

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.06.008

王晓明, 吕岁菊, 李春光, 等. 黄河大柳树河段河床演变的三维数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 52-60. (WANG Xiao-ming, LYU Sui-ju, LI Chun-guang, et al. Three-dimensional numerical simulation of fluvial processes in Daliushu reach of Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 52-60.)

# 黄河大柳树河段河床演变的三维数值模拟

王晓明, 吕岁菊, 李春光, 杨程

(北方民族大学 土木工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 针对河岸冲刷、河床演变显著的河流, 建立考虑河岸变形的三维水沙数值模型, 对黄河大柳树河段的河势演变进行数值模拟分析研究。模型中利用三角形网格和局部网格移动及局部加密技术, 采用有限体积法离散控制方程, 以及基于非结构化同位网格中的 SIMPLE 算法进行数值求解。依据 2011 年 11 月至 2012 年 10 月黄河大柳树河段典型断面实测资料对数值模拟结果进行验证, 模拟结果与实测结果吻合较好。结果表明该模型能够较好地模拟黄河大柳树河段的水流运动和河床演变, 模型中提出的河岸修正技术和局部网格加密技术可有效提高模拟计算精度和效率。

**关键词:** 河床演变; 黄河大柳树河段; 三维水沙数学模型; 有限体积法; 数值模拟

**中图分类号:** TV147      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2016)06-0052-09

天然河流在自然演变过程中, 不仅沿垂向发生冲淤变化, 在平面上也有显著的横向摆动特征<sup>[1]</sup>。黄河为典型的高含沙游荡性河流, 具有“大水走滩, 小水坐弯”的规律<sup>[2]</sup>。黄河大柳树河段位于甘肃省与宁夏回族自治区交界处黄河干流黑山峡的出口, 该河段属于随来水来沙变化的弯曲性河道, 主流摆动剧烈, 冲淤变化大, 其来水来沙具有水多沙少、水沙异源、水沙集中在汛期等特点。因此, 充分了解弯道水沙运动及其演变过程, 具有重要实践意义。假冬冬等<sup>[3]</sup>针对河岸崩塌剧烈、河道平面变形特征显著的冲积河流, 从河岸变形角度提出等效造槽流量的计算方法, 对荆江石首河段进行了平面变形的三维水沙数值模拟研究。周刚等<sup>[4]</sup>建立了弯道二次流影响与河岸崩塌过程的平面二维河流数学模型, 对实验室水槽试验进行了模拟验证。随着计算机技术的发展, 三维水沙数学模型得到了一定的发展和应用<sup>[5-7]</sup>。但针对黄河大柳树河段河势演变的三维水沙数值模拟研究较少。尤其对弯曲性河道来说, 其水沙运动具有显著的三维特性。为此本文利用考虑河岸变形的三维水沙数值模型, 采用局部网格移动和加密技术, 对黄河大柳树河段的河床演变进行数值模拟分析。

## 1 三维水沙数学模型

### 1.1 水沙方程

考虑紊流的随机脉动, 采用不可压缩流体的时均雷诺应力方程组和修正的标准  $k-\varepsilon$  模型<sup>[8]</sup>, 则水沙模型方程可表示为统一形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(w\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11361002); 宁夏自治区水利厅水资源项目(宁水财发[2015]50-18); 北方民族大学重点科学研究资助项目(2015KJ11); 北方民族大学校级国培项目(2014Q2P05)

作者简介: 王晓明(1979—), 男, 宁夏海原人, 讲师, 主要从事水利工程测量及河床演变计算工作。

E-mail: wxmingxiang@126.com 通信作者: 吕岁菊(E-mail: lv\_suiju@163.com)

式(1)中各方程的变量表示见表1,  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的 Reynolds 时均流速;  $p$  为时均动水压强;  $\rho$  为水体密度;  $t$  为时间;  $\nu$  为水流黏性系数;  $\nu_t$  为运动涡黏性系数,  $\nu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $k$  为紊动动能;  $\varepsilon$  为紊动动能的耗散率;  $G_k$  为紊动动能产生项,  $G_k = 2\nu_t S_{ij} S_{ij}$ ;  $S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$  为平均应变率;  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为时均应变率张量; 系数  $C_\mu = 0.0845, C_1 = 1.7, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$ ;  $S$  为含沙量;  $\varepsilon_s$  为泥沙扩散系数, 取  $\varepsilon_s = \nu_t$ ;  $\omega_s$  为泥沙沉速。

1.2 河床变形方程

河床变形方程同时考虑悬移质和推移质, 根据网格内泥沙通量守恒来确定, 其方程为:

$$\gamma'_s \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial g_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial g_{by}}{\partial y} = \alpha \omega_s (S - S^*) \quad (2)$$

式中:  $\gamma'_s$  为泥沙干重度;  $Z_b$  为悬移质和推移质引起的河床冲淤厚度;  $g_{bx}, g_{by}$  分别为沿  $x, y$  方向的单宽推移质输沙率, 由窦国仁公式确定;  $\alpha$  为垂线平均恢复饱和系数, 由武汉水利电力学院韦直林公式计算;  $S^*$  为水流挟沙力, 由张红武公式计算。 $Z_b > 0$  表示河床淤积,  $Z_b < 0$  表示河床冲刷,  $Z_b = 0$  表示河床不冲不淤。

1.3 河岸冲刷及网格修正

1.3.1 河岸冲刷机理 黄河大柳树河段由大小不同的土颗粒混合组成, 抗冲性比较差, 在水流作用下容易发生变形, 在一段时间内会导致河道横向展宽, 从图1可以看出, 大柳树河段典型断面左岸为凸岸, 右岸为凹岸, 在2011年11月到2012年10月期间, 右岸冲刷后退距离约30m, 左岸有冲有淤。

大柳树河段河岸基本属于混合土河岸, 上层为较薄的黏性土层, 下层为较厚的非黏性泥沙, 其岸坡坡角接近泥沙颗粒的内摩擦角。水流将沙层掏空后, 上部黏性土体几乎直立, 在河岸边坡上产生悬臂结构, 使得上部土块强度降低而塌落。混合土河岸断面冲刷过程如图2所示。 $H_u$  为上部黏性土层厚度;  $H_d$  为下部非黏性土层厚度;  $\Delta Z$  为垂向冲刷距离;  $\Delta B$  为横向冲刷距离;  $\theta_c$  为下层非黏性泥沙颗粒的内摩擦角;  $\Delta L$  为河岸坡脚冲刷后上黏性土层的悬空距离, 根据断面几何关系, 有

$$\Delta L = \Delta B + \Delta Z \cot \theta_c \quad (3)$$

当河岸下部的非黏性土层冲刷横向宽度  $\Delta L$  达到极限状态后, 上部悬空的黏性土层将受拉崩裂, 其受力状态如图3所示。黏性土层悬挂部分的自重产生的力矩与断裂面产生的抗拉力矩平衡。根据悬臂梁力学平衡原理, 建立河岸临界状态下的坍塌力学模式:

$$G \frac{\Delta L_c}{2} = H_u^2 \frac{T_t B}{6} \quad (4)$$

式中:  $T_t$  为黏性土层的抗拉强度;  $B$  为黏性土层的宽度;  $\Delta L_c$  为黏性土层的临界悬空长度;  $G$  为黏性土层悬空部分土体自重,  $G = \gamma_b B H_u \Delta L_c$ 。化简得混合土河岸临界悬空长度为:

$$\Delta L_c = \sqrt{\frac{T_t H_u}{3\gamma_b}} \quad (5)$$

表1 统一形式中各方程的变量

方程	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
连续方程	1	0	0
x 动量方程	$u$	$\nu + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$
y 动量方程	$v$	$\nu + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$
z 动量方程	$w$	$\nu + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$
k 方程	$k$	$\nu + \nu_t / \sigma_k$	$G_k - \varepsilon$
$\varepsilon$ 方程	$\varepsilon$	$\nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon$	$C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}$
悬移质输沙方程	$S$	$\varepsilon_s$	$\omega_s \frac{\partial S}{\partial z}$

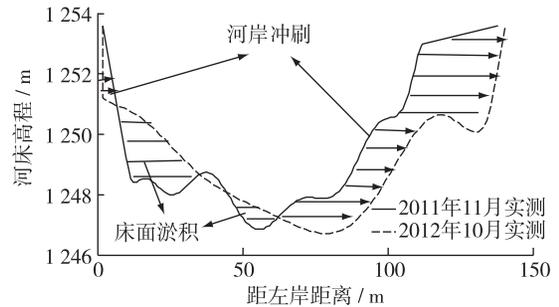


图1 大柳树河段典型断面冲淤变化  
Fig. 1 scouring and silting of typical section in Daliushu reach

对比  $\Delta L$  和  $\Delta L_c$ , 判定上部黏性土层是否发生坍塌。

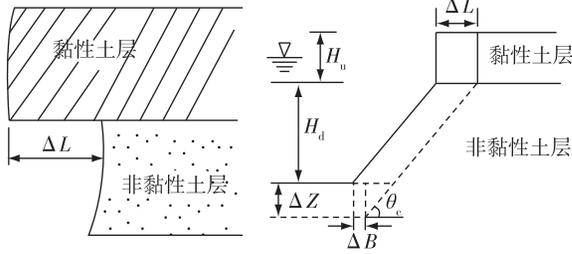


图2 混合土河岸断面

Fig.2 Profile of mixed soil bank

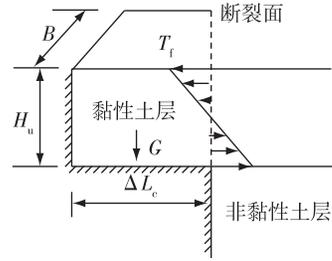


图3 混合土河岸中上部黏性土层受力

Fig.3 Load on riverbank with cohesive soil

**1.3.2 网格修正** 利用水沙模型对河床演变进行模拟计算时,由于河岸坍塌的宽度不一定正好与坍塌处的网格宽度相等,这使得网格对河岸边界准确拟合变得困难。用固定网格很难处理这种动态变化过程,采用重新生成网格虽能较准确地拟合河岸变化过程,但需要实时生成网格,这对网格储存,计算效率等都有较大影响。鉴于这些不足,采用网格修正技术对河岸冲刷过程进行跟踪。其基本思想是在模拟计算过程中,只对河岸冲刷附近的网格进行移动,其余网格保持不变<sup>[13]</sup>。已知河岸初始岸坡形状如图4(a)所示,概化后岸坡地形为  $OABCD$ , 节点  $O(i_0, j_0 - 1), A(i_0, j_0), C(i_0, j_0 + 1), D(i_0, j_0 + 2)$  为初始时刻坐标。经水流冲刷后,由水沙模型模拟计算求得床面冲刷深度  $\Delta Z$  和横向冲刷宽度  $\Delta B$ , 利用混合土河岸冲刷力学模式,对比  $\Delta L$  和  $\Delta L_c$  判定河岸是否坍塌,若坍塌需对岸坡信息进行修正,如图4(b)所示。此时坡脚位置由原来的  $A$  点移动到  $A_1$  点,坡脚节点  $(i_0, j_0)$  跟踪到坡脚  $(i, j)$ , 坡顶位置由原来的  $C$  点移动到  $C_1$  点,节点  $(i_0, j_0 + 1)$  跟踪到坡顶  $(i, j + 1)$ , 但同时要保留原网格节点  $(i_0, j_0), (i_0, j_0 + 1)$  的坐标信息不变。再次经过水流冲刷后,判断坡脚网格节点  $(i, j)$  是否靠近原网格节点  $(i_0, j_0 + 1)$ , 若靠近如图4(c), 则节点  $(i, j)$  返回原网格节点  $(i_0, j_0)$ , 坡脚节点由  $(i, j + 1)$  进行跟踪, 此时节点  $(i, j)$  处的冲淤情况由水沙模型计算。节点  $(i, j + 1)$  处于坡脚位置, 再由水沙模型计算求床面冲刷深度  $\Delta Z$  和横向冲刷宽度  $\Delta B$ , 坡顶位置由节点  $(i, j + 2)$  进行跟踪如图4(d), 由此实现了河岸后退与淤长的模拟过程。

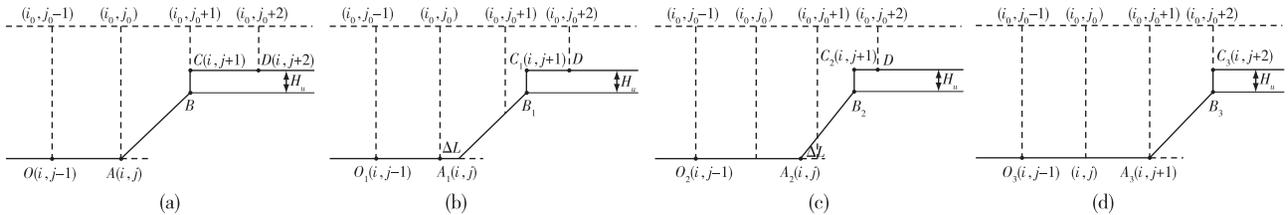


图4 混合土河岸网格修正

Fig.4 Mesh modification near mixed soil bank

## 2 模拟区域及计算条件

### 2.1 模拟区域

模拟区域为黄河大柳树河段如图5, 共布设19个典型断面, 从断面d19到断面d01全长约20 km, 平均水面纵比降约为0.73‰, 上游水位1256.32 m, 下游水位为1242.40 m。由于在计算区域内布置的实测断面数量有限, 因而整个计算区域的河床高程根据这些已知断面的河床高程通过3次样条插值而得到, 以2011年11月大柳树河段的实测数据作为初始地形如图6。

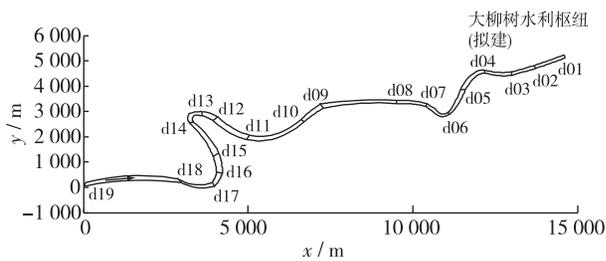


图 5 大柳树河段断面布置

Fig. 5 Layout of Daliushu River reach

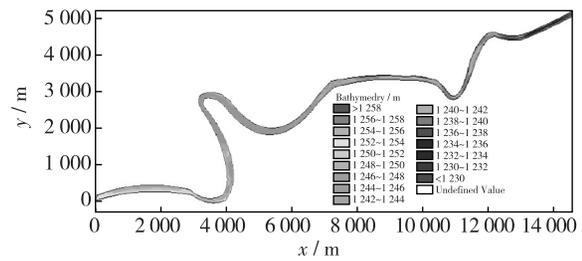


图 6 2011 年 11 月实测地形

Fig. 6 Measured bed elevation in November 2011

### 2.2 计算条件

对研究区域采用三角形网格剖分,对连续弯道区域采用较密网格,顺直区域采用稀疏网格。密网格比疏网格更能较好地反映实际流场数据信息,但网格较密,会影响计算速度和精度。对弯道断面 d18—d12, d07—d04 进行网格加密。边界处理包括进口边界、出口边界、两岸边界和表面边界。进口边界把实际流量和含沙量概化为梯级式的恒定过程,给定流量过程(图 7),含沙量变化过程(图 8)和悬沙级配(图 9),紊动能及耗散率根据  $k=0.00375(u_{in}^2+v_{in}^2)$ ,  $\varepsilon=0.09k^{3/2}/(0.05h)$  计算<sup>[8]</sup>,进口断面单宽推移质输沙率由窦国仁公式确定,悬移质含沙量分布由张瑞瑾方法确定<sup>[9]</sup>。出口边界给定水位  $h=1242.40\text{ m}$ ,出口边界推移质单宽输沙率及含沙量沿纵向梯度为 0。自由水面水位由实测值给定,表面边界采用干湿边界处理,河床边界采用壁面函数法处理<sup>[10-11]</sup>,水面处无泥沙交换。两岸边界处无泥沙交换。采用基于非结构网格的有限体积法离散控制方程<sup>[12]</sup>,利用 SIMPLE 算法和 Gauss-Seidel 迭代方法进行求解。

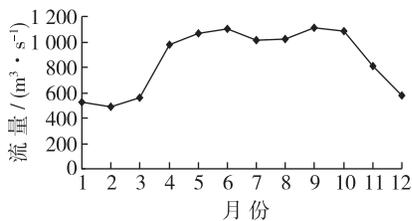


图 7 流量变化过程

Fig. 7 Variation in discharge

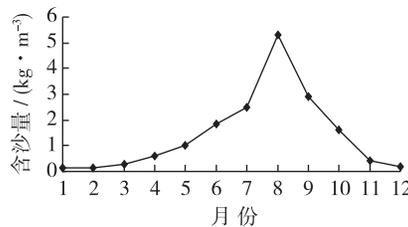


图 8 含沙量变化过程

Fig. 8 Variation in sediment concentration

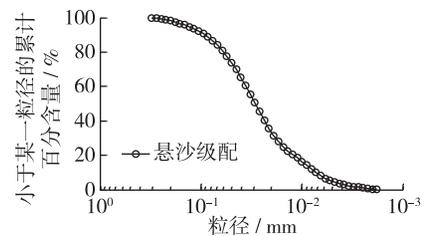


图 9 悬移质泥沙级配

Fig. 9 Suspended sediment gradation

## 3 模型验证

采用考虑河岸冲刷演变的三维水沙数学模型,对黄河大柳树河段的河势演变进行了模拟计算。

### 3.1 平面流场分析

图 10 给出了典型断面的实测平面流场分布。断面 d18, d17 和 d16 分别位于第 1 个弯道的进口、弯顶和出口处,由于受上游弯道的影响,水流没有得到充分发展。由图 10 可见,主流靠近凸岸附近如(d18, d17),直到断面 d16 时才完全靠近凹岸。弯道过渡段(d15)较长,水流得到充分发展。在第 2 个弯道进口处(d14),主流偏向凹岸,到弯顶(d13)时,主流开始向河中心过渡,到弯道出口(d12)时,水流得到充分发展,主流出现在河道中心处。当弯道中心角较大时(d11),强迫涡得到充分发展,流速最大值逐渐由凸岸向凹岸转变。断面 d05—d01 的流场分布基本稳定,主流在河道中心线处。因此,天然连续弯道水流的分布除受来水影响外,还受上游弯道形态及过渡段长短影响。

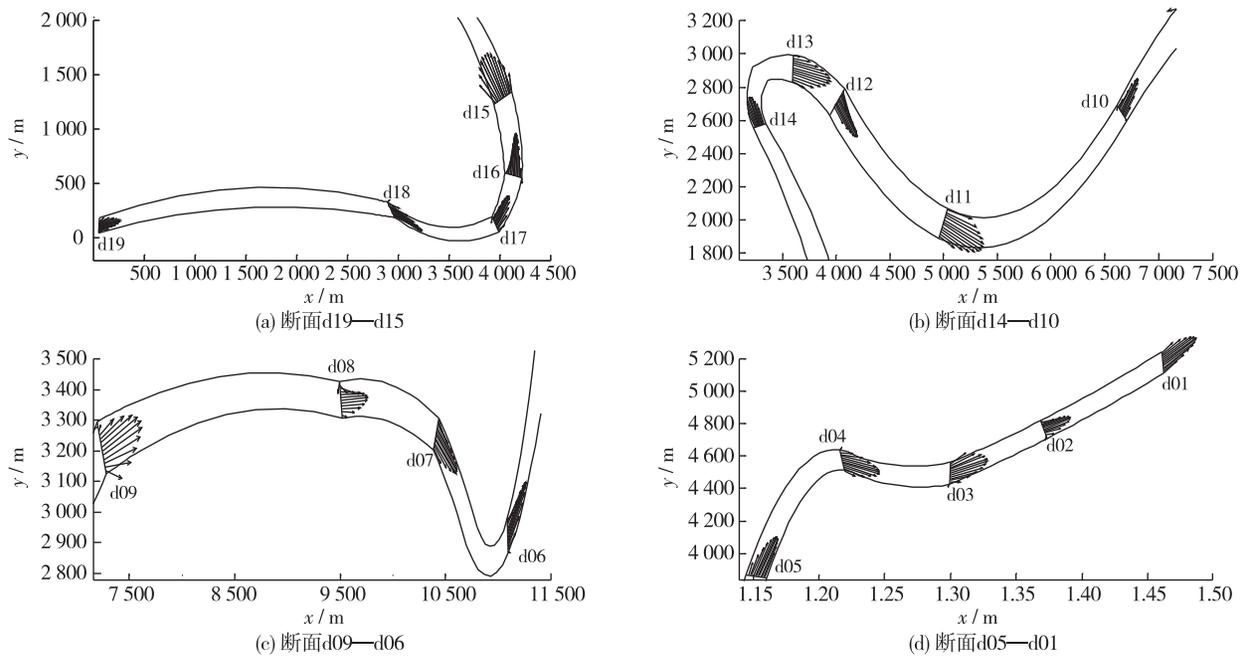


图 10 大柳树河段实测流场分布

Fig. 10 Measured flow field distribution along Daliushu reach of Yellow River

### 3.2 纵向流速沿垂线分布

为验证数值模拟结果,图 11 给出了黄河大柳树河段连续弯道处 6 个典型断面(d18—d13)上 5 条垂线的流速计算值和实测值对比,y 表示距左岸距离;横坐标表示主流流速;纵坐标表示水位。

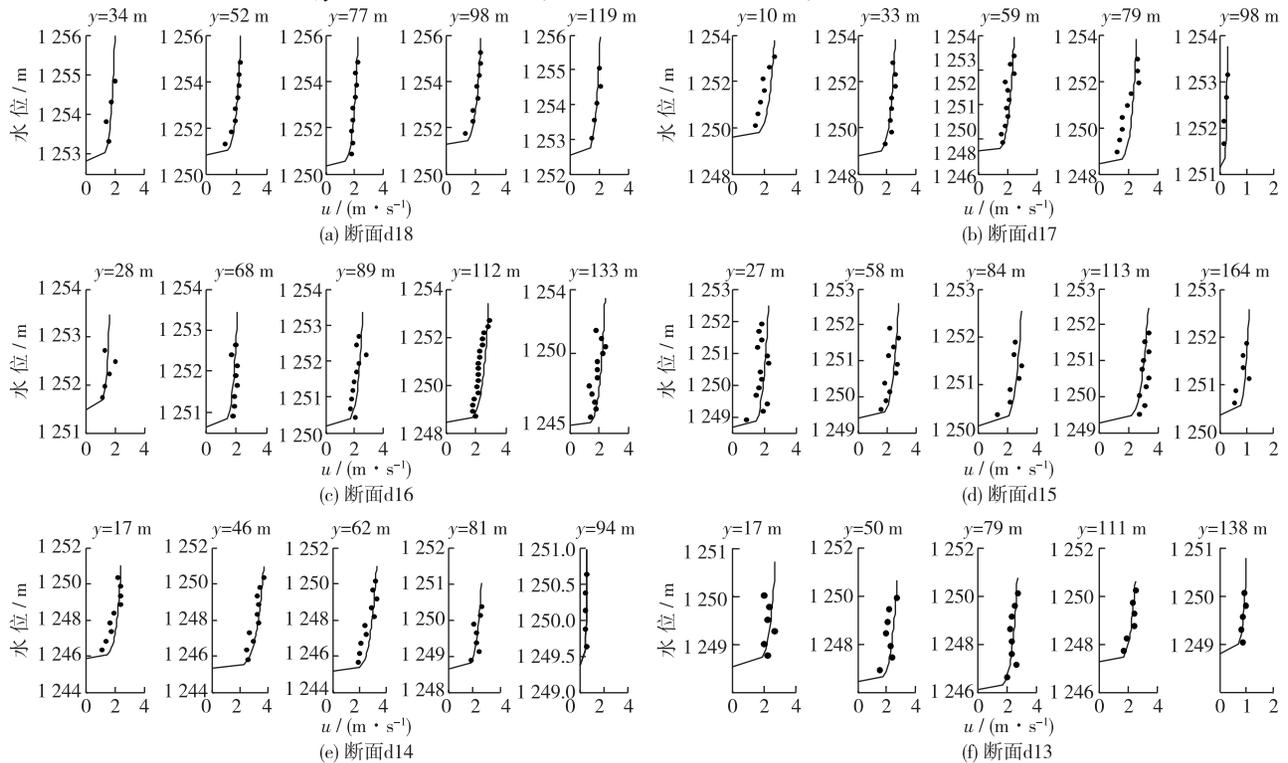


图 11 连续弯道断面纵向流速垂线分布

Fig. 11 Vertical distribution of longitudinal velocities along typical sections

由图 11 可见,模型计算结果与实测结果较为接近,且纵向流速沿垂线分布符合对数律。也可以看出主流流速沿横断面分布与实测平面流场分布具有相同趋势,断面 d18, d17 的左岸流速明显大于右岸流速,到断面 d16 时,右岸流速大于左岸流速。断面 d15 为过渡段,流速分布均匀,最大流速在断面中心处,左右岸流速值接近。进入第 2 个弯道,左岸流速大于右岸流速(断面 d14),越过弯顶后,右岸流速逐渐增大(断面 d13)。表明了连续弯道之间的过渡段长短不同,对环流强度削弱的程度也不同,主流线偏向凹岸的位置也不同。

### 3.3 河道冲淤演变

黄河大柳树河段属弯曲性河段,河岸冲刷、主流摆动剧烈。河床演变是水流和河床相互作用的结果。河床横向变形由横向输沙不平衡引起,横向输沙不平衡主要由弯道水流中有环流造成。图 12 给出了连续弯道上断面 d16 和 d14 计算横向环流分布。从图 12 可见,表层水流指向凹岸,底层水流指向凸岸。

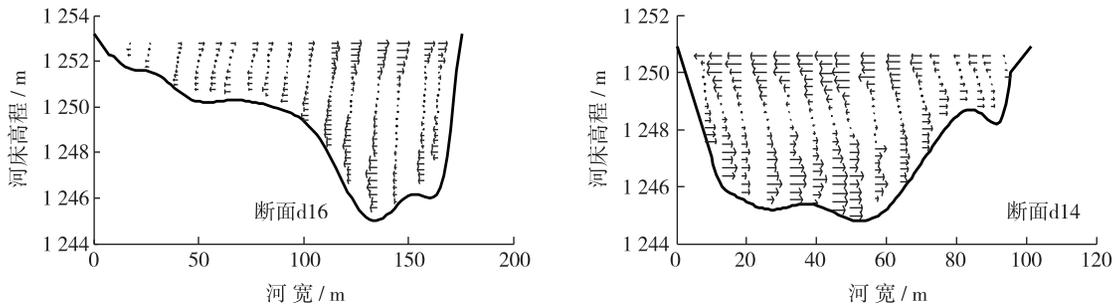


图 12 横向流速分布

Fig. 12 Transverse velocity distribution along sections

由于环流存在,在凸岸出现回流,形成漩涡。图 13 给出了大柳树河段连续弯道处断面 d16 和 d14 附近的计算平面流场分布,表层流场指向凹岸,底层流场指向凸岸。

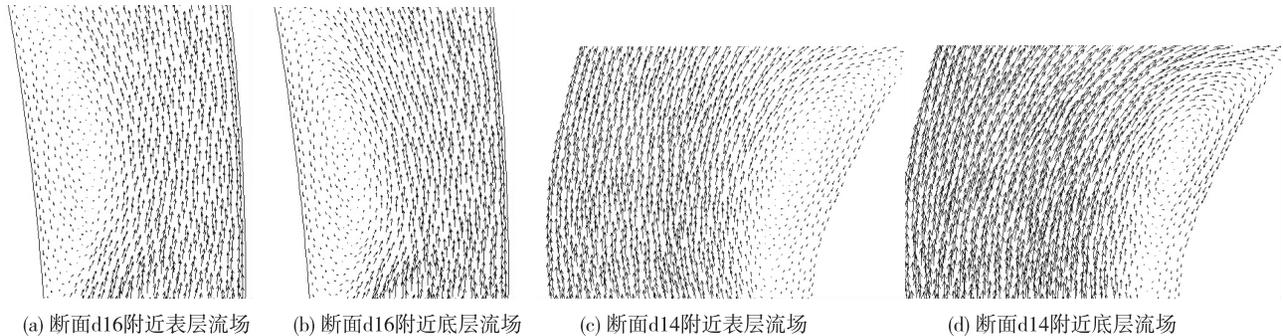


图 13 断面 d16 和 d14 附近表层和底层流场分布

Fig. 13 Surface and bottom flow field distribution along sections d16 and d14

图 14 给出了断面 d16 和 d14 的含沙量沿垂线分布。由图可知水面含沙量小,河底含沙量大,表面流速所挟带的沙量小于河底流速所挟带的沙量。

由于弯道环流在凸岸形成漩涡,以及含沙量表层小底层大等因素。因此产生横向不平衡输沙,导致河床凹岸冲刷,凸岸淤积的冲淤演变。图 15 给出了连续弯道断面 d17, d16, d14 和 d13 在 2011 年 11 月至 2012 年 10 月期间河床冲淤变化。

从图 15 可见,计算河床高程和实测河床高程基本吻合。断面 d17 接近第 1 个弯道弯顶处,左岸为凸岸,右岸

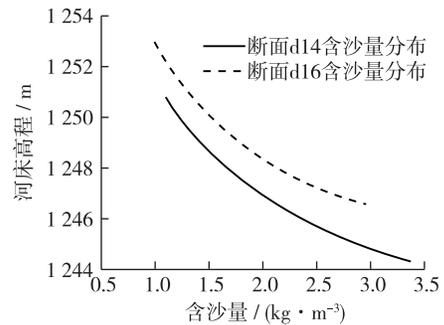


图 14 含沙量沿垂线分布

Fig. 14 Vertical distribution of sediment concentration

为凹岸。凹岸在水流环流的持续冲刷下,后退距离约 20 m,主槽最深点向凹岸移动,右移距离约 30 m,凸岸有一定的淤积,该断面整体呈冲刷状态。断面 d16 位于第 1 个弯道出口,凹岸无明显坍塌,只是主槽深泓点向凹岸移动约 15 m,凸岸出现淤积,最大淤积厚度约 1 m。断面 d14 位于第 2 个弯道进口段,左岸为凹岸,右岸为凸岸,凹岸冲刷较凸岸严重,深槽有向凹岸倾斜的趋势,最大冲深达 2 m 左右,河岸坍塌的同时横向展宽,水面宽度增加约 10 m。断面 d13 位于第 2 个弯道弯顶出口附近,该断面整体冲刷,主流靠近凹岸,纵向冲深达 2.5 m,主槽向凹岸摆动约 30 m。由此说明弯道环流是河道横向演变赖以实现的重要因素。

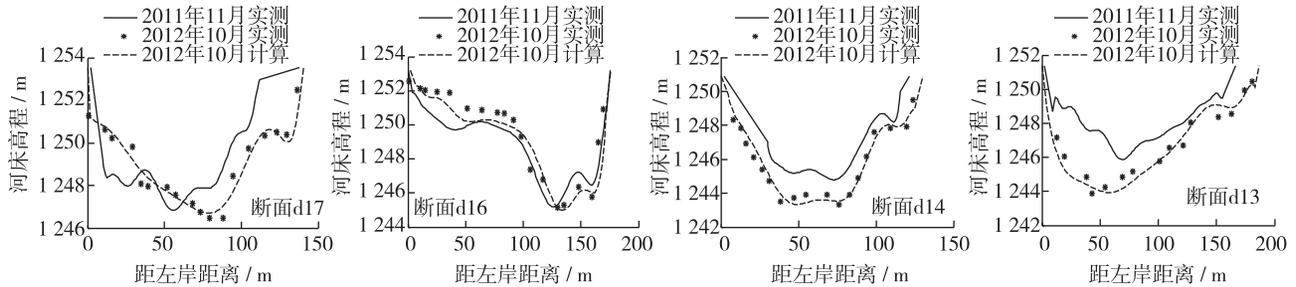


图 15 断面 d17—d13 冲淤验证

Fig. 15 Scouring and silting verification of sections d17—d13

图 16 给出了黄河大柳树河段典型断面 d05—d01 在 2011 年 11 月至 2012 年 10 月期间河床冲淤变化。d05—d01 断面位于拟建的大柳树水利枢纽坝址处。从图 16 可见,d05 断面河床整体冲刷的同时,右岸坍塌剧烈,距离达 25 m 左右。其余断面都有不同程度的冲深,但量不大,左右岸几乎没有发生冲刷,这是由于断面 d04—d01 河段的抗冲性较强,冲刷程度小,该河段比较窄深,断面基本形态呈“V”型,属于峡谷段,断面形态相对比较稳定,地理位置优越,具备修建高坝大库的条件。

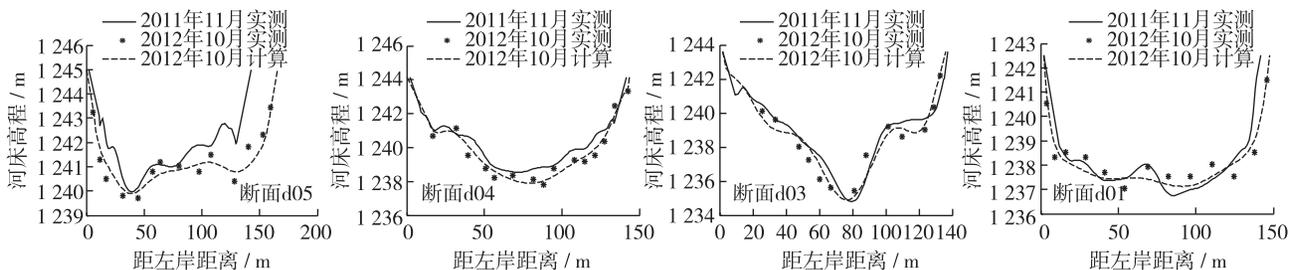


图 16 断面 d05—d01 冲淤验证

Fig. 16 Scouring and silting verification of sections d05—d01

## 4 结 语

通过建立考虑河岸冲刷演变的三维水沙数学模型,对黄河大柳树河段的河势演变进行了数值模拟分析。模型采用河岸网格修正技术和局部网格加密技术处理连续弯道复杂区域,通过对河岸边界进行网格节点跟踪,能较为准确地反映天然连续弯道水流运动规律、河势变化及河道摆动过程,并利用 2012 年 10 月现场实测资料进行验证分析,其结果表明:

(1) 模拟计算值与实测值吻合较好,说明三维水沙数学模型能较好地反映黄河大柳树河段的水流运动及河床演变规律。

(2) 天然连续弯道环流主要受前弯剩余环流、流量及河道形态的影响,在弯道进口的直线段因受上一个弯道的影 响,流速分布不均匀,较大的流速靠近凸岸,进入弯道以后,流速分布逐步调整,到弯顶处接近对称,在弯道下半段,主流完全靠近凹岸(如第 1 个弯道段 d18—d16)。由于过渡段较长(d15),可以有效减弱前弯

环流对后弯水流的影响,弯道水流得到了充分发展,当水流进入第2个弯道(d14—d13),由于弯道螺旋流的影响,自由旋体被抑制,表层较大流速转向凹岸。

(3)利用考虑河岸网格修正的三维水沙数学模型不仅能模拟出河道的垂向冲淤过程,而且还可模拟出由河岸冲刷引起的横向摆动过程。由于上游来水来沙条件不同,黄河大柳树河段在2011年11月到2012年10月期间河道冲刷的同时还伴有坍塌,河道深槽摆动,最大冲深可达2.5 m左右。在弯道区域,凹岸冲刷较凸岸严重,主槽位置向凹岸移动。在拟建的大柳树水利枢纽坝址断面处,断面形态基本都呈“V”型,相对稳定,深槽位置基本保持不变,地理位置优越,具备在该河段修建水利枢纽的条件。

(4)黄河大柳树河段属弯曲型河流,其水流运动、横向不平衡输沙对河床演变具有重要影响。对黄河宁夏大柳树河段建库前的水流运动及河床演变等进行数值模拟研究,有助于正确认识该河段的水流运动和河床演变,可为即将开工建设的大柳树水利枢纽工程提供一定参考。

### 参 考 文 献:

- [1] 假冬冬,邵学军,王虹,等.考虑河岸变形的三维水沙数值模拟研究[J].水科学进展,2009,20(3):311-317.(JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. 3D mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 311-317. (in Chinese))
- [2] 钟德钰,张红武,张俊华,等.游荡型河流的平面二维水沙数学模型[J].水利学报,2009,40(9):1040-1047.(ZHONG De-yu, ZHANG Hong-wu, ZHANG Jun-hua, et al. Two-dimensional numerical model of flow and sediment transport for wandering rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1040-1047. (in Chinese))
- [3] 假冬冬,邵学军,肖毅,等.基于河道平面变形数值模拟的等效造槽流量计算方法[J].水力发电学报,2011,30(1):78-88.(JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, XIAO Yi, et al. Equivalent dominant discharge based on numerical simulation of plan form changes in alluvial rivers with bank erosion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 78-88. (in Chinese))
- [4] 周刚,王虹,邵学军,等.河型转化机理及其数值模拟[J].水科学进展,2010,21(2):145-152.(ZHOU Gang, WANG Hong, SHAO Xue-jun, et al. Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 145-152. (in Chinese))
- [5] 张明亮,沈永明.RNG  $k-\epsilon$  湍流模型在三维弯曲河流中的应用[J].水力发电学报,2007,26(5):86-91.(ZHANG Ming-liang, SHEN Yong-ming. Application of 3-D RNG turbulence model of meandering river [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5): 86-91. (in Chinese))
- [6] 假冬冬,邵学军,王虹,等.三峡工程运用初期石首河弯河势演变三维数值模拟[J].水科学进展,2010,21(1):43-49.(JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. 3D numerical simulation of fluvial processes in the Shishou bend during the early filling of the Three Gorges reservoir[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 43-49. (in Chinese))
- [7] 宋利祥,周建中,王光谦,等.溃坝水流数值计算的非结构有限体积模型[J].水科学进展,2011,22(3):373-381.(SONG Li-xiang, ZHOU Jian-zhong, WANG Guang-qian, et al. Unstructured finite volume model for numerical simulation of dam break flow[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 373-381. (in Chinese))
- [8] 吕岁菊,冯民权,李春光.天然连续弯道中水流运动的三维数值模拟[J].水利水运工程学报,2013(5):10-16.(LYU Sui-ju, FENG Min-quan, LI Chun-guang. 3-D numerical simulation of flow in natural meander channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(5): 10-16. (in Chinese))
- [9] 中国水利委员会.泥沙手册[M].北京:中国环境科学出版社,1992.(Chinese Water Conservancy Committee. Sediment handbook[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1992. (in Chinese))
- [10] 易雨君,王兆印,张尚弘.考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(I)-模型的建立[J].水力发电学报,2010,29(1):126-132.(YI Yu-jun, WANG Zhao-yin, ZHANG Shang-hong. Two-dimensional sedimentation model of channel bend. Part 1. Development of the model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 126-132. (in Chinese))
- [11] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,1995.(TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))
- [12] 刘士合,刘江,罗秋实,等.工程湍流[M].北京:科学出版社,2011.(LIU Shi-he, LIU Jiang, LUO Qiu-shi, et al. Engineering turbulence[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [13] 假冬冬,邵学军,张幸农,等.岸滩崩塌影响的典型分汉型河道演变数值模拟[J].水力发电学报,2012,31(5):114-

126. (JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, ZHANG Xing-nong, et al. Numerical simulation of fluvial processes in a typical braided channel considering bank failure[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 114-126. (in Chinese))

## Three-dimensional numerical simulation of fluvial processes in Daliushu reach of Yellow River

WANG Xiao-ming, LYU Sui-ju, LI Chun-guang, YANG Cheng

(School of Civil Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Aiming at the river where there is a severe bed scour and remarkable river channel process caused by river-bank collapse, a three-dimensional (3D) numerical model for water flow and sediment is established under the conditions of considering the river-bank erosion. A finite volume method combined with the unstructured grids is applied to dispersion of a governing equation, and the SIMPLE algorithm with the unstructured collocation grids is used to deal with the coupled problems of the pressure and velocities. The numerical simulation results are verified with the measured data from November 2011 to October 2012, and the calculated results agree well with the measured data. The numerical simulated results demonstrate that the model can reasonably simulate the water flow and riverbed processes in the Daliushu reach of the Yellow River. The locally-adaptive grid technique and locally-encryption grid technique on the basis of the non-orthogonal grids given by the numerical model can effectively improve the calculation accuracy and efficiency in the numerical simulation.

**Key words:** river channel process; Daliushu reach of the Yellow River; three-dimensional mathematical model for water and sediment; finite volume method; numerical simulation