

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.01.004

弯曲河流颈口裁弯不同阶段水流运动特性

吴新宇¹,李志威^{1,2},胡旭跃^{1,2},陈 帮¹,杨 玥¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究颈口裁弯水动力过程,以黄河源若尔盖盆地的弯曲河流裁弯观测资料为基础,基于不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程、 $k-\varepsilon$ 紊流模型和有限体积法建立水动力数学模型,通过垂向 σ 坐标变换考虑自由水面的变化,分析颈口裁弯形成过程中的新河槽分流、三维流场变化和上、下游河道水流结构。伴随裁弯的逐步发展和新河槽的展宽,新河道宽深比和分流比均逐渐增加,分流比与宽深比之间呈线性正相关关系。裁弯初始阶段时,原河道的流速分布基本不受影响。由于新河道分流比逐渐增加,老河道流量、平均水深和平均流速均逐渐减小,新河道流量则逐渐增加,且平均水深和平均流速呈先增大后减小的规律。裁弯不改变颈口上游河道流场,明显改变裁弯下游弯道的弯顶处水流结构。

关键词:颈口裁弯;弯曲河流;分流比; $k-\varepsilon$ 模型;数值模拟;黄河源

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)01-0021-07

Hydrodynamic characteristics of neck cutoff process of different stages in a meandering river//WU Xinyu¹, LI Zhiwei^{1,2}, HU Xuyue^{1,2}, CHEN Bang¹, YANG Yue¹(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the hydrodynamic process of a neck cutoff, on the basis of the field observational data of a meandering river at the Zoige Basin in the Yellow River source region, a numerical model is set up based on the incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equation, $k-\varepsilon$ turbulent model, and finite volume method. Free surface is taken into consideration by σ coordinate transformation. Change of the flow diversion ratio, variation of the three dimensional velocity field, and the flow structures in the upstream and downstream were analyzed during the neck cutoff process. It shows that the flow diversion ratio and width-depth ratio gradually increases with the development of the neck cutoff and the widening of the new channel, revealing a positive linear correlation. Velocity field of the old bend channel is not affected at the initial stage of the neck cutoff. As the flow diversion ratio increases gradually in the new channel, the discharge, average water depth, and the mean velocity in the old channel decreases gradually, while the discharge in the new channel increases. Average water depth and mean velocity in the new channel shows a characteristic of first increase and then decrease. Neck cutoff does not change the velocity distribution in the upstream but has strong influence on the flow structure at the apex of the downstream bend.

Key words: neck cutoff; meandering river; flow diversion ratio; $k-\varepsilon$ model; numerical simulation; Yellow River source

自然裁弯是弯曲河道演变由渐变发展到一定阶段后出现的突变现象,是河流内在的自组织调节机制。弯曲河流在演变过程中弯曲度逐渐增加,达到临界值后会因洪水过程或崩岸贯穿发生裁弯,降低弯曲度,促使河道启动新一轮的横向演变^[1-3]。裁弯是弯曲河流演变过程中的突变事件,也是牛轭湖形成的最主要方式。裁弯的研究在世界各地的弯曲河流中均有较多报道,比如我国长江中游荆江、渭河下

游和塔里木河中下游^[2,4],密西西比河下游^[5]、Wabash 河^[6]和 Powder 河^[7],英国的 Bollin 河^[8]和澳大利亚的 Hunter 河^[9]等。颈口裁弯是河湾的颈口不断缩窄,洪水作用使得上、下游河道交汇形成新的河道,旧河道逐渐淤积形成牛轭湖。颈口裁弯通常出现在洪水期高水位条件下,需要多次高水位漫滩水流冲刷才能实现^[7],崩岸贯穿的裁弯模式在滨河植被发育良好、河岸物质组成为二元结构的弯曲

基金项目:国家自然科学基金(91547112);水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金(2017005);湖南省研究生科研项目(CX2016B390)

作者简介:吴新宇(1989—),女,博士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail: 1033945679@qq.com

通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,博士,主要从事高原河流动力学研究。E-mail:lzhiwei2009@163.com

河流较常见^[1]。

以往关于颈口裁弯的研究多数是基于野外观测开展。潘庆桑等^[4]对长江中游中洲子和上车湾两处裁弯工程的原型观测表明,裁弯发生后,新、老河道的水流和泥沙条件均发生改变,新河经历普遍冲刷、弯道形成和弯道正常演变三个阶段,横断面变化过程是先变深后变宽。老河淤积经历河道型淤积、单向淤积和牛轭湖形成三个阶段。裁弯对上游河道影响较大,使上游比降增大,水位降低,对下游河道基本没有影响。前人的野外观测表明颈口裁弯通常历时短暂,短时间内完成新河槽形成过程^[10-12]。尽管野外观测是重要的研究手段,但是不能长时间连续观测水流结构的变化和河道冲淤的过程,已有的野外观测均没有涉及裁弯过程中的水动力测量。

目前,已有许多学者研究弯道水流的数值模拟^[13-14],然而关于颈口裁弯水动力数值模拟的研究成果很少。早期,谢鉴衡^[15]以在适当的假设条件下计算人工裁弯实施前后河道分流情况和河床变形情况,设计引河断面,但不涉及具体的流场分布情况。Fares^[16]在野外观测数据的基础上建立二维规则弯道水流数学模型,重点研究颈口裁弯交汇区流速和边界剪应力。最新研究也有利用三维数学模型研究裁弯对上下游河道的影响^[17],但是没有涉及裁弯过程中新、老河道的逐步发展过程。裁弯过程中新、老河道的水动力变化过程的数值模拟研究尚未见报道。由于颈口裁弯过程的短暂性和实际野外观测的局限性,建立三维水动力学数学模型模拟颈口裁弯过程具有较高的科学参考价值。

本文以黄河源若尔盖的泥炭型弯曲河流两处裁弯的野外观测颈口裁弯资料为基础,建立基于不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程、 $k-\varepsilon$ 紊流模型和有限体积法的 MIKE 3 Flow Model 水动力模型,分析颈口裁弯形成过程中不同阶段的流场变化,以期有助于深入了解裁弯的水动力过程,进而为预测颈口裁弯的泥沙冲淤过程提供有价值的参考。

1 数学模型及验证

1.1 基本方程

MIKE 3 Flow Model 是通用三维数学模型,可用于不同类型水体的三维非恒定流模拟^[18]。主要假设有 Bousinesq 涡黏假定和静水压假设。水动力控制方程是不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程^[19]

采用 σ 坐标,垂向网格 σ 坐标变换公式为

$$\sigma = \frac{z - \eta}{d + \eta} \quad (1)$$

式中: z 为笛卡尔坐标中的垂向坐标; d 为静水深; η

为自由水面相对于基准水面的高程。

连续方程与动量方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) dz + \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) = F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_1 \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} - fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz + \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) = F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_1 \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (4)$$

式中: t 为时间; x, y, z 为笛卡尔坐标; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度; h 为总水深, $h = \eta + d$; f 为柯氏力系数; g 为重力加速度; p_a 为空气大气压力; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的参考密度; S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} 和 S_{yy} 为分散应力张量的分量; F_u, F_v 为水平应力分量; v_1 为垂直方向的涡黏系数; u_s, v_s 为源(汇)流向外界的流速分量; S 为源(汇)流量。

$k-\varepsilon$ 紊流模型闭合方程为

$$\frac{\partial q^2 h}{\partial t} + \frac{\partial q^2 u h}{\partial x} + \frac{\partial q^2 v h}{\partial y} + \frac{\partial q^2 w}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_q}{h} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{2A_v}{h} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2gA_b}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{2hq^3}{B_1 l} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hA_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial q^2 l h}{\partial t} + \frac{\partial q^2 l u h}{\partial x} + \frac{\partial q^2 l v h}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l w}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_q}{h} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + E_1 l \left\{ \frac{A_v}{h} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} A_b \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right\} - \frac{hq^3}{B_1 l} \tilde{W} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \quad (6)$$

式中: q^2 为 2 倍紊动动能; l 为混掺长度; A_q, A_v 分别为垂向和水平扩散系数; A_b, A_H 分别为垂向和水平紊动扩散系数; B_1, E_1, E_3 为经验参数。

紊流模型中对于壁面条件的处理是在河床和河岸边界处采用紊流壁面近似函数 \tilde{W} :

$$\tilde{W} = 1 + E_2 \left(\frac{l}{qL} \right) \quad (7)$$

式中: $L^{-1} = (\eta - z_0)^{-1} + (h - z_0)^{-1}$, 其中 z_0 为河底高程; E_2 为经验常数,取 1.33。

1.2 数值求解方法

MIKE 3 将计算区域在垂直方向上分为若干层求解,首先确定每层内二维变量,再结合连续方程求

得垂直方向的分量。方程的求解采用显隐式交替技术,浅水方程的时间积分和输移(扩散)方程基于半隐格式求解,相应平流项采用显式格式求解,而垂直对流项则采用全隐格式求解。时间步长要求严格满足 CFL 数小于 0.8。

1.3 模型验证

采用 Abhari 等^[20]的 90°弯道模型进行验证。弯道总长 11.3 m,宽 0.6 m,上游直段长 5.5 m,下游直段长 2.8 m,弯曲段内外半径分别为 1.5 m 和 2.1 m(图 1)。上游进口流量为 0.03 m³/s,下游出口水位为 0.20 m。水平方向划分 1 064 个网格,640 个节点。垂直方向划分 30 层。河床粗糙高度 0.005 m,采用高阶计算模式,时间步长 0.001 s。选取 30°、60°和 90°3 个过水断面,纵向流速的垂向分布计算值和实测值的对比见图 2,横向流速的垂向分布计算值和实测值对比见图 3,计算值和实测值非常接近,模型精度较高。凹岸与凸岸水位差的成果见表 1,两岸水位差值小于 2 mm。由于文献[20]中未见水位的测量数据,在此仅对流速分布进行验证。

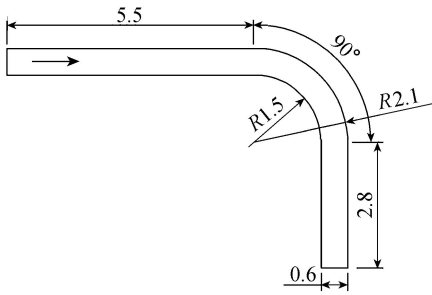


图 1 验证模型平面(单位:m)

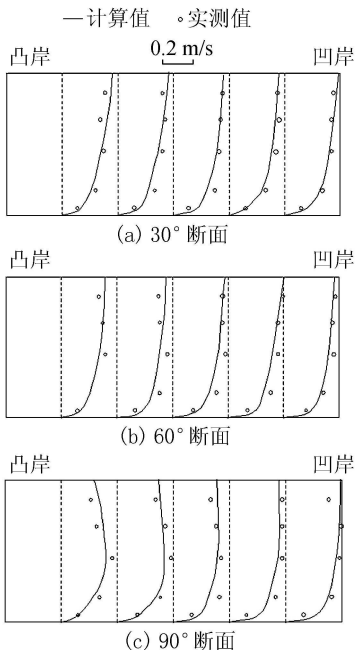


图 2 纵向流速垂向分布的计算值与实测值对比

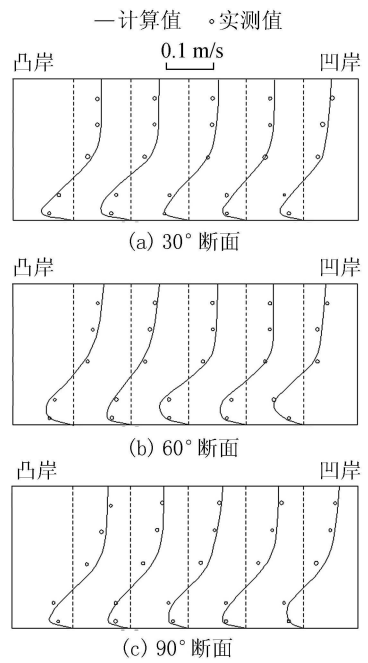


图 3 横向流速值的垂向分布计算值与实测值对比

表 1 计算得到的两岸水位 m

断面	凸岸水位	凹岸水位	两岸水位差
30°	0.1994	0.2013	0.0019
60°	0.1994	0.2012	0.0019
90°	0.1997	0.2007	0.0011

2 裁弯水力模型建立

基于 2013 年、2014 年和 2016 年 7 月对黄河源若尔盖的泥炭型弯曲河流(黑河支流,哈曲上游)的实测资料建立数值模型,研究区域为两处裁弯的弯道及其上、下游(图 4)。裁弯 1(NC-1)位于北纬 103°03'14",东经 32°56'55",计算河段长 300 m。裁弯 2(NC-2)位于北纬 103°03'07",东经 32°56'47",计算河段长 405 m。河岸物质组成具有明显的二元结构,上层为泥炭层,下层为湖相的粉沙,夹杂河流相的粗沙或卵石。

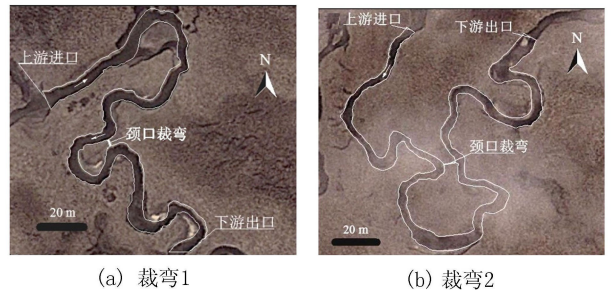


图 4 黄河源若尔盖黑河上游的 2 个裁弯位置(2016 年 7 月)

数值模型共计 8 种工况(表 2),包括 2013 年未裁弯,2013 年开始裁弯,2014 年、2016 年裁弯情况。

表2 数值模拟工况

工况	位置	年份	颈口宽度 b/m	颈口长度 L/m	颈口段平均 水深 h/m	宽深比 b/h	分流角/ $^\circ$	平面网格数	垂向分层数	节点数
1	NC-1	2013	0	0	0			9021	10	5125
2	NC-1	2013	0.4	2.99	0.14	2.9	65	18704	10	10498
3	NC-1	2014	3.4	3.00	0.5	6.8	65	19612	10	10792
4	NC-1	2016	5.9	3.00	0.39	15.1	65	19080	10	10540
5	NC-2	2013	0	0	0			8954	10	5091
6	NC-2	2013	0.4	5.90	0.15	2.7	81	10831	10	7745
7	NC-2	2014	1.4	5.50	0.5	2.8	81	22546	10	12690
8	NC-2	2016	6.3	6.00	0.33	19.1	81	23668	10	13349

模型进、出口均控制流量恒定,依据实测资料,进、出口流量均取 $Q=3.0\text{ m}^3/\text{s}$,河床粗糙高度取 0.005 m ,采用高阶计算模式,时间步长取 0.001 s 。

对于各工况下的地形数据作以下处理。

裁弯1:2013年河道原始地形(工况1)坡降取 0.36% (实测值),河宽 $3.7\sim 5.8\text{ m}$,横断面简化为矩形。2013年开始裁弯时(工况2),人工裁弯颈口段水深 0.16 m ,颈口宽度为 0.4 m ,颈口段坡降为 0 ,原河道地形仍然为未裁弯时的地形。裁弯发展到2014年(工况3),根据实测数据,颈口宽度已经展宽为 3.4 m ,颈口处被水流冲刷下切,水深已经达到 0.5 m 以上。老河道进口左侧冲刷严重,出现崩塌现象;而右侧则淤积严重,右侧水深只有 0.20 m 。由于2014年实测资料较详细,新、老河道的地形均采用实测资料。2016年(工况4),颈口宽度已经展宽为 5.9 m ;与2014年相比,颈口处有泥沙淤积,水深为 0.45 m 。老河道进口基本被淤死,高水位时有水流流过,低水位时无水流通过。颈口段地形采用实测数据,将老河道进口断面形态和2014年对比,认为2016年老河道的地形在2014年的基础上淤高了 0.05 m 。

裁弯2:2013年河道原始地形(工况5)坡降取 0.36% (实测值),横断面简化为矩形,河宽 $2.7\sim 7.0\text{ m}$ 。2013年开始裁弯时(工况6),人工裁弯颈口段水深 0.15 m ,颈口宽度为 0.4 m ;颈口段坡降为 0 ,老河道地形仍然是未裁弯时的地形。2014年(工况7)人工裁弯颈口段宽度为 1.4 m ,水深为 0.5 m ,颈口段横断面简化为矩形,老河道进口断面用实测资料,其他地方横断面仍然简化为矩形,参考裁弯1中2014年地形的变化,认为2014年裁弯2处老河道的地形在2013年基础上淤高 0.30 m 。2016年(工况8)颈口段新河道宽度达到 6.3 m ,新河道地形采用实测数据,坡降为 0 。2016年老河道的地形在2014年的基础上整体淤高 0.15 m 。

本文所涉及的河道断面位置见图5。

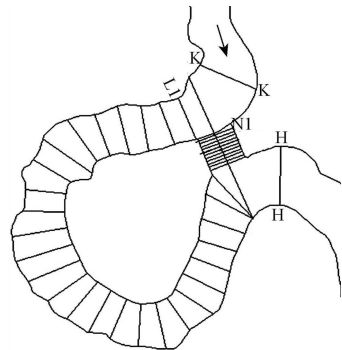


图5 裁弯1断面位置

3 结果分析

3.1 颈口分流

裁弯发生后,一部分水流通过新河道。定义分流比为新河道的流量占干流总流量的百分比,以反映新、老河道流量分配情况^[21-22]。研究分流比与新河道宽深比之间的关系,除了流量 $Q=3.0\text{ m}^3/\text{s}$ 工况以外,另增加两处裁弯2014和2016年 Q 分别为 $2.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.5\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.0\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5.0\text{ m}^3/\text{s}$ 的情况。裁弯发展过程中老河道进口断面逐渐淤积,水流不断冲刷新河道,新河道横断面逐渐变深变宽。用回归分析研究新河道宽深比和分流比、过水面积之间的关系见图6。裁弯发展过程中,新河道分流比随宽深比的增大而增大,二者之间呈线性正相关关系,两处裁弯相关系数均大于 0.893 。分流比与过水断面面积之间的相关性并不明显。

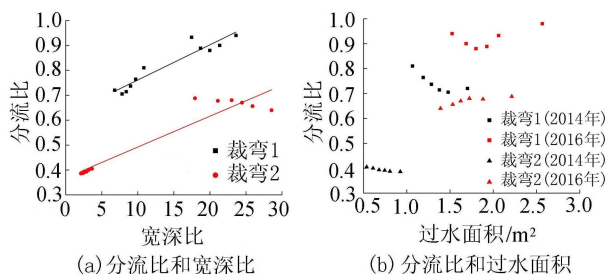


图6 分流比和宽深比、过水面积之间的关系

3.2 河道平均流速和水深

3.2.1 平面流场变化

以裁弯1为例分析流场变化过程。裁弯1处各

种工况的流速等值线分布见图7。与裁弯前工况相比(图7(a)),2013年开始裁弯时老河道的流场分布基本没有改变(图7(b)),颈口段进口处水流顶冲右岸(图8(a))。2014年人工裁弯已经历时1a,河道主流改变方向,大部分水流沿新河道,老河道只有少量水流通过(图7(c)),颈口段新河道主流偏向右岸(图8(b))。由于只有少量水流通过,老河道流速明显减小。老河道L1断面处右岸(凸岸)淤积,左岸(凹岸)冲刷,故主流偏向左岸。2016年裁弯已历时3a,流速分布见图7(d)。与2014年相比,颈口段主流方向基本没有改变(图8(c)),仍然偏向右岸,但流速值有所减小。老河道的流量和流速进一步减小,L1断面处主流仍然偏向左岸。

3.2.2 平均流速和水位沿程变化

裁弯发生后,新、老河道平均流速和水位均发生

改变。以裁弯1为例,分析裁弯过程中新、老河道平均流速和水位的变化情况。不同工况下裁弯1处老河道和新河道的沿程流速和水位分布见图9和图10,图9(a)、图10(a)中横坐标0点表示L1断面,图9(b)、图10(b)中横坐标0点表示N1断面。

2013年裁弯初始(图9(a)),老河道L1断面平均流速值减小,其他区域平均流速和未裁弯时相同。2014—2016年,老河道断面平均流速逐渐减小。2013—2016年,颈口段新河道断面平均流速则是先增大后减小(图9(b))。裁弯1处老河道水位沿程变化见图10(a)。2013年裁弯刚发生时,老河道水位基本没有变化。裁弯发展到2014年,水位升高,水面比降增大。2016年,老河道上游水位降低,下游水位有所增加,比降进一步增大。裁弯后,新河道水位的变化见图10(b)。裁弯发展到2014年,新河

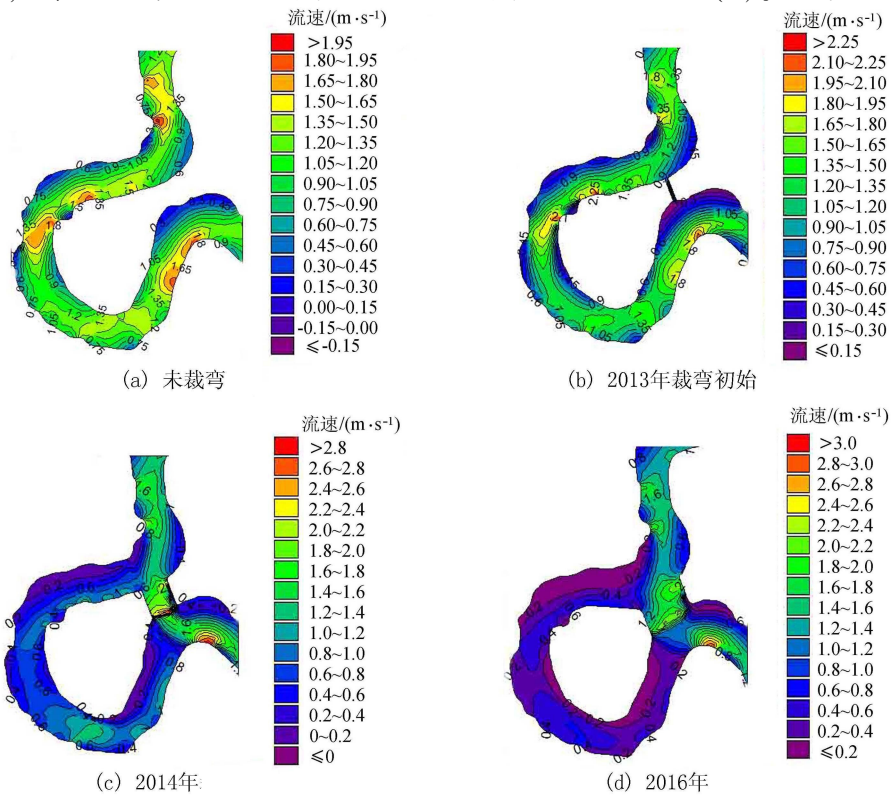


图7 裁弯1发展过程中河道流速分布的变化

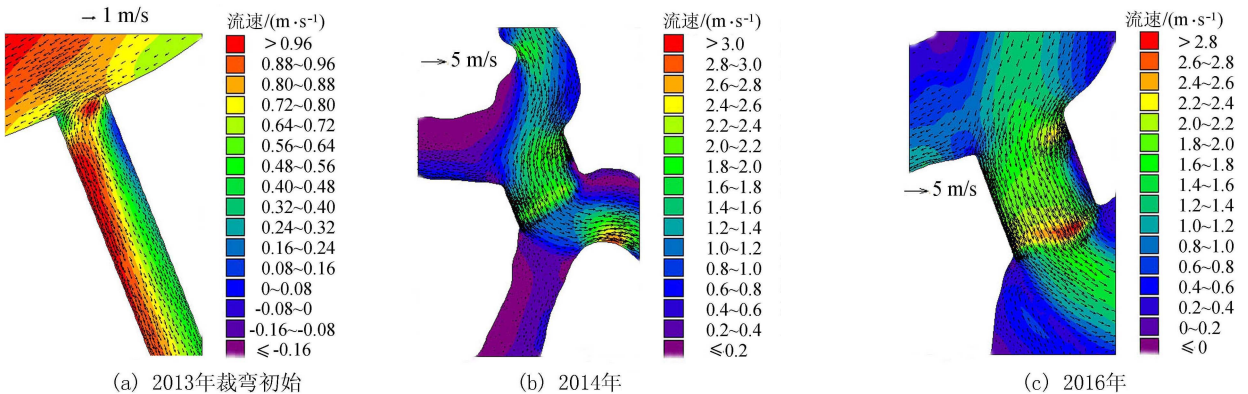


图8 裁弯1颈口段进口处流场

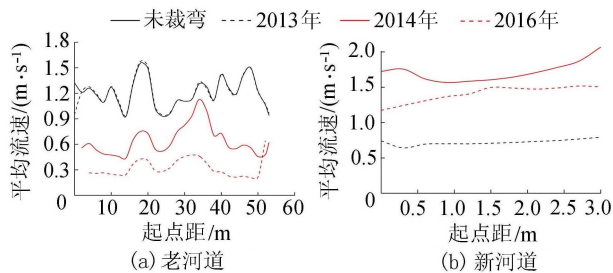


图9 裁弯1平均流速沿程分布

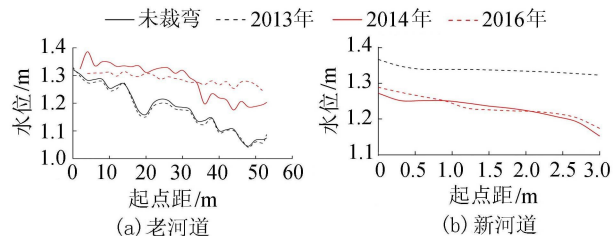


图10 裁弯1水位沿程分布

道水位下降,新河道比降略有增加。2016年,新河道水位和2014年相差不大。

3.3 横向环流变化

K—K断面位于裁弯1处原河道上游弯道的弯顶处,距裁弯颈口5.0m。裁弯过程中,K—K断面垂向流场变化见图11。各阶段,K—K断面均形成横向环流,底层流速最小,表层流速最大。2013年裁弯刚发生时,K—K断面垂向流场未发生明显变化。裁弯发展到2014年,K—K断面流速值略微减小。而到了2016年,流速值又增加,恢复到未裁弯时的流场。可见,裁弯对其上游弯顶处流场的影响不是特别明显。

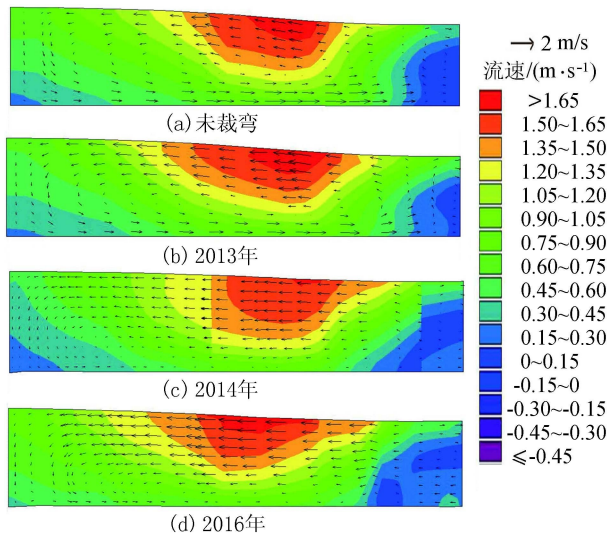


图11 裁弯1上游K—K断面垂向流场变化

裁弯1处下游H—H断面位于新、老河道交汇下游弯道的弯顶处,距裁弯颈口4.0m。未裁弯时,H—H断面形成横向环流(图12(a)),上部由凸岸指向凹岸,下部由凹岸指向凸岸。凸岸流速大于凹岸流速,上部流速大于底部流速,符合弯道环流的一

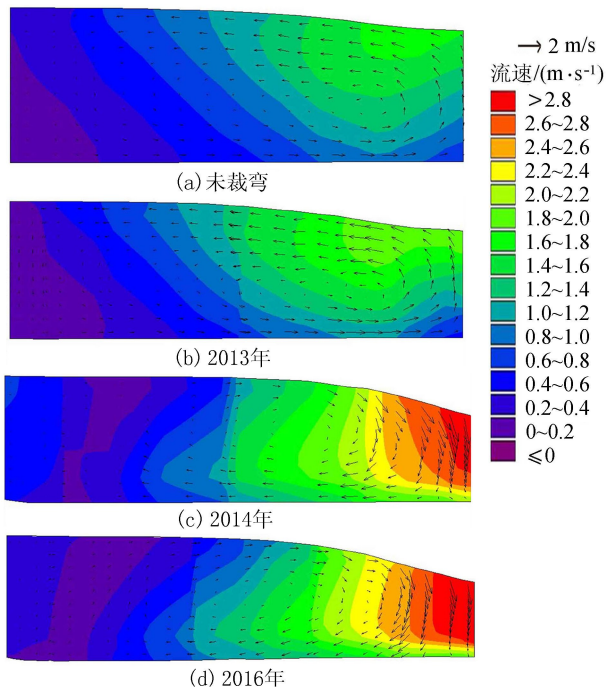


图12 裁弯1下游H—H断面垂向流速变化

般特征。2013年裁弯初始,H—H断面流场基本没有变化(图12(b))。裁弯发展到2014年,H—H断面流场与前两种工况完全不同(图12(c))。受新、老河道汇流的影响,水流在H—H断面处形成剧烈的横向环流,环流方向与未裁弯时相反,上部由凹岸指向凸岸,下部由凸岸指向凹岸。底部流速值大于上部流速值,凸岸流速仍然大于凹岸流速。与2013年相比,凸岸流速约增加了1.0m/s。与2014年相比,2016年H—H断面流场变化不明显(图12(d))。裁弯明显改变了邻近下游弯顶处水流结构,包括横向环流的方向和流速值的大小。

由于裁弯2处上、下游弯道距裁弯位置较远,裁弯对弯顶处水流结构影响不明显。

4 结论

a. 黄河源若尔盖黑河上游两处颈口裁弯发生后,新河道较快冲深展宽,新河道的分流比和宽深比相应改变,而且两者呈线性正相关关系,即随着新河道的宽深比增加,分流比呈增加趋势。

b. 颈口裁弯引起新、老河道的流量发生重分配和流场重分布。裁弯初始发生时,老河道的流场基本不受影响。颈口段新河道宽深比和分流比随着裁弯发展逐渐增大,且老河道的流量、水深和断面平均流速均逐渐减小。新河道流量则逐渐增大,平均流速则呈先增大后减小的规律。裁弯后,老河道水面比降有所减小,新河道比降略有增大。

c. 颈口裁弯对上游河道流场的影响较小,但是

明显改变其邻近下游弯道弯顶处流场,包括横向环流的方向和大小。

参考文献:

- [1] 李志威,王兆印,徐梦珍,等. 弯曲河流颈口裁弯模式与机理[J]. 清华大学学报(自然科学版),2013,53(5): 61-65. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, XU Mengzhen, et al. Patterns and mechanism of neck cutoffs on meandering rivers on meandering rivers [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Sciences), 2013, 53(5): 61-65. (in Chinese))
- [2] 刘晶,李志威,田世民,等. 近60年渭河下游自然裁弯时空演变规律[J]. 泥沙研究,2017,42(1): 13-20. (LIU Jing, LI Zhiwei, TIAN Shimin, et al. Study on meander cutoffs of the Lower Wei River in recent 60 years [J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(1): 13-20. (in Chinese))
- [3] LI Zhiwei, YU Guoan, BRIERLEY Gary, et al. Migration and cutoff formation of meanders in hyper-arid environments of the middle and lower Tarim River, Northwestern China [J]. Geomorphology, 2017, 276: 116-124.
- [4] 潘庆桑,史绍权,段文忠. 长江中游河段人工裁弯河道演变的研究[J]. 中国科学,1978(2): 212-225. (PAN Chingshen, SHI Shaoquan, DUAN Wenzhong. A study of the channel development after the completion of artificial cutoffs in the middle Yangtze River [J]. Scientia Sinica, 1978(2): 212-225. (in Chinese))
- [5] SMITH L M, WINKLEY B R. The response of the Lower Mississippi River to river engineering [J]. Engineering Geology, 1996, 45: 433-455.
- [6] ZINGER J A, RHOADS B L, BEST J L. Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(10): 675-678.
- [7] GAY G R, GAY H H, GAY W H, et al. Evolution of cutoffs across meander necks in Powder River, Montana, USA [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(7): 651-662.
- [8] HOOKE J M. Cutoffs galore: occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river [J]. Geomorphology, 2004, 61(3/4): 225-238.
- [9] ERSKINE W. Alluvial cutoffs as indicators of former channel conditions [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(1): 23-37.
- [10] CONSTANTINE J A, DUNNE T. Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes [J]. Geology, 2008, 36(1): 23-26.
- [11] HOOKE J M. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England [J]. Geomorphology, 1995(14): 235-253.
- [12] LI Zhiwei, GAO Peng. Channel adjustment after artificial

neck cutoffs in a meandering river of the Zoige basin within the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Catena, 2019, 172: 255-265.

- [13] 吴宇峰,朱鉴远. 急流弯道水流露底现象研究[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 9-10. (WU Yufeng, ZHU Jianyuan. Exposed bottom phenomenon of curved channels with rapid flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 9-10. (in Chinese))
- [14] 景何仿,李春光. 黄河大柳树-沙坡头河段典型弯道水流运动平面二维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 60-64. (JING Hefang, LI chun Guang. Two-dimensional numerical simulation of flow motion in typical bends of Daliushu-Shapotou Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 60-64. (in Chinese))
- [15] 谢鉴衡. 裁弯取直的水力计算和河床变形计算[J]. 武汉水利电力学院学报, 1963(2): 16-29. (XIE Jianheng. Calculation on hydraulic and riverbed deformation of cutoff [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1963(2): 16-29. (in Chinese))
- [16] FARES Y R. Changes of bed topography in Meandering Rivers at a neck cutoff intersection [J]. Journal of Environmental Hydrology, 2000, 8(13): 1-18.
- [17] 李琳琳,余锡平. 裁弯对上下游流态影响的三维数学模型研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 183-189. (LI Linlin, YU Xiping. Study on effects of river cutoffs by a 3-D numerical model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 183-189. (in Chinese))
- [18] 龙圣海,黄廷林. 基于MIKE3的金盆水库三维水温结构模拟研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 16-24. (LONG Shenghai, HUANG Tinglin. Water temperature modeling for Jinpen Reservoir using MIKE 3 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11): 16-24. (in Chinese))
- [19] 方红卫,何国建,郑邦民. 泥沙输移数学模型[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [20] ABHARI M N, GHODSIAN M, VAGHEFI M, et al. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3): 292-298.
- [21] 尹学良. 弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J]. 地理学报, 1965, 31(4): 287-303. (YIN Xueliang. Experimental studies on formation and evolution of meandering river [J]. Acta Geographica Sinica, 1965, 31(4): 287-303. (in Chinese))
- [22] LI Zhiwei, WU Xinyu, GAO Peng. Experimental study on the process of neck cutoff and channel adjustment in a highly sinuous meander under constant discharges [J]. Geomorphology, 2019, 327: 215-229.

(收稿日期:2017-11-28 编辑:郑孝宇)