

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700549

## 考虑干支流倒回灌的小浪底水库异重流模拟

王增辉<sup>1</sup>, 夏军强<sup>1\*</sup>, 张俊华<sup>2</sup>, 李 涛<sup>1,2</sup>

(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘 要:**小浪底水库支流众多, 支流库容占总库容的41.3%, 干支流倒回灌对干流洪水演进和库区淤积过程有重大影响, 为此作者提出了考虑干支流倒回灌影响的水库1维明流及异重流耦合模型。推导了不同类型倒回灌引起的水沙控制方程附加项, 并提出了相应的水沙耦合形式的浑水明流与异重流控制方程。针对不同的倒回灌形式提出相应的倒回灌流量计算方法: 对于干流水位涨落引起的干支流倒回灌, 提出了零维水库法在使用有限体积法的数学模型中的实现方法; 对于异重流向支流的倒灌, 采用考虑支流底坡影响的异重流倒灌流量公式加以计算。将这两种方法与已建立的水库1维明流与异重流耦合模型结合, 模拟了2006年小浪底水库调水调沙实验的完整过程, 对库区内水位下降、上游段冲刷及人工异重流形成与发展均做出了较为准确的模拟。模拟结果显示, 干支流倒回灌过程对于异重流厚度变化过程和调水调沙出库沙量有显著影响, 对于汛前泄水阶段库区水位下降速度也有一定影响, 支流淤积在一次异重流过程淤积总量中可达43.5%。相对于简化干支流倒回灌过程的计算方法, 该模型对异重流排沙比的预测效果更好, 证明其有助于实现更加科学合理的调水调沙方案设计。

**关键词:**异重流; 调水调沙; 干支流倒回灌; 小浪底水库

中图分类号:TV145.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)01-0085-09

### Modeling Turbidity Currents in the Xiaolangdi Reservoir with the Effect of Flow Exchanges with Tributaries

WANG Zenghui<sup>1</sup>, XIA Junqiang<sup>1\*</sup>, ZHANG Junhua<sup>2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>

(1.State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Eng. Sci.,Wuhan Univ.,Wuhan 430072,China;

2.Yellow River Inst. of Hydraulic Research,Zhengzhou 450003,China)

**Abstract:** The Xiaolangdi Reservoir is characterized by its many tributaries. The storage capacity of tributaries accounts for 41.3% of the total capacity of the reservoir, and the flow exchanges between the main channel and tributaries have a great impact on the flood routing and sedimentation distribution. Therefore, a one-dimensional model for open channel flows and turbidity currents with the effect of flow exchanges with tributaries was proposed in this study. A composite method to calculate the flow exchanges between the main channel and tributaries was presented. For flow exchange caused by the water level variation of the main channel, the storage cell algorithm was implemented in the numerical model based on the finite volume method. For turbidity current intrusion into tributaries, an improved formula to estimate the intrusion discharge was introduced, with the effect of bed slope of the tributary being considered. These two methods were integrated with an existing coupled model of open channel flow and turbidity current to simulate the whole process of flow-sediment regulation in the Xiaolangdi reservoir in 2006. Successful predictions were obtained, including the processes of water level falling, bed erosion in the upstream reach, and formation and development of the artificially created turbidity current. The simulations indicate that the flow exchange processes have great impacts on the amount of released sediment during an event of water-sediment regulation. As compared to the simulation methods neglecting or oversimplifying the flow exchanges, the proposed model produces a better prediction to the sediment delivery ratio, which demonstrates its potential to help design the scheduling scheme for water-sediment regulation.

**Key words:** turbidity current; water-sediment regulation; flow exchange; Xiaolangdi Reservoir

收稿日期:2017-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51725902;51579186);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401023)

作者简介:王增辉(1988—),男,博士.研究方向:河流数值模拟. E-mail: wang\_zh@whu.edu.cn

\* 通信联系人 E-mail: xiajq@whu.edu.cn

多沙河流上修建水库必须要考虑异重流处置措施,如考虑不周,会对水库的正常运行及可持续利用造成严重影响;如果处置得当,则能够作为有效的排沙措施在水库泥沙管理中发挥积极作用<sup>[1]</sup>。由于开展水库异重流原型观测存在许多困难,故目前多采用异重流数学模型计算库区水沙输移及冲淤过程。已有异重流模型可以分为3类:基于Navier-Stokes方程的3维或立面2维模型<sup>[2-3]</sup>、基于水深平均的平面2维模型<sup>[4]</sup>、基于断面平均的1维模型<sup>[5]</sup>。由于水库实际地形条件及异重流边界条件较为复杂,以往模型多局限于模拟水槽实验过程。Cao等<sup>[6]</sup>使用双层深度平均模型计算了小浪底水库2004年的一次异重流洪水过程,但没有考虑干支流倒回灌的影响。异重流水槽实验为异重流潜入、交界面掺混等关键问题提供了研究资料<sup>[7]</sup>,现阶段数学模型方程组封闭还离不开实验观测得到的经验公式。

目前,通过水沙动力学模型计算调水调沙期间小浪底库区异重流过程存在如下难点:1)异重流形成初期的泥沙往来自坝前水位快速下降造成的库尾强烈冲刷,但是目前大多数模型都没有考虑高含沙量或急剧床面冲淤对洪水演进的影响;2)异重流产生时,潜入点位置及其附近水沙条件难以预测,这就造成了异重流上游边界条件难以给定的问题;3)小浪底水库支流众多,支流库容占总库容比例很大<sup>[8]</sup>,干支流倒回灌对异重流演进的影响不能忽略。

针对第1个难点作者采用了水沙完全耦合的浑水控制方程,充分考虑了泥沙输移与河床变形对水流运动的影响。针对第2个问题,推导了保持水沙耦合性质的1维非恒定异重流运动方程,并通过两步计算模式建立了水库明流与异重流耦合模型,该模型曾用于模拟三门峡水库异重流过程<sup>[9]</sup>。作者在明流与异重流耦合模型的基础上将重点解决上述第3个问题,即如何在耦合模型中考虑干支流倒回灌过程。

当水库蓄水或洪水入库使干流水位升高时,部分干流水量会注入支流,称为干流向支流倒灌;反之,库水位下降时,支流部分蓄水会回流到干流,称为支流回灌。此外,当干流异重流运行到支流口门时,会有一部分流入支流,称为异重流倒灌。在使用有限差分法Preissmann离散格式的1维数学模型中,一般假设交汇区干支流水位相等并给出水位联接条件,再把支流当作零维水库给出水流连续条件,由这两个条件推导出追赶法进行到交汇区时的增量线性方程系数<sup>[10]</sup>。He等<sup>[11]</sup>使用了基于能量方程的水位联接条件。伍超等<sup>[12]</sup>提出的求解方法不需要推导考虑倒回灌后的追赶法系数,而是在每一时间步首先忽略支流影响,通过不断的预测校正得到交汇区的水

位。以上方法均需迭代计算,且只针对明流倒回灌过程。作者将在有限体积法离散中把支流和与其相邻的主流段作为一个整体,考虑其水量平衡,得到交汇河段的水位计算方法,控制方程离散格式仍保持显格式。对于异重流倒灌,已有的倒灌流量计算公式<sup>[13-14]</sup>大部分未考虑支流形态特征的影响,作者首先结合小浪底水库地形特点,采用考虑底坡影响的异重流倒灌流量公式<sup>[15]</sup>。然后,将该公式计算的倒灌流量当作侧向出流,加入考虑支流倒灌的异重流控制方程相关源项中。之后,将干支流倒回灌综合计算方法整合到水库明流与异重流耦合模型中,通过对小浪底水库调水调沙过程的模拟进行模型验证。

## 1 模型方程与数值计算方法

### 1.1 浑水明流控制方程

参考文献<sup>[9]</sup>中推导异重流水沙耦合模型的方法,首先在浑水明流控制方程组中加入考虑侧向出流或入流后的连续方程与泥沙输移方程附加项,假设交汇角为90°,忽略倒回灌水量携带的主流方向动量。然后,经过一系列变换得到如下形式的浑水明流控制方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_b}{\partial t} = \frac{B(D-E)}{1-p} \quad (2)$$

式中,

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \\ AC \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} Q \\ Q^2/A \\ QC \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} B(E-D)/(1-p) - q_1 \\ M_w \\ B(E-D) - S_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $M_w = -\frac{\rho_b - \rho_m}{\rho_m(1-p)}BU_m(E-D) - \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m}(Cq_1 - S_1)U_m + gA(S_b - S_f) - gA\frac{\partial h_m}{\partial x} - gh_c\frac{A}{\rho_m}\frac{\partial \rho_m}{\partial x}$ 。

式(1)~(3)中:  $A$ 为过流断面面积;  $Q$ 为断面流量;  $C$ 为体积比含沙量;  $B$ 为水面宽度;  $E$ 为床沙上扬通量;  $D$ 为悬沙沉降通量;  $U_m$ 为断面平均流速;  $\rho_w$ 、 $\rho_m$ 分别为清混水的密度;  $\rho_b$ 为床沙饱和湿密度;  $\rho_s$ 为泥沙颗粒密度;  $p$ 为床沙的孔隙率;  $g$ 为重力加速度;  $S_b$ 为底坡;  $S_f$ 为阻力坡度;  $h_m$ 为水深;  $h_c = \left[ \int_0^{h_m} B_z(h_m - z) dz \right] / A$ 为过流断面形心高度;  $q_1$ 为干支流倒回灌净单宽流量,规定从干流到支流为正;  $S_1$ 为干支流倒回灌运动的输沙率;  $\partial A_b / \partial t$ 为冲淤断面面积的变化速率。

式(3)中:源项 $S$ 的3个分量中各有1个干支流倒回灌引起的附加项;  $q_1$ 的计算使用零维水库法,将在后文介绍;  $S_1$ 需要根据不同的干支流倒回灌类型(表1)采用相应的表达形式。表1中,  $q_0$ 为异重流倒灌流量,

$C_t$ 为干流中的异重流含沙量。

表1 干支流倒回灌输沙率计算方式

Tab.1 Methods to calculate sediment transport rate for different types of flow exchanges

倒回灌形式	输沙率( $S_t$ )
只有浑水明流倒灌	$Cq_t$
只有支流回灌	0
存在异重流倒灌	$C_t q_u$

## 1.2 异重流控制方程

在文献[9]不考虑支流的异重流控制方程中,加入异重流倒灌流量 $q_u$ 可以得到:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = R \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_b}{\partial t} = \frac{B_t(D_t - E_t)}{1 - p} \quad (5)$$

$$\text{式中: } T = \begin{bmatrix} A_t \\ Q_t \\ A_t C_t \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} Q_t \\ Q_t^2/A_t \\ A_t C_t \end{bmatrix} \\ R = \begin{bmatrix} B_t(E_t - D_t)/(1 - p) + B_t e_w U_t - q_u \\ M_t \\ B_t(E_t - D_t) - C_t q_u \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $M_t = -\frac{\rho_b - \rho_t}{\rho_t(1 - p)} B_t U_t (E_t - D_t) + \frac{\rho_t - \rho_w}{\rho_t} B_t e_w U_t^2 +$

$$g' A_t S_b - g A_t S'_f - g A_t \frac{\rho_w}{\rho_t} \frac{\partial z_s}{\partial x} - g' A_t \frac{\partial h_t}{\partial x} - g h_{ct} \frac{A_t}{\rho_t} \frac{\partial \rho_t}{\partial x}.$$

式(4)~(6)中,  $A_t$ 、 $Q_t$ 分别为异重流层的面积、流量,  $B_t$ 为清浑水层交界面的宽度,  $\rho_t$ 、 $U_t$ 为异重流层的密度与断面平均流速,  $h_t$ 为异重流层厚度,  $E_t$ 和 $D_t$ 分别为异重流与床面的泥沙交换通量,  $e_w$ 为清水掺入系数,  $g' = (\rho_t - \rho_w)g/\rho_t$ 为有效重力加速度,  $S'_f$ 为考虑界面阻力后的综合阻力坡度,  $z_s$ 为水面高程,  $h_{ct}$ 为异重流断面形心高度。

## 1.3 数值离散方法

以异重流控制方程为例,按有限体积法显格式离散得到:

$$T_i^{n+1} = T_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (G_{i+1/2}^n - G_{i-1/2}^n) + \Delta t R_i^n \quad (7)$$

式中,  $T_i^n$ 、 $R_i^n$ 分别为第 $n$ 时间步长内第 $i$ 个控制体内 $T$ 、 $R$ 的平均值,  $G_{i+1/2}^n$ 为第 $i$ 、 $i+1$ 个控制体之间界面上的数值通量,  $\Delta t$ 、 $\Delta x$ 分别为时间和空间步长。

数值通量 $G_{i+1/2}^n$ 使用HLLC黎曼算子[16]计算。源项中,床面泥沙通量 $D_t$ 和 $E_t$ 、清水掺入系数 $e_w$ 以及综合阻力坡度 $S'_f$ 需要与守恒变量联系起来以使方程组封闭,具体表达式以及其他包含梯度的源项离散方法见文献[9]。

## 2 干支流倒回灌计算方法

### 2.1 零维水库法

浑水明流与异重流两组方程通过两步计算模式[9]交替运算,在执行浑水明流计算时,需要首先完成交汇区的水位计算才能得到干支流倒回灌的净流量 $q_t$ 。记与支流相连接的控制单元的序号为 $r$ ,更新 $U_r$ 的第1个分量,即 $A_r$ 时,将该单元与支流作为一个整体(图1),其代表面积为 $A_*$ 。假设交汇处的水位与支流内水位相等,则 $A_*$ 与 $A_r$ 间存在关系:

$$A_*(z_{s,r}) = A_r(z_{s,r}) + V(z_{s,r})/\Delta x \quad (8)$$

式中,  $V(z_s, r)$ 为支流的水位库容函数。对于图1中粗实线内的控制体,进出它的数值通量只产生在原主流上第 $r$ 个控制体的两侧,所以按式(9)计算 $A_*^{n+1}$ :

$$A_*^{n+1} = A_*^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{1,r+1/2}^n - F_{1,r-1/2}^n) + \Delta t S_{1,r}^n \quad (9)$$

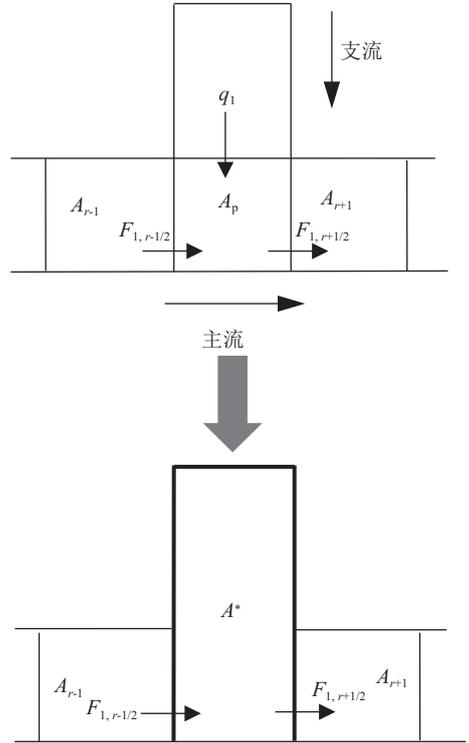


图1 零维水库法示意图

Fig.1 Sketch of storage cell method

注意这里 $S_{1,r}^n$ 中不包含 $q_t$ ,因为此时 $q_t$ 是扩大的控制体内部的流动。得到 $A_*^{n+1}$ 后再由式(8)求得对应的 $z_{s,r}^{n+1}$ ,进而得到 $A_r^{n+1} = A_r(z_{s,r}^{n+1})$ 。

最后可得到倒回灌净流量的计算公式,即:

$$q_t^n = \frac{V(z_{s,r}^{n+1}) - V(z_{s,r}^n)}{\Delta x \Delta t} \quad (10)$$

$U_r$ 其余分量的计算按1.3节中的一般离散形式进行。

## 2.2 考虑底坡的异重流倒灌公式

已有的异重流倒灌流量公式在推导时均假设支流底坡为0, 而实际水库中支流河底为倒比降(相对于异重流倒灌方向), 且支流底坡往往比干流大很多。以小浪底水库为例, 其支流煤窑沟、石门沟的底坡均超过了1.5%(根据2006年汛前实测地形计算), 所以这些公式计算的倒灌流量常比实际流量大很多。为此在本文模型中采用考虑底坡的异重流倒灌流量公式计算 $q_{ii}$ <sup>[15]</sup>:

$$q_{ii} = h_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\left(2J\frac{L}{h_0} - 4\right)\xi - 6J\frac{L}{h_0} + 4}{(3-\xi)^3}} (1+\xi)\eta g \quad (11)$$

式中:  $h_0$ 为交汇区干流异重流厚度;  $\xi$ 为阻力损失系数;  $J$ 为支流底坡;  $L$ 为潜入段长度;  $\eta = (\gamma - \gamma_0) / \gamma$ ,  $\gamma_0$ 和

$\gamma$ 分别为清浑水容重。

式(11)与一般异重流倒灌流量公式的区别在于: 其推导时在动量方程中加入了底坡上的压力项, 在 $J$ 取0时与韩其为提出的倒灌流量公式相同<sup>[13]</sup>。支流口门异重流厚度和含沙量一定时, 随着底坡的增大, 倒灌流量逐渐减小。 $\xi$ 的大小受支流底坡限制, 即:

$$\xi < \left(2\frac{h_0}{L} - 3J\right) / \left(2\frac{h_0}{L} - J\right) \quad (12)$$

$h_0/L$ 的取值按照Li等<sup>[17]</sup>研究水库异重流潜入点弗汝德数时的做法, 设为1/9。

## 2.3 总体模型求解步骤

将上述两种干支流倒灌计算方法与水库明流与异重流耦合模型整合后, 得到新的模型计算流程如图2所示。

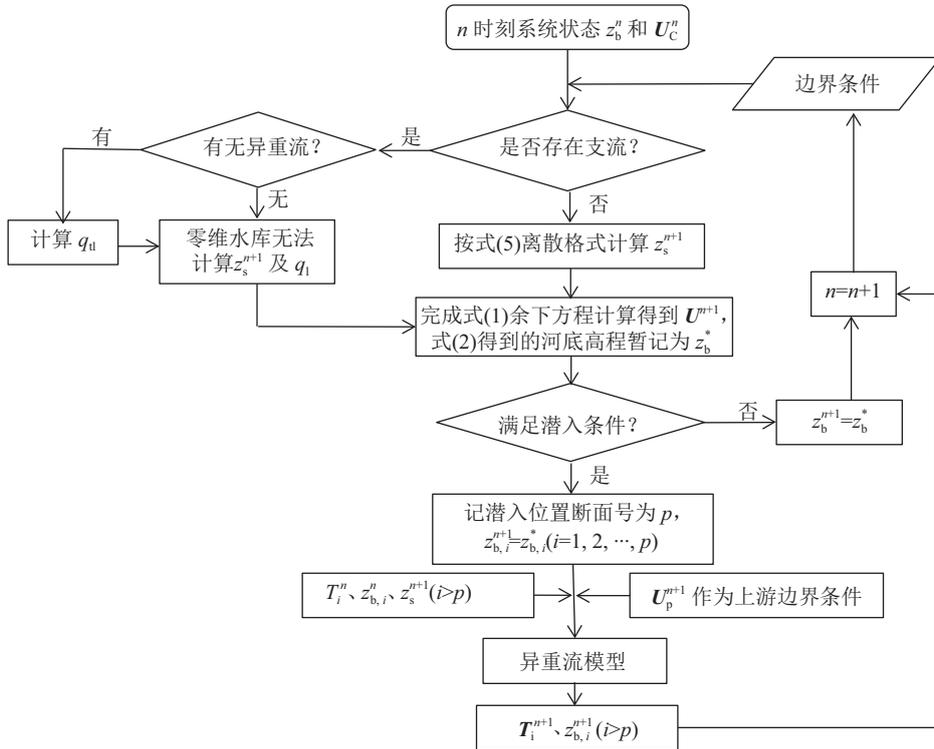


图 2 模型计算流程

Fig.2 Flowchart of solution procedure

可总结为以下4步:

1) 根据 $n+1$ 时刻边界条件以及 $z_b^n$ 和 $U^n$ , 计算数值通量 $F$ , 对于和支流邻接的控制单元, 按零维水库法计算 $z_s^{n+1}$ 及 $q_i$ , 如果该控制单元位置还存在异重流, 则用式(11)计算 $q_{ii}$ ; 对于一般的控制单元, 按式(7)离散格式计算得到 $z_s^{n+1}$ 。

2) 完成浑水明流控制方程中余下的流量、含沙量计算得到 $U^{n+1}$ , 更新后的河底高程 $z_b$ 暂记为 $z_b^*$ 。

3) 从整个计算域的上游开始, 逐个计算每一控

制单元的 $U^{n+1}$ 是否满足潜入条件, 若满足则记录下断面号 $p$ , 更新明流段河底高程, 进入步骤4); 若所有断面位置的 $U^{n+1}$ 均不满足潜入条件, 则令 $z_b^{n+1} = z_b^*$ ,  $n = n+1$ , 返回步骤1)。

4) 将 $U_p^{n+1}$ 作为异重流模型的上游边界条件, 计算 $T_i^{n+1}$ ,  $z_{b,i}^{n+1}$  ( $i = p+1, p+2, \dots, N$ ), 令 $n = n+1$ , 返回步骤1)。

步骤3)中判断异重流潜入位置时使用的是Xia等<sup>[18]</sup>提出的弗汝德数 $Fr$ 与体积比含沙量之间的经验关系。

### 3 小浪底水库异重流过程模拟

#### 3.1 水库概况与调水调沙过程介绍

小浪底水库位于黄河中游下段,其控制流域面

积为 $69.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占黄河流域面积的92.3%,控制黄河流域近100%的泥沙。库区为峡谷型水库,平面形态上窄下宽,且库区内支流众多,支流库容占总库容的41.3%<sup>[8]</sup>,库区平面图见图3。

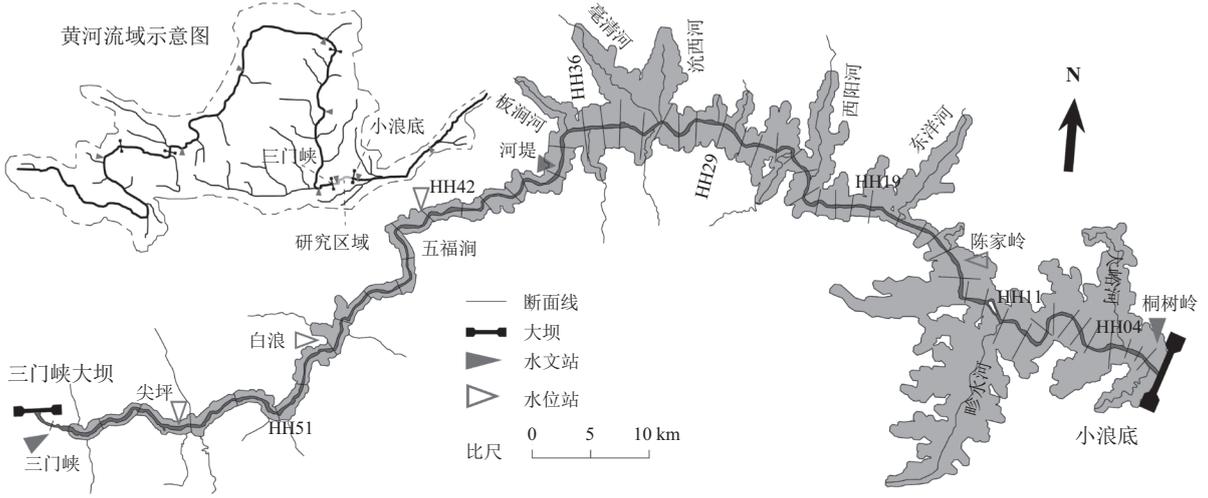
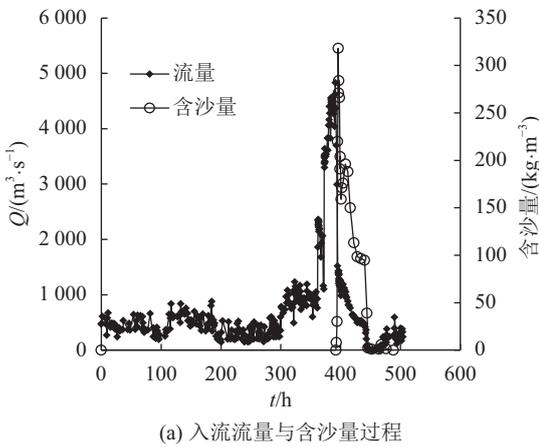


图3 小浪底库区平面示意图

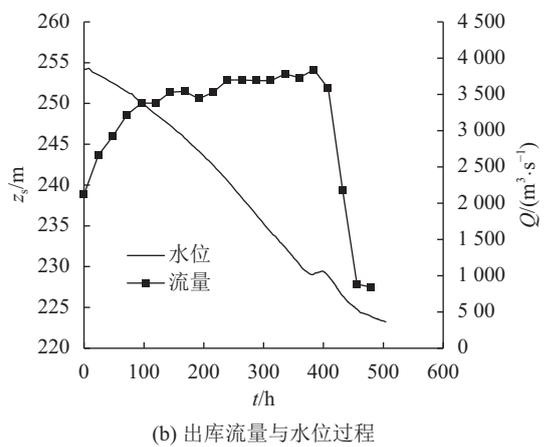
Fig.3 Planview of the Xiaolangdi Reservoir

2006年,小浪底调水调沙过程分为调水调度期和排沙期两个阶段。调水调度期为6月10日9时至6月25日12时,小浪底下泄流量由 $2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐步增大到 $3\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上游三门峡水库按库水位318 m控制。之后,转入排沙期,首先三门峡水库加大下泄流量,大流量冲刷小浪底库尾段形成的高含沙水流,于6月25日09:42:00,在小浪底库区内监测到异重流潜入,潜入点距坝44 km。6月25日小浪底排沙洞已基本打

开,6月26日08:48:00下泄流量达到最大值 $4\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,因此异重流到达坝前,然后顺利出库,此时三门峡水库敞泄排沙运用。小浪底水位降至汛限水位225 m后按 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 控泄2 d。模型计算时间为6月10日00:00:00至6月28日20:00:00,共452 h。以该时段内三门峡水库下泄流量和含沙量过程作为上游边界条件,见图4(a)。以小浪底下泄流量过程和坝前桐树岭站水位作为下游边界条件,见图4(b)。



(a) 入流流量与含沙量过程



(b) 出库流量与水位过程

图4 模型的上下游边界条件

Fig.4 Upstream and downstream boundary conditions of the model

计算区域从三门峡坝下第1个测量断面HH56至小浪底坝前HH01断面,全长123.4 km,库区内最大的12条支流的影响均被考虑在计算过程中。这12条支流分布在距坝1.3~62.5 km的范围内,底坡变化范围

为0.31%~1.82%之间。根据2006年汛前实测地形计算,275 m以下最大库容为 $12.788 \times 10^8 \text{ m}^3$ (畛水河),最小库容为 $0.434 \times 10^8 \text{ m}^3$ (板涧河),总库容 $35.875 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

### 3.2 模拟结果

按3种不同的方法进行模拟和结果比较。方法1中完全不考虑支流的影响,方法2中使用零维水库法和韩其为异重流倒灌流量公式考虑干支流倒灌影响,方法3中使用零维水库法和考虑底坡影响的异重流倒灌流量公式。各支流的底坡数据决定了 $\xi$ 的取值范围为 $\xi < 0.823$ ,所以在方法3中取 $\xi = 0.82$ 。图5是陈家岭站(HH14断面,距坝22 km)实测与计算的水位过程比较。从图5可以看出:考虑干支流倒灌后计算的水位过程与实测过程几乎完全一致;而不考虑支流情况下预测的水位自 $t = 370$  h之后与实测值差距越来越大,最大误差为 $-1.12$  m。因为方法2和方法3模拟结果的差异主要在于异重流各要素,两者计算的水位差别极小,所以图5中未画出方法2计算的水位。

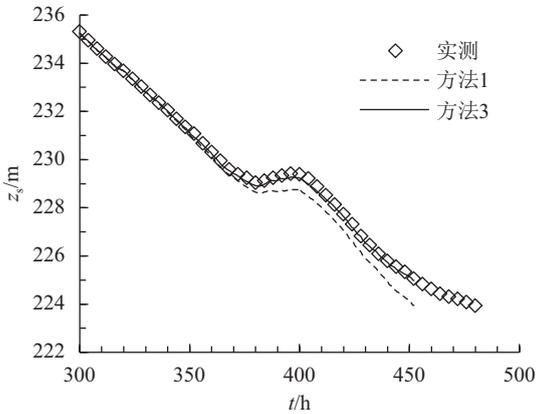


图 5 HH14水位计算与实测值比较

Fig.5 Comparison between predicted and observed water-levels at cross-section HH14

河堤站(HH38,距坝64.83 km)计算的含沙量过程见图6。

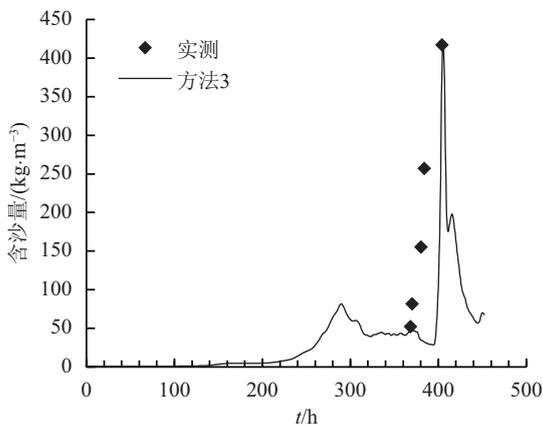


图 6 HH38含沙量计算与实测值比较

Fig.6 Temporal variations of sediment concentration at cross-section HH38

由于河堤站上游没有大的支流,3种方法的计算结果差别很小,所以图6中只画出了方法3的计算结

果。从图6可以看出,河堤站含沙量过程出现两次明显的峰值。第1次是由于库区水位下降,HH38断面超出回水范围,库底冲刷引起。当河堤站出现第1个沙峰,即 $t = 290$  h时,从图4(a)看出,入库的水量还是清水,流量也维持在 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下,也证明了这部分泥沙完全来自库区内河床冲刷。第2次含沙量的峰值实测结果达到了 $417\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,而整个调水调沙过程的入库含沙量最大值为 $318\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,所以这次沙峰是由上游水库排沙与小浪底库区上游段冲刷共同造成的。模型对第2次沙峰预测的起涨时间略晚,但峰值时间和峰值含沙量预测地较准。

2006年异重流观测记录显示潜入位置在HH27断面附近,模型预测的初始潜入位置在HH28断面(距坝46.2 km)。异重流形成4.5 h后到达HH18断面(距坝29.35 km),如图7(a)所示, $Q_{in}$ 为瞬时入库流量。在 $t = 339.17$  h时异重流到达HH01断面,至此异重流在整个传播过程中平均前进速度为 $0.5\ \text{m}/\text{s}$ 。随着上游三门峡水库下泄流量增大,潜入点逐步向下游移动, $t = 378$  h时潜入点位于HH26断面(距坝42.97 km)。洪峰过后潜入点又回到HH28断面, $t = 417$  h时小浪底下泄流量迅速减小,坝前清浑水层交界面快速达到最高点,如图7(b)所示。

图8是不同断面异重流预测的结果。在HH22断面处,由于使用韩其为倒灌流量公式和考虑底坡影响的倒灌流量公式计算结果差别还很小,所以图8(a)中只比较了方法1和方法3的计算结果。方法1仍然出现了预测水面高程低于实测值的现象,并且预测的清浑水层交界面高程在异重流形成和加强阶段明显高于实测值。方法3对水面高程的预测依然比较准确,对交界面高程的预测在异重流后期略小于实测值。由于HH05和HH01断面距离下游边界较近,且下游边界条件中使用了实测坝前水位,所以这两处3种方法预测的水面变化过程基本都与实测一致,但是方法1预测的交界面高程远远高于实测值,甚至在HH01断面预测的峰值几乎达到水面,所以在图8(b)、(c)中只比较了方法2、3以及实测结果。不考虑支流底坡影响时,异重流在各干支流交汇处分流较多,所以方法2预测的交界面高程比方法3低。从图8(c)来看,方法2计算的交界面高程在 $t = 421$  h之后低于实测值,而方法3计算的交界面高程则在异重流过程前期高于实测值,所以两种倒灌流量公式对异重流预测精度的影响还需通过进一步考察泥沙输移计算结果以做出全面评价。

图9是HH09与HH01两断面计算与实测的异重流含沙量过程。由于韩其为公式计算的异重流倒灌流量较大,随之输送到支流的泥沙也较多,所以方法

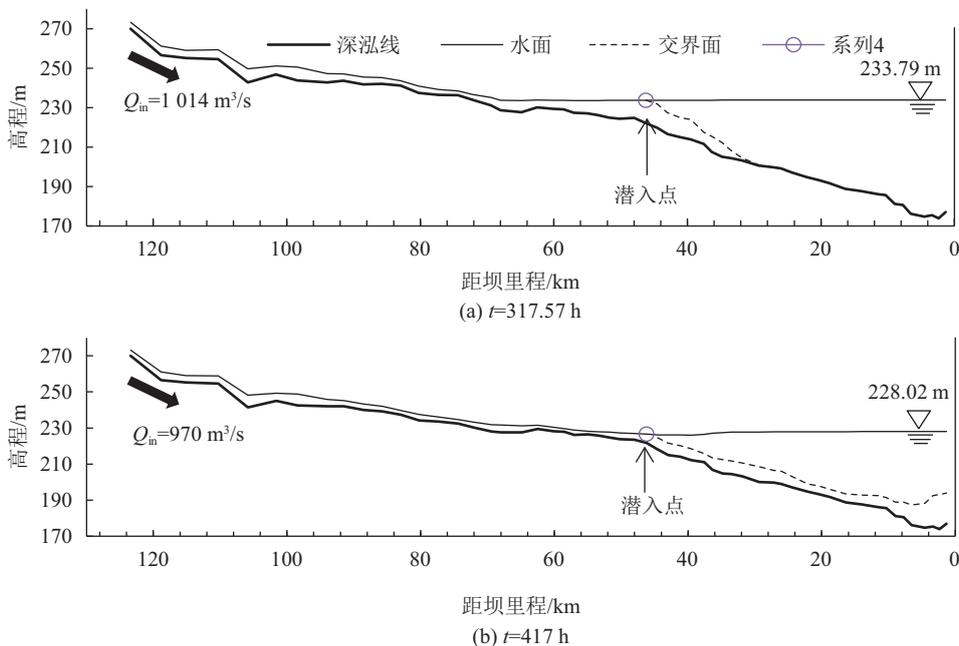


图 7 方法3计算的水面、交界面与深泓点高程沿程分布

Fig.7 Longitudinal profiles of free surface, interface and river bed calculated with method 3

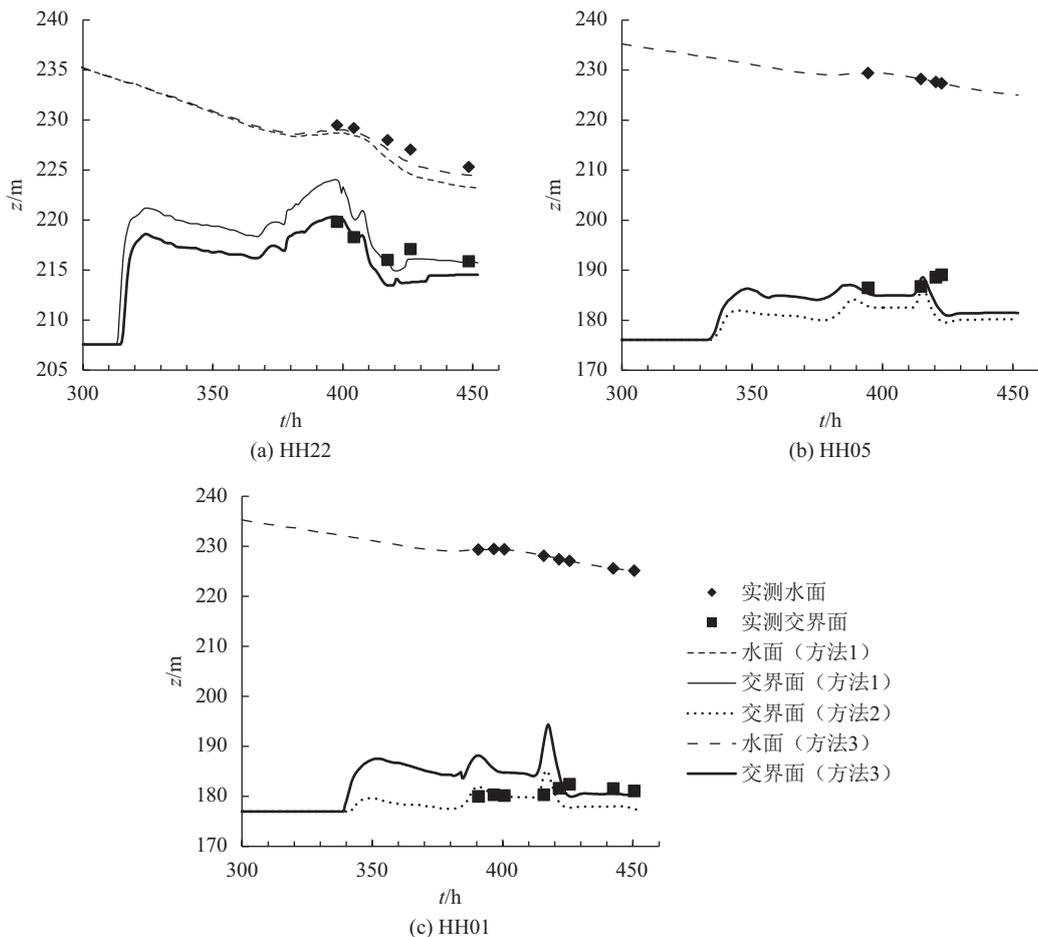


图 8 不同断面位置的水面和交界面高程变化过程

Fig.8 Temporal variations of free surface and interface elevations at different cross-sections

2计算的主流异重流含沙量过程比方法3略小,这种差异越向下游越明显。HH01断面由于受坝前排沙洞布置的影响,其异重流流速和含沙量横向变化较大,所以图9(b)中的实测含沙量代表性略逊于HH09断面的结果。整个调水调沙期间,小浪底水库实测入库沙量 $0.23 \times 10^8$  t,出库沙量 $0.067 \times 10^8$  t,排沙比为29.1%。方法3计算的出库沙量 $0.07 \times 10^8$  t,而方法2计算的出库沙量仅为 $0.014 \times 10^8$  t,所以不考虑支流底坡影响时会过高地计算倒灌入支流的沙量,从而导致对异重流排沙效果的预测产生较大误差。根据断面输沙率计算结果,HH28断面以上的库区冲刷量为 $1.0 \times 10^8$  t,HH28断面以下淤积量为 $1.16 \times 10^8$  t,其中支流淤积占43.5%。已有的研究实验结果表明,支流年淤积量占全库区年淤积量的比值最高可达82%,个别大水年份还会出现干流冲刷支流淤积的情况,所以本文计算的43.5%的支流淤积量是合理的。

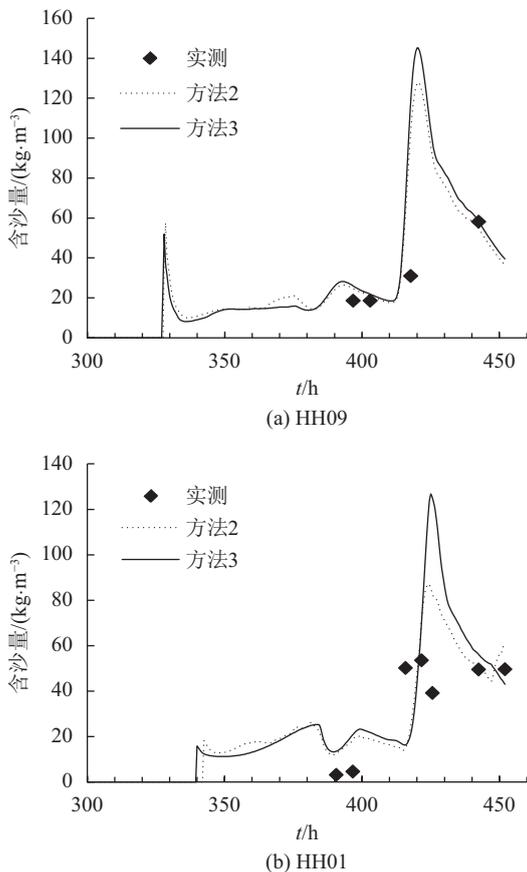


图9 不同断面异重流含沙量过程

Fig.9 Temporal variations of sediment concentration at different cross-sections

3种方法计算的水位、交界面高程、异重含沙量及出库沙量的误差见表2,综合比较表明方法3的总体模拟精度更高。

图10(a)是库容最大的3条支流回灌干流流量过程,  $t=400$  h前后一段时间内各支流回灌干流流量突

然降到0附近是由于该时段内库区水位停止下降。整个模拟时段内,12条支流总回灌流量的平均值为 $910 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最大值为 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图10(b)是位于库区中段、下游与坝前3处3条支流的异重流倒灌流量过程,倒灌流量基本与支流口门异重流厚度变化趋势相同。比较图10(a)和(b)中畛水河计算结果可知,异重流倒灌流量大于零维水库法计算的回灌净流量,说明支流口门的流态为下层有异重流从干流灌入支流,上层有支流蓄水返回干流。

表2 不同模拟方法误差分析

Tab.2 Error analysis of different modelling methods

模型	均方根误差			出库沙量 相对误差
	水位/m	交界面高程/m	异重流含沙量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
方法1	0.627 4	23.711 3	—	—
方法2	0.339 8	3.901 9	14.463 9	-0.79
方法3	0.351 4	4.614 8	14.329 4	0.04

注: —表示最大相对误差超过100%。

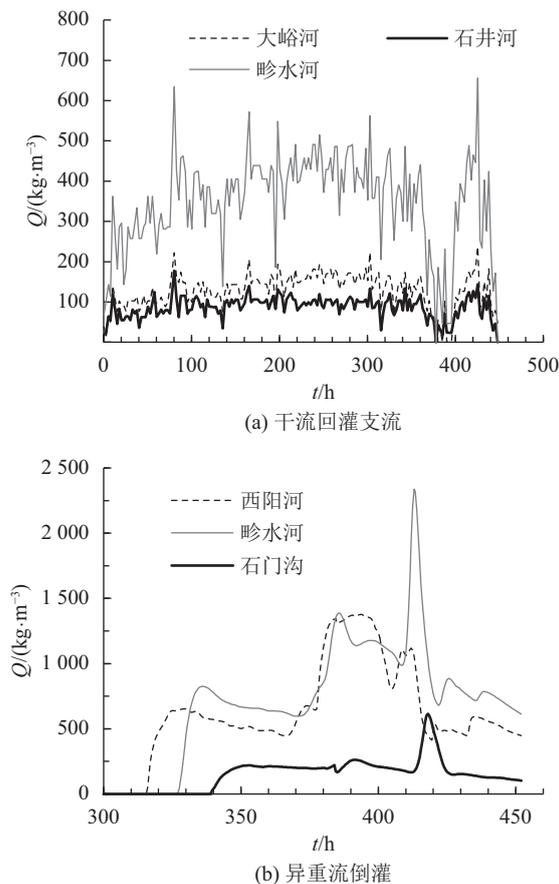


图10 计算的干支流倒回灌过程

Fig.10 Calculated discharges of flow exchanges

## 4 结论

建立了考虑干支流倒回灌的水库明流与异重流耦合模型。针对考虑倒回灌影响后的明流与异重流

控制方程特点以及不同的干支流倒回灌现象的物理机制,提出了零维水库法和考虑底坡影响的异重流倒灌流量公式,并将其整合于两步计算模式中,使模型能够用于含支流的水库水沙过程模拟。

使用本文提出的模型对小浪底水库调水调沙期间异重流过程进行模拟,不同计算方法的对比表明:忽略干支流倒回灌影响会造成水位预测值低于实测值,浑水层交界面高程预测值明显高于实测值,同时极大地高估水库排沙量;使用不考虑底坡的异重流倒灌公式,预测的异重流厚度和含沙量略小,同时严重低估出库沙量。

异重流倒灌造成的支流淤积在总淤积量中占较大的比例,需要进一步研究不同水库调度方案对支流淤积过程的影响,重视支流库容的有效利用。

#### 参考文献:

- [1] Kondolf G M, Gao Y, Annandale G W, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents[J]. *Earth's Future*, 2014, 2(5): 256–280.
- [2] De Cesare G, Boillat J L, Schleiss A J. Circulation in stratified lakes due to flood-induced turbidity currents[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(11): 1508–1517.
- [3] Huang H, Imran J, Pirmez C. Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(4): 283–293.
- [4] Bradford S F, Katopodes N D. Hydrodynamics of turbid underflows. I: Formulation and numerical analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(10): 1006–1015.
- [5] Hu P, Cao Z. Fully coupled mathematical modeling of turbidity currents over erodible bed[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(1): 1–15.
- [6] Cao Z, Li J, Pender G, et al. Whole-process modeling of reservoir turbidity currents by a double layer-averaged model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(2): 04014069.
- [7] Snow K, Bruce R S. Particle-laden flow down a slope in uniform stratification[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 755: 251–273.
- [8] Zhang Junhua, Ma Huaibao, Wang Ting, et al. Model test of water intrusion and deposition morphology of tributary in Xiaolangdi Reservoir[J]. *Advances in Science and Techno-*

- logy of Water Resources*, 2013, 33(2): 1–4. [张俊华, 马怀宝, 王婷, 等. 小浪底水库支流倒灌与淤积形态模型试验[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(2): 1–4.]
- [9] Wang Zenghui, Xia Junqiang, Li Tao, et al. Numerical modeling of turbidity currents in the Sanmenxia Reservoir using a two-step calculation mode[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(5): 1–8. [王增辉, 夏军强, 李涛, 等. 两步计算模式下的三门峡水库异重流模拟[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(5): 1–8.]
- [10] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 89–94.
- [11] He H, Yu Q, Zhou J, et al. Modelling complex flood flow evolution in the middle Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 353(1): 76–92.
- [12] Wu Chao, Huang Guofu, Yang Yongquan. Study on lateral flow exchange between tributary and main channel during flood routing[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, 32(4): 11–14. [伍超, 黄国富, 杨永全. 洪水演进中支流倒回灌研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000, 32(4): 11–14.]
- [13] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 108–116.
- [14] Jin Dechun. The motion and deposition of the turbid density flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1981(3): 39–48. [金德春. 浑水异重流的运动和淤积[J]. *水利学报*, 1981(3): 39–48.]
- [15] Wang Zenghui, Xia Junqiang, Li Tao, et al. A formula for estimating discharge of turbidity current intruding into a tributary with the effect of bed slope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(1): 1–5. [王增辉, 夏军强, 李涛, 等. 考虑底坡的异重流倒灌流量计算公式[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(1): 1–5.]
- [16] Toro E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows[M]. Chichester: Wiley, 1998.
- [17] Li Y, Zhang J, Ma H. Analytical Froude number solution for reservoir density inflows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(5): 693–696.
- [18] Xia Junqiang, Li Tao, Wang Zenghui, et al. Improved criterion for plunge of reservoir turbidity currents[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2016, 170(3): 139–149.

(编辑 张琼)

引用格式: Wang Zenghui, Xia Junqiang, Zhang Junhua, et al. Modeling turbidity currents in the xiaolangdi reservoir with the effect of flow exchanges with tributaries[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 85–93. [王增辉, 夏军强, 张俊华, 等. 考虑干支流倒回灌的小浪底水库异重流模拟[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(1): 85–93.]