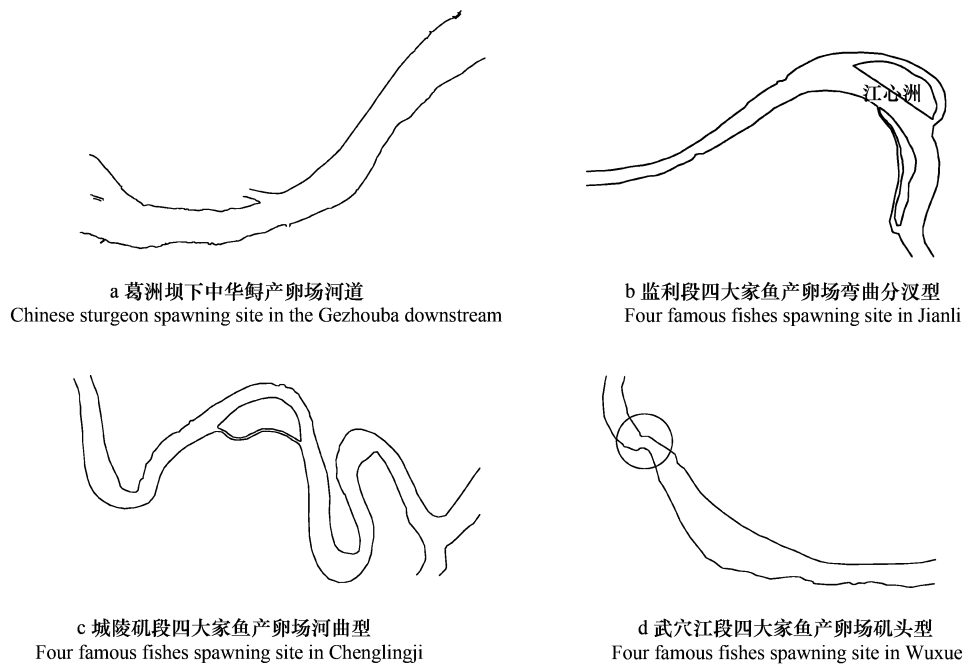


图1 长江中下游鱼类产卵场地形图

Fig. 1 Fish spawning sites in the Yangtze River

1 考虑紊动能损失条件下的非恒定流方程

通常非恒定流的基本方程式是表述水力要素与流程坐标 s 和时间 t 的函数关系式,是由非恒定流的连续方程和能量方程组成。然而它却不能很好地反映上述具有剧烈紊动存在的水流状态。圣维南方程组即明渠非恒定流的连续方程及运动方程^[14,15]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = i - J_f \end{cases} \quad (1)$$

考虑因紊动引起水头损失情况下的水流运动方程。对于有自由表面,非恒定、非均匀水流,相距 ds 的两个断面的总水头关系为:

$$\alpha \frac{V^2}{2g} + h + z = \left[\alpha + \frac{V^2}{2g} + d \left(\frac{V^2}{2g} \right) \right] + [h + dh] + [z + dz] + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} dx + \frac{1}{g} \frac{\tau_0}{\rho} \frac{dX}{dA} dx + k \frac{V^2}{2g} dx \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} dx$ 为水流在 x 方向加速引起的能量项; $\frac{1}{g} \frac{\tau_0}{\rho} \frac{dX}{dA} dx$ 为摩阻引起的水头损失项; $k \frac{V^2}{2g} dx$ 为水流内部结构发生改变(水流紊动)而引起的机械能转化为热能的能量损失项,与水流紊动的剧烈程度有关, k 为修正系数函数,即 $k(h, z)$ 。

对上述方程简化得到:

$$d\left(\frac{V^2}{2g} + h + z\right) = \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} dx + \frac{1}{g} \frac{\tau_0}{\rho} \frac{dX}{dA} dx + k \frac{V_*^2}{2g} dx$$

上式除以距离 dx , 写成偏微分, 使得:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = i - J_f - J_T \quad (3)$$

式中, i 为底坡, $J_f = \frac{1}{g} \frac{\tau_0}{\rho} \frac{X}{A}$ 为摩阻坡度, $J_T = k \frac{V_*^2}{2g}$ 为紊动坡度, V_* 为摩阻流速。

连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

联立方程式(3)、(4)得到考虑因紊动引起的水头损失情况下的明渠非恒定流微分方程组。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = i - J_f - J_T \end{cases} \quad (5)$$

式中, $J_T = k \frac{V_*^2}{2g} = f(e)$, e 表示紊动能大小。

紊动能作为衡量水流紊动状态的重要指标, 是反映因紊动而引起的水流能量损失的主要体现, 这种掺混较强的水流对促进亲鱼的发育及产卵具有重要意义。即使在同样的水深、流速位置处, 其水流特征结构也不尽相同, 所以单纯采用这些单点水力学特征量不足以描述鱼类对流场的生态学要求。本文在对葛洲坝下游中华鲟产卵场三维数值模拟的基础上, 计算紊动能的分布, 分析中华鲟产卵行为与紊动能之间的响应关系, 以期了解中华鲟产卵所需的水力学环境, 为产卵场的修复和保护工作提供参考。

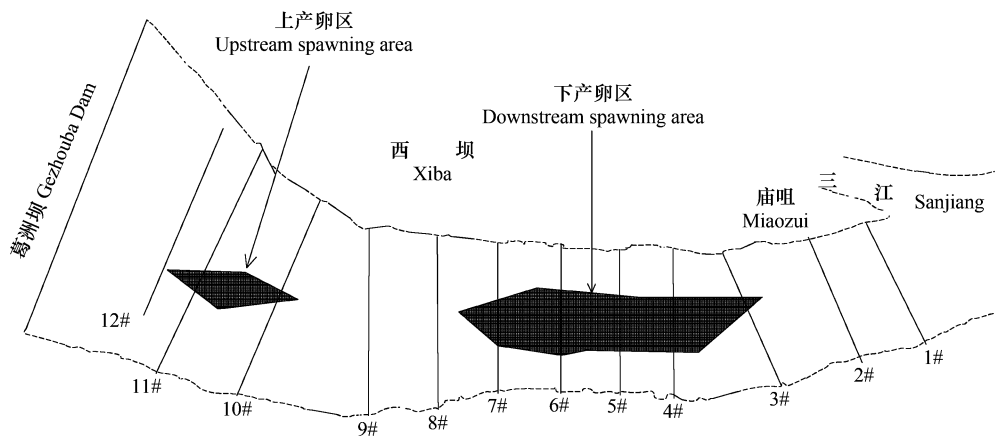


图2 中华鲟产卵场分布图

Fig.2 Diagram of study field map and the cross-sections

2 数值模拟计算

数值模拟计算采用 DELFT3D 中的 FLOW 模块。

选取葛洲坝至庙嘴江段为研究区域, 此江段为稳定的产卵场^[16], 中华鲟的上、下产卵区都在此处, 其中下产卵区为主产卵区, 上产卵区为次产卵区也称随机产卵区, 上产卵区极少使用, 分布如图2所示。区域南北跨度约4km, 东西跨度约2.1km, 大部分水域水深小于30m。

2.1 DELFT3D-FLOW 基本方程

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [h \bar{U}]}{\partial x} + \frac{\partial [h \bar{V}]}{\partial y} = S \quad (6)$$

式中, S 表示单元面积流入或流出的水量。

$\bar{U}, \bar{V}$ 分别表示在 σ 坐标下某一层的垂向平均流速的 x, y 方向分量。

水平动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (8)$$

其中水平方向的压力项 P_x 和 P_y 由下式给出 (Boussinesq 近似):

$$\frac{1}{\rho_0} P_x = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho_0} P_y = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (10)$$

F_x 和 F_y 为水平雷诺应力项, 对于大尺度范围的数值模拟, 可简化为:

$$F_x = \nu_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

$$F_y = \nu_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

式中, M_x 和 M_y 表示外部源和汇的动量。 U 表示 x 方向流速, V 表示 y 方向流速; ν_H 表示垂直方向动力粘滞系数, ν_v 表示水平方向动力粘滞系数; ρ_0, ρ 分别表示水的参考密度和水体实际密度 (包括了盐度、温度与泥沙等); g 表示重力加速度; h 表示水深; ζ 表示水位; u, v, ω 分别表示 σ 坐标下的 x, y, z 方向速度; f 表示科氏力的影响。

紊流方程:

紊流方程选用 $k-\varepsilon$ 双方程模型。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\xi} \frac{\partial k}{\partial \sigma} = + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\left(v_{\text{mol}} + \frac{v_{3D}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right] + P_k + P_{kw} + B_k - \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\xi} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\left(v_{\text{mol}} + \frac{v_{3D}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right] + P_\varepsilon + P_{\varepsilon w} + B_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (14)$$

式中各符号意义见文献^[17]。

2.2 模型建立

2.2.1 初始条件和边界条件

初始条件以零启动形式给出, 以零流速作为初始条件, 同时给出初始水位值。

固壁边界为无滑动边界, 采用流量-水位边界条件。

2.2.2 网格划分

考虑到中华鲟为底栖类动物, 产沉性粘性卵, 模拟目的是计算底层紊动能。网格划分为平面上 535×221 个, 垂向上采用分层方法, 共分 4 层, 其分配方式从上到下为 30%, 25%, 25%, 20%。

2.2.3 模型验证

采用边界条件为流量 Q 为 $10415 \text{ m}^3/\text{s}$, 水位 H 为 41.1 m 工况下实测资料对模型进行验证。该资料采集时间为 2004 年 11 月 16 日, 正值中华鲟产卵期。流速模拟计算值与实测值比较见图 3, 图中给出了 7、8 断面的对比。由图 3 可见, 除个别点差别较大外, 大多数测点模拟流速与实测流速都比较接近。计算成果基本合理, 模拟结果可以采用。

3 紊动能与产卵行为之间关系

中华鲟为底栖类动物, 产沉性粘性卵, 故本文探讨相对水深为 $0.8H$ 位置处紊动能 (Turbulent Kinetic

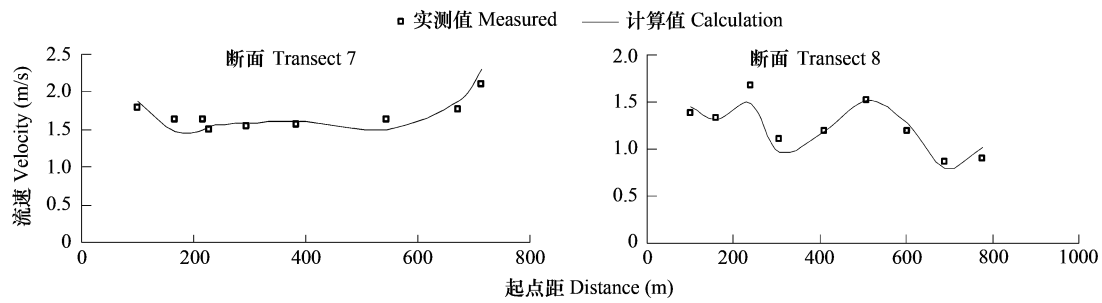


图3 7、8断面实测与计算垂向平均流速大小比较

Fig. 3 Comparison of calculation and measurement mean velocity on 7, 8 cross-sections

Energy 简称 *TKE*) 与中华鲟产卵行为之间的关系。根据测量时断面的布设,分别计算了各个断面紊动能以及断面平均紊动能,见图4、5。由图4可得,断面1、2和3的紊动能分布均呈抛物线形,中间大,越靠近两岸值越小;断面1、2的最大值均小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$,断面3最大值为 $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。断面4、5、6和7紊动能总体部分较为平均,值较大。断面4,88%区域紊动能大于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$,75%区域大于 $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$;断面5,39%区域紊动能大于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$;断面6,35%区域大于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$;断面7,89%区域紊动能大于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。断面8、9属于一

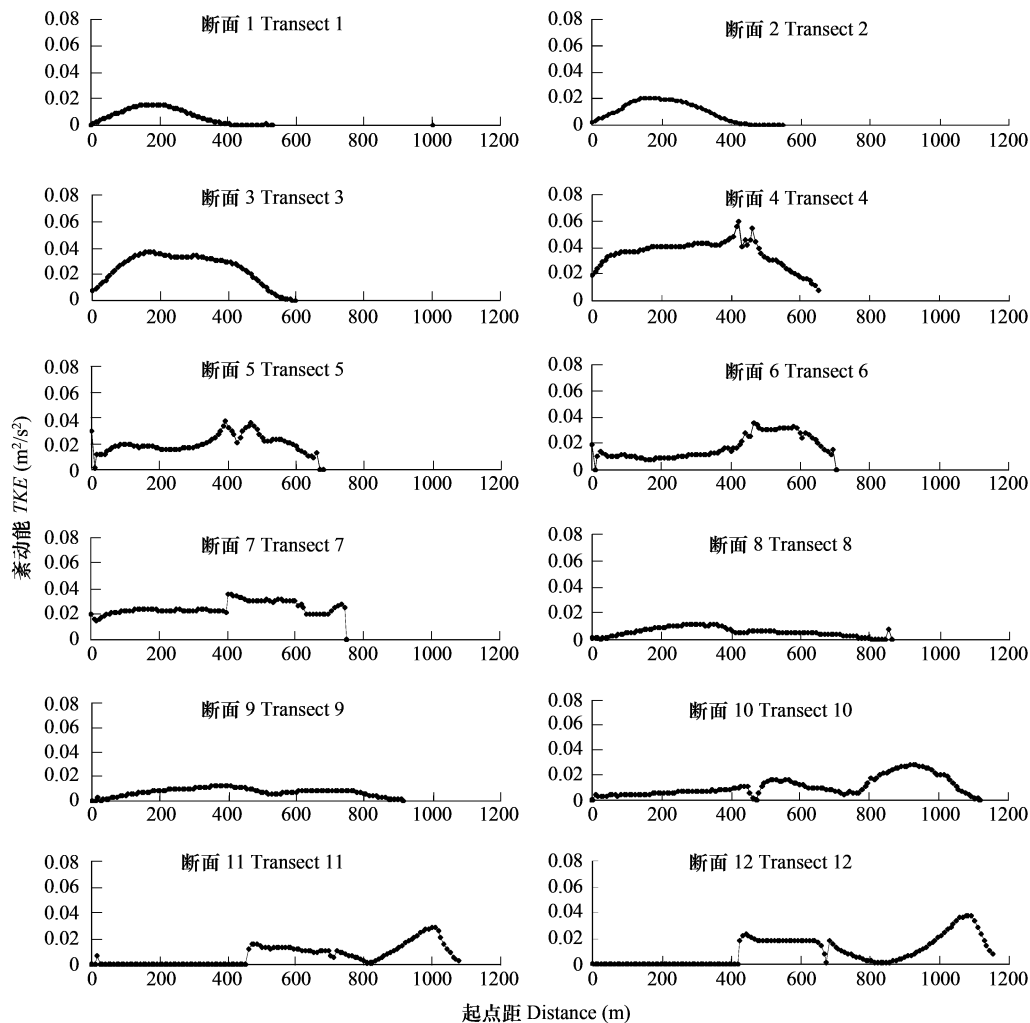


图4 各个断面紊动能的分布图

Fig. 4 TKE distributions of all cross-sections

类,紊动能值均较小,其中断面8的83%区域小于 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$,断面9的81%区域小于 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。断面10、11和12上的紊动能分布较为一致,左岸值非常小,接近为0,中部和右岸值变化较大。从图5可知,12个断面的平均紊动能值变化较大,位于主产卵区的3、4、5、6、7断面紊动能均值较大,均大于 $0.016 \text{ m}^2/\text{s}^2$,其余断面均小于 $0.011 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。紊动能最大值发生在断面4,其值为 $0.035 \text{ m}^2/\text{s}^2$,最小值发生在断面8处,其值为 $0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。为进一步确认主产卵区的紊动能分布与非产卵区的不同,利用秩和检验方法对整个研究区域的断面进行检验。将各个断面的所有紊动能值分成两组,断面3、4、5、6、7数据构成一组,其余各断面数据为一组。对这两组值进行秩和检验。计算得断面3、4、5、6、7组的平均秩为715.26,另一组的平均秩为535.75,在显著性水平为 $\alpha=1\%$ 以下,认为这两组数据有显著性差异。断面3、4、5、6、7紊动能分布与其它各断面不同。

由图2和图5与以上分析可知,断面3、4、5、6、7所在位置正是中华鲟最稳定最主要的产卵区,从上述紊动能计算结果可得知这些断面因紊动带来的水流能量损失也明显区别于其他断面,这种能量损失大于其余断面。从水流紊动和能量角度体现了中华鲟产卵行为对水流的一种偏好性。中华鲟在产卵期间喜好掺混强的水流,这种水流有利于提高卵的受精率,并有助于受精卵在河床上的散布,进而减小被其他鱼类捕食的机会,这种选择具有重要的生物学意义。由上述分析可得,在一定程度上紊动能可以用来衡量中华鲟产卵场水流特征,与鱼类产卵行为具有一定的相关性。

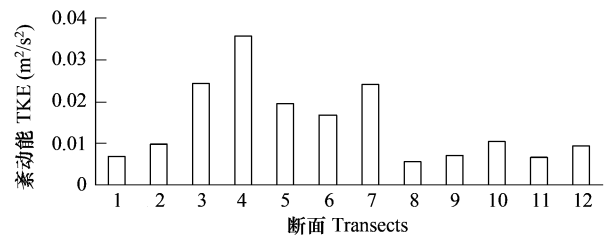


图5 各断面平均紊动能分布图

Fig. 5 Average TKE distributions of all cross-sections

4 结论

本文对圣维南方程进行了发展,推导出的方程能够描述鱼类产卵场特殊的水流状态,克服了传统水流方程的不足之处。新的方程比原来多出新的一项,此能量项是紊动能的函数。利用三维水动力学数学模型DELFT3D模拟了中华鲟产卵场的流场,通过与实测资料的对比,模拟结果较好,精度较高。在模拟的基础上计算了底层(0.8h)处的紊动能的分布情况。由新推导的方程可知,紊动能的大小能够反映由紊动引起的水流能量损失的大小。计算结果表明,中华鲟产卵区的水流能量损失明显大于非产卵区的,说明中华鲟喜好在紊动较为剧烈的水流条件下产卵。这种水流状态能刺激亲鱼的产卵和卵孵化具有重要的生物学意义。从上述分析可知,鱼类产卵场水流状态不同于通常的水流条件,验证了本文提出的产卵场存在特殊的水流能量损失这一观点。希望本文能够为中华鲟和其他鱼类产卵场的保护和修复工作提供一定的参考。

References:

- [1] Whetton J M, Pasternack G B, Merz j E. Spawning habitat rehabilitation I. Conceptual approach and methods. *International Journal of River Basin Management*, 2004, 2 (1):3-20.
- [2] Crespin D E Billy V, Usseglio-polaterA P. Traits of brown trout prey in relation to habitat characteristics and benthic invertebrate communities. *Journal of Fish Biology*, 2002, 60 (3):687-714.
- [3] Yi Bolu, Yu Zhitang Liang Zhishen. *Gezhouba Water Control Project and Four Famous Fishes in Yangtze River*. Wuhan, China: Hubei Science and Technology Press, 1988.
- [4] Tritico H M, Hotchkiss R H. Unobstructed and obstructed turbulent flow in gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(8): 635-645.
- [5] Shamloo H, Rajaratnam N, Katopodis C. Hydraulics of simple habitat structures. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 39-4, 351-366.
- [6] Shields F D, Morin N, Cooper C. Large woody debris structures for sand-bed channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(3), 208-217.
- [7] Moir H J, Soulsby C, Youngson A. Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Gironck Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology*, 1998, 5(3):241-254.
- [8] Baumgartner N, Waringer A, Waringer J. Hydraulic microdistribution patterns of larval fire salamanders (*Salamandra salamandra salamandra*) in

- the Weidlingbach near Vienna, Austria. *Freshwater Biology*, 1999, 41(1):31—41.
- [9] Biggs B J F, Goring G, Nikora V I. Subidy and Stress Responses of Stream Periphyton to Gradients in Water Velocity as a Function of Community Growth Form. *Journal of Phycology*, 1998, 34 (4):598—6071
- [10] Power J H I. Simulations of the effect of advective-diffusive processes on observations of plankton abundance and population rates. *Journal of Plankton Research*, 1996, 18(10):1 881—1 896.
- [11] Crowder D W, Diplas P. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57 (7):1497—1507.
- [12] Crowder D W, Diplas P. Vorticity and circulation: spatial metrics for evaluating flow complexity in stream habitats. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59 (4):633—645(13).
- [13] Crowder D, Diplas P. Applying Spatial Hydraulic Principles to Quantify Stream Habitat. *River Research and Applications*, 2006, 22(1), 79—89.
- [14] Wu ChiGong. *Hydraulics*. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [15] Yevjevich V, Mahmood K. *Unsteady Flow in Open Channels*. Water Resources Pub. , FortCollins, Colorado, 1975. Vol. 2.
- [16] Wei Q W. Reproductive behavioral ecology of Chinese sturgeon with its stock assessment. Institute of hydrobiology Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China, 2003.
- [17] W L, Delft Hydraulics, Delft3D-Flow manual, User manual, 2005.

参考文献:

- [3] 易伯鲁,余志堂,梁秩桑. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉:湖北科学技术出版社,1988.
- [14] 吴持恭. 水力学. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [16] 危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估. 武汉:中国科学院水生生物研究所. 2003.