

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0070

高亚平,王玉川,郑亚男,等.平面斜向射流冲蚀不同坡度沙床的试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):147-154.  
GAO Y P, WANG Y C, ZHENG Y N, et al. Experimental study on erosion of sand beds with different slopes by plane jet with inclined angles[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 147-154. (in Chinese)

## 平面斜向射流冲蚀不同坡度沙床的试验研究

高亚平<sup>1,2</sup>,王玉川<sup>1,2</sup>,郑亚男<sup>2</sup>,吴杰<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨陵712100;  
2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨陵712100)

**摘要:**利用射流清淤在疏浚工程中已得到广泛的应用并发挥了重要的作用,探究工作射流条件和沙床边界条件对冲蚀效果的影响有助于疏浚设备的优化设计及提高疏浚效率。观测和分析了静止平面斜向射流在不同射流速度、射流角度及沙床坡度条件下冲蚀沙床的过程、冲坑形态、以及冲坑外浑水流动特征。结果表明:二维冲坑剖面存在几何相似性,几何形态不对称,整体向下游发展;冲坑发展过程可分为初始、发展和稳定三个阶段,冲坑的深度随时间的变化呈对数关系增长,在冲坑深度达到最大深度一半时冲蚀速率最大;二维冲坑面积随射流角度的增大呈先减小、后增大的关系变化,在45°时存在极小值;泥沙冲蚀量、坑外浑水流动速度随着沙床坡度的增大而增加,而坡度大于10%后冲蚀量增长趋势趋缓。

**关键词:**平面射流;几何相似性;二维冲坑;喷射角度;沙床坡度

中图分类号:TV14 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Experimental study on erosion of sand beds with different slopes by plane jet with inclined angles

GAO Yaping<sup>1,2</sup>, WANG Yuchuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Yanan<sup>2</sup>, WU Jie<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Areas of Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;  
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The utility of jet dredging has been widely used and played an important role in dredging projects. It is important to explore its results with different jet factors and dredging factors, which can improve dredging efficiency. In this paper, the erosion processes of sand beds with different slopes by the plane jet with inclined angles were investigated with different jet velocities, jet angles and slopes of sand bed, shapes of scour holes, and characteristics of turbid flow outside the crater. The results showed that: There were geometric similarities of the scour holes with asymmetrical geometry and downstream-toward profiles; The development processes of the scour holes can be divided into three stages: initial stage, development stage and stable stage; The depth of the scour holes developed with time as a logarithmic relationship, and the erosion rate reached the largest when the crater depth reaches half of the maximum depth; With the increase of jet angle, the areas of two-dimensional crater decreased firstly and then increased. It reached its minimum value when the jet angle was at 45°; The volumes of sediment erosion and the speed of turbid flow outside the crater increased with the slopes of the sand bed. However, the growth trend slowed down after the slope was greater than 10%.

**Key words:** plane jet; geometric similarity; two-dimensional scour holes; jet angle; slope of the sand bed

收稿日期:2018-09-11 修回日期:2019-03-16 网络出版时间:2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190321.1527.009.html>

基金项目:国家自然科学基金(51509209);陕西省水利科技项目(2017slkj-4)

作者简介:高亚平(1992—),男,甘肃静宁人,主要从事水动力学和多相流方面研究。E-mail: YapingGao@nwfufu.edu.cn

通信作者:王玉川(1983—),男,河南林州人,副教授,博士,主要从事水动力学和多相流方面研究。E-mail: wyc@nwsuaf.edu.cn

利用人工扰动产生异重流<sup>[1-3]</sup>进行清淤的思想最早起源于 15 世纪荷兰,采用搅动泥沙的疏浚方法<sup>[4-6]</sup>,把犁系于航行的船尾,把松河底泥沙,使其悬浮于水中,利用水流将泥沙带到深处沉淀。20 世纪九十年代以来,利用射流冲蚀水库泥沙和航道淤积物的水力清淤已经成为清淤的一种的重要手段,其主要作用是使水下淤积物液化、悬浮而形成异重流并随水流运动输移至下游,达到清淤的目的。例如,为解决军港的淤积问题,美国海军土木工程试验室曾进行大量的室内和野外的试验研究<sup>[7-8]</sup>;近年来,为了抑制潼关河床的不断抬高,在黄河潼关段采用清淤船进行射流水力清淤的研究与实践<sup>[9]</sup>。

射流冲蚀沙床是一个复杂的水力学和多相流问题,受到射流、水流和沙床边界等因素<sup>[10-12]</sup>的影响。目前,没有成熟的理论模型描述其物理过程,开展不同因素影响的试验研究<sup>[13-16]</sup>是研究这一问题的主要方法。许多学者对静止喷嘴射流冲蚀问题进行了试验与理论研究,主要分为贴壁射流(水平射流)和垂直射流,李文学、张原锋等<sup>[17-18]</sup>人对贴壁射流的试验研究,主要分析了射流流速与喷嘴内径对贴壁射流冲蚀效果的影响。Aderibigbe<sup>[19]</sup>根据冲蚀参数  $E_c$  垂直射流冲刷过程分为弱冲蚀( $0.2 < E_c \leq 0.35$ )和强冲蚀( $E_c > 0.35$ )条件,并给出了两种冲坑形态特点。槐文信<sup>[20]</sup>提出了垂向射流二维冲坑特征长度的半经验表达式,顾磊等<sup>[21]</sup>研究了垂直射流作用下喷嘴间距对射流冲蚀效果的影响。Rajaratnam 等<sup>[22]</sup>通过一系列试验研究,得出了垂直射流作用下无黏性松散沙床的动态与静态发展规律。李文学等<sup>[16]</sup>对入射角分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  及  $90^\circ$  工况下对应冲蚀效果的影响进行了一系列试验研究,得到了各入射条件下的冲坑特征尺度关系。

现有的研究大多数是基于冲坑几何形态的研究作为衡量冲蚀效果的关键因素。实际上射流清淤的最终目的是通过射流的冲蚀作用,将淤积的泥沙通过异重流的形式向下游输送。而在这一物理过程中,射流速度直接影响冲击水流对沙床作用力的大小,进而影响起动沙量的多少;射流角度决定了射流作用于沙床的作用力的方向和浑水流速度的快慢;而沙床坡度也会影响冲蚀后形成的浑水流运动速度,因此,这三个因素是射流清淤过程中需考虑的关键指标。基于此,本文考虑了不同射流速度、射流角度和沙床坡度条件下射流对沙床冲蚀作用,探讨二维冲坑的几何相似性,研究了各种因素综合影响作用下的泥沙输移效果,研究成果可为射流清淤装置和方案的优化设计提供参考。

## 1 试验装置及试验

试验水槽由有机玻璃制成,水槽长 3.0 m、宽 0.25 m、深 0.5 m。在水槽的一端有一方形水箱,沙床的坡度由水槽一端的支撑高度调节。为了精确测量沙面的变化情况,在有机玻璃水槽外壁贴刻度纸,并在水槽的一侧用摄像机进行实时记录冲蚀情况。初始沙面高 7.1 cm,每次试验前注入水深为  $H=14$  cm。

试验采用细沙,其干容重为  $\rho_s=2.56$  g/cm<sup>3</sup>,中值粒径  $D_{50}=0.147$  mm,图 1 所示为泥沙的粒径级配曲线图。试验采用 60 个沿直线布置的喷嘴列作为射流装置,喷嘴列的总长度为 24 cm,由 60 个内径  $B_0=0.8$  mm 沿直线布置的喷嘴分为三段组成,每段独立供水,如图 2 所示,以保证每个喷嘴出口射流速度一致,形成平面射流,以达到二维冲蚀效果<sup>[23]</sup>。图 3 为典型的二维冲蚀轮廓图,从图中可以看出,冲坑断面沿喷嘴列长度方向平滑,意味着沿长度方向的任意断面泥沙沉积轮廓一致,可认为冲坑剖面为二维轮廓<sup>[23]</sup>,由于冲坑宽度不变,冲蚀量等于冲坑的轮廓面积乘以冲坑宽度(即喷嘴列的总长度)。喷嘴射流强度由可调节流量的水泵来控制。水泵的扬程为 5.2 m,喷嘴列的最大射流流速  $U_{\max}=5.6$  m/s。

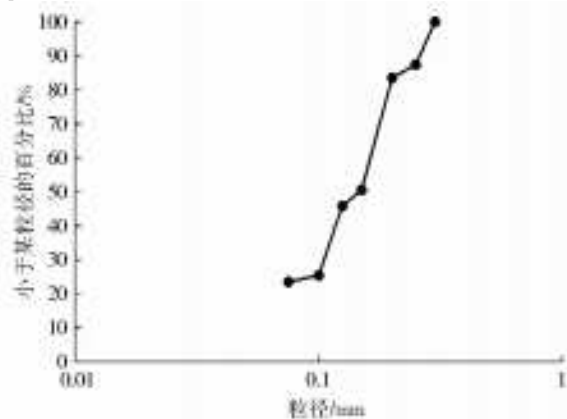


图 1 泥沙的粒径级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of sediment particle size



图 2 射流喷嘴列

Fig. 2 Jet nozzles

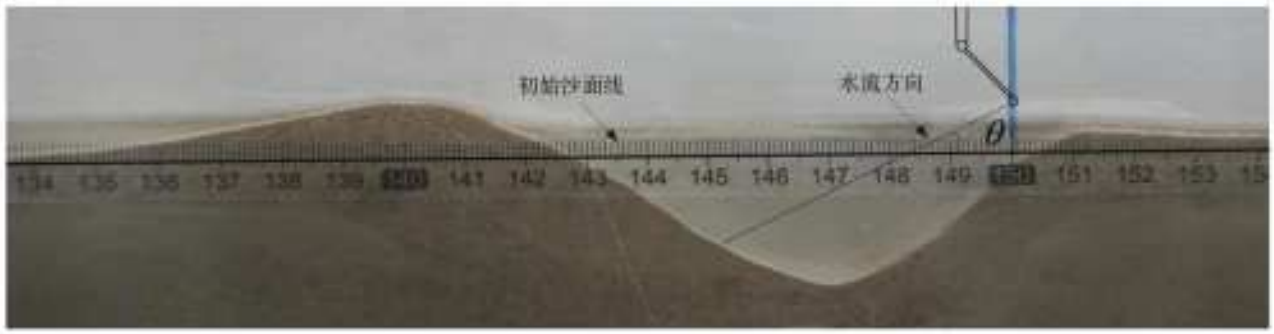


图3 二维冲蚀轮廓(组次 No. 04)

Fig. 3 Photo of two-dimensional erosion profile

喷嘴列通过一个可调节角度的连杆固定,喷射角度指喷射出的水流与水平面之间的夹角,如图4所示。其中,射流方向与连杆垂直,根据角度关系,射流角度 $\theta$ 等于图4中的角 $\alpha$ ,喷射角度 $\theta$ 与两节连杆之间的夹角 $\beta$ 之和为 $180^\circ$ ,可通过调节 $\beta$ 的值来得到试验所需的角。试验设计时在两节连杆连接处分别设置了 $120^\circ$ 、 $135^\circ$ 和 $150^\circ$ 三个角度的固定位置,即对应于 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $30^\circ$ 的喷射角。

本文试验采用控制变量法,进行了3个不同的喷射角 $\theta$ ,5种不同的水槽坡度 $n$ 以及4种不同的射流速度,共计60组试验。选取其中的10组代表性试验结果进行分析,对相同的工况,重复进行3次试验,测量结果取3次试验平均值,以保证试验结果的精

度。每次冲坑轮廓形态在泥沙完全沉降后进行测量,试验具体参数见表1。试验中采用两个相机分别对浑水流运动情况和射流冲蚀的局部过程进行观测。

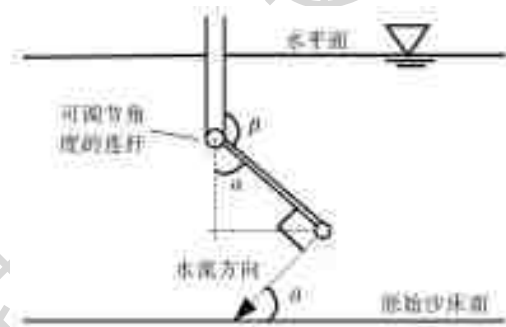


图4 喷射角度示意图

Fig. 4 Diagram of jet nozzle angles

表1 固定射流工况下的试验参数

Tab. 1 Experimental parameters under fixed jet conditions

No.	$n/\%$	$\theta/^\circ$	$B_0/\text{mm}$	$D_{50}/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$U_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\epsilon_m/\text{mm}$	$E_c$
01	0.70	60	0.8	0.147	10	4.31	29.0	2.57
02	0.70	60	0.8	0.147	10	3.24	19.5	1.93
03	0.70	45	0.8	0.147	10	4.28	30.5	2.55
04	0.70	45	0.8	0.147	10	3.28	21.5	1.96
05	0.70	30	0.8	0.147	10	4.25	36.5	2.53
06	0.70	30	0.8	0.147	10	3.39	22.0	2.02
07	2.20	60	0.8	0.147	10	4.20	27.0	2.50
08	5.40	60	0.8	0.147	10	4.21	32.0	2.51
09	11.27	60	0.8	0.147	10	4.11	33.0	2.45
10	22.05	60	0.8	0.147	10	4.39	39.5	2.62

注: $n$ 为沙床坡度; $\theta$ 为喷射角度; $B_0$ 为单个喷嘴的内径; $D_{50}$ 为泥沙的中值粒径; $h$ 为喷嘴距沙床面的垂直距离; $U_0$ 为喷嘴的射流流速(采用称重法测量流量,每组试验均测量3次取平均值,根据连续性方程求得射流速度); $\epsilon_m$ 为冲坑的最大深度; $E_c$ 为冲蚀参数。

## 2 试验结果分析

### 2.1 冲坑形态和几何相似性

根据 Aderibigbe 和 Rajaratnam<sup>[18,22]</sup>提出的冲蚀参数 $E_c$ ,如式(1)所示,是判别二维冲坑类型的重要特征参数,各工况的 $E_c$ 见表1,试验中冲蚀参数 $E_c > 0.35$ ,为强冲蚀条件。

$$E_c = \frac{U_0 \sqrt{B_0/h}}{\sqrt{g D_{50} \Delta \rho / \rho}} \quad (1)$$

式中: $B_0$ 为单个喷嘴的内径(m); $\rho$ 为水的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $D_{50}$ 为泥沙的中值粒径(m); $\Delta \rho$ 为泥沙密度与水的密度之差( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $h$ 为喷嘴列距初始沙床的垂直距离(m)。

冲坑形态的主要特征参数包括,冲坑最深点的

冲蚀深度  $\epsilon_m$ , 冲坑的最大侵蚀长度  $b_m$  和二维冲坑的面积  $A$ , 各参数的定义见图 5。

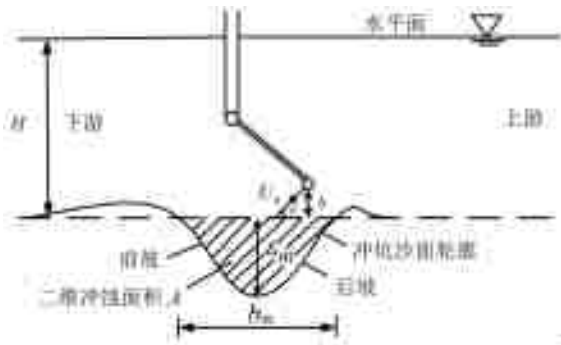


图 5 冲坑几何参数定义

Fig. 5 The diagram of geometric parameters of a scour hole

冲坑的几何相似性<sup>[24]</sup>指冲坑剖面的纵横向坐标无量纲化后,可被叠加在一起,从而对其几何相似特征进行研究。Aderibigbe<sup>[19]</sup>等关于垂直射流冲坑形态的研究发现,冲坑几何参数无量纲化后的剖面具有相似性。本文对冲坑几何相似性的研究采用最大冲蚀深度  $\epsilon_m$  和最大冲蚀宽度  $b_m$  为参考量进行无量纲变换。图 6 为不同工况下 ( $\epsilon/\epsilon_m$ ) 对应 ( $b/b_m$ ) 无量纲化后的冲坑轮廓图。结果表明,在不同的射流角度条件下,冲坑剖面存在几何相似性,而冲坑顶点外的沉积剖面有所差异,其主要是在射流角度为  $45^\circ$  时有所不同,这与  $45^\circ$  时的冲蚀量较小有关(参见 2.3 节中结果)。

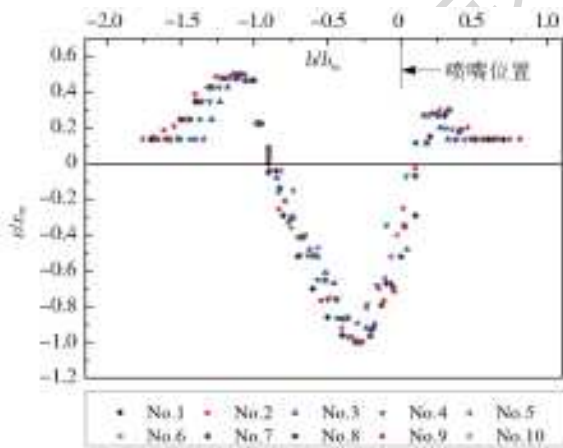


图 6 冲坑无量纲轮廓

Fig. 6 Dimensionless profile of a stabilized scour hole

图 3 为试验组次 No. 4 工况的冲坑轮廓形态图。与垂直射流冲坑形态的研究<sup>[19-20]</sup>不同的是,在垂直射流的工况下,冲坑呈现轴对称形状<sup>[20]</sup>。而在本试验中,由于射流与水平面存在一定的夹角,水流以一定的角度斜射向沙床,冲坑的前坡和后坡形状不对称。水流的作用面为前坡,同时存在一个向下游的速度分量,使冲击沙床形成的浑

水流大部分顺流而下,携带泥沙向下游输移和沉积,导致冲坑形态向下游发展且下游侧冲坑坡面较缓。射流对上游侧坡面的主要作用为卷吸泥沙,导致后坡面陡峭。

## 2.2 冲坑的形成过程

根据试验观测,对冲坑的最大深度随时间的变化进行无量纲化结果,见图 7。根据冲蚀速率的变化,可将冲坑的发展过程可分为三个阶段,即初始阶段、发展阶段和稳定阶段。在初始阶段,由于水流作用于床面的动力远大于床沙的有效重力和阻力之和,平坦的床面上会很快形成冲坑,冲蚀速率逐渐加快。在发展阶段,被射流冲起的沙粒大部分以推移质运动方式<sup>[25]</sup>沿冲坑的前坡上爬,而另一部分则以悬移质方式运动,随着时间的延续,冲坑逐渐变大,最深点不断下移,在此阶段冲蚀速率基本保持一常数。在稳定阶段,此时由于冲坑增大,水流作用于冲坑的强度减弱,冲蚀速率开始减小,冲坑的深度的增加趋于平缓,被冲起的大部分泥沙颗粒已经不能再越过冲坑前、后坡的沙垄顶点,而是在水流作用下在冲坑内运动,射流停止工作后,该部分泥沙颗粒将沉积在冲坑内。

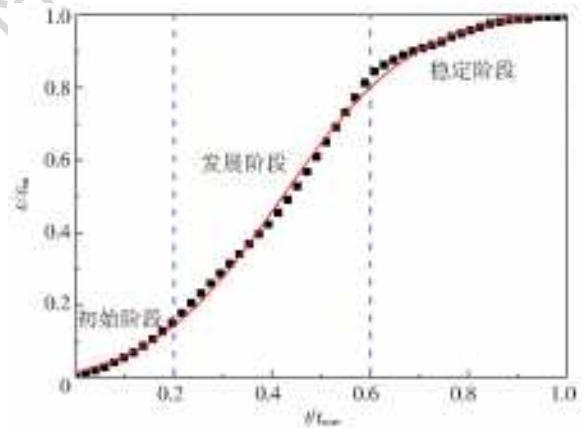


图 7 冲坑最大深度随时间的变化(组次 No. 06)

Fig. 7 Variations of the maximum depth of the scour hole

冲坑在发展过程中其各项几何尺寸参数随时间的对数呈线性增长的规律已被大量的试验成果<sup>[16-17]</sup>所证实,但大多数公式只适用于冲坑发展的某个阶段,且采用绝对量值表达不具有普适性。李文学<sup>[17]</sup>曾用修正的 LDRTF(Logistic Dose Response Transition Function)函数描述了冲坑的发展过程,其几何尺寸随时间的变化关系为

$$L = a + \frac{b}{[1 + (c/t)^m]^n} \quad (2)$$

式中: $t$  为冲蚀时间(s); $L$  为冲坑的某个几何尺寸(m); $a, b, c, m, n$  均为常数,由试验资料确定。

对图 7 中冲坑发展过程的最大深度随时间变化

关系进行了拟合,得到

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_m} = 1.02219 - \frac{1.00552}{1 + e^{\frac{t/t_{\max} - 0.4191}{0.1362}}} \quad (3)$$

可见,冲坑的最大深度随时间的变化符合对数增长的关系,且当时间为零时, $\epsilon/\epsilon_m$  的值近似为零,即冲坑的深度为零,当时间趋于无穷大时, $\epsilon/\epsilon_m$  的值趋近于1。由上节冲坑的几何相似性可知,冲坑的发展过程均符合该关系式。从拟合结果可以看出,斜率在  $t/t_{\max}=0.4191$  时最大,说明此时的冲蚀效率最大,此时的冲坑深度近似为最大冲坑深度的一半。

### 2.3 喷射角度的影响

图8为射流速度在两种不同流速  $U_{01}=3.3$  m/s 和  $U_{02}=4.3$  m/s 作用下冲坑的冲蚀面积及冲坑深度的变化关系图(喷嘴距沙面高度  $h=10$  mm)。在射流角度分别为  $\theta=30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  三种工况下进行了试验研究。在试验范围内可以看出,冲蚀面积随射流角度的增大呈现出先减小、后增大的趋势,在  $45^\circ$  时冲坑面积存在极小值,而冲坑深度在同一射流流速下变化为毫米量级,但总体而言其随射流角度的增大而减小。

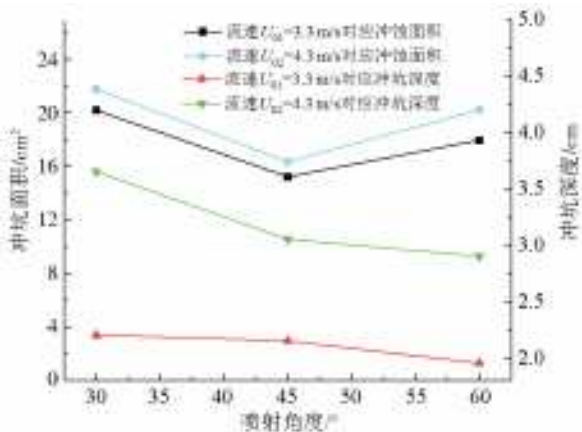


图8 不同射流角度下的冲坑尺寸

Fig. 8 Scour hole size at different jet angles

通过观察不同角度射流冲蚀沙床过程发现,在射流角度较小情况,水流冲击床面的作用面较大,射流剪切层卷席泥沙产生浑水流向下游运动,使冲坑的面积和深度持续增大。随着射流角度的增大,射流作用于沙床的面积减小,但是能量密度增大,使沙床面快速形成冲坑,泥沙悬浮的高度和浓度明显增大,但是很大一部分泥沙没有向下游输移,受到冲坑前后坡的阻挡作用,浑水流在冲坑内形成漩涡流动<sup>[26]</sup>,随着射流冲蚀达到稳定状态,大部分泥沙重新落淤至冲坑内,以致冲坑深度随着射流角度的增大而减小。二维冲坑面积在射流角度  $60^\circ$  条件下较

$45^\circ$  条件下大,其原因是射流冲击沙床后水流作用于沙床面的作用力较大,浑水流获得能量较大,携带较多的泥沙流出到冲坑外,冲蚀效果更明显,对应冲坑面积也较大。

### 2.4 沙床坡度的影响

试验观测了五个不同沙床坡度条件下冲坑外的浑水流运动情况和冲坑形态。射流速度、喷嘴列距沙床高度等条件均保持不变,其中射流流速为  $4.3$  m/s,喷嘴列高度取  $h=10$  mm,喷射角  $\theta=60^\circ$ ,坡度分别为  $n=0.0007$ 、 $n=0.0022$ 、 $n=0.0054$ 、 $n=0.01095$  和  $n=0.02205$ 。图9为不同坡度下对应的二维冲坑面积与冲坑深度。图10为射流冲蚀时间  $t=10$  s 后不同坡度条件下浑水流的运动情况。图11为不同坡度下冲坑形态。

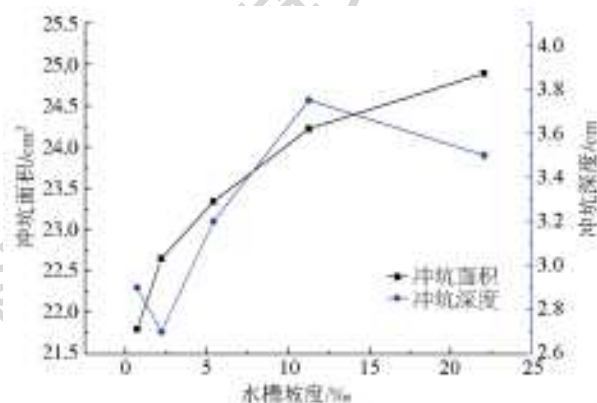


图9 不同水槽坡度下的冲坑尺寸

Fig. 9 Scour hole sizes at different sink slopes

由图9可以看到,冲坑的最大深度整体随着坡度的增大呈现出增大的趋势,在小坡度和大坡度下最大深度变化较小。冲蚀面积随着沙床坡度单调递增,即射流冲蚀量随坡度单调增大。但坡度大于  $10\%$  后,冲蚀面积的增大趋势随着坡度的增大逐渐趋缓。由图10可以看到,冲坑外的浑水流在  $10$  s 时间内运动距离均达到  $1$  m 以上,形成了对浑水流中泥沙颗粒的远距离输移,且随着沙床坡度的变大,冲坑外浑水流在相同的冲蚀时间内运动距离增大,即浑水流的速度变快,平均速度变化范围在  $0.1\sim 0.16$  m/s。根据图11所示的冲坑形态分析,由冲坑内搬运输移的泥沙在冲坑前后坡附近的沙床上沉积,形成沙垄。在水槽坡度比较小的条件下,落淤在冲坑后坡附近的沙床上沙垄较高,冲蚀泥沙向上游输移量较大。而在坡度较大条件下,下游沙垄高度较高,冲坑形态向下游发展明显,表明在泥沙更易于向下游输移,且距离更远,故在清淤实践中可以充分利用河道或水库坡度区进行排沙清淤。

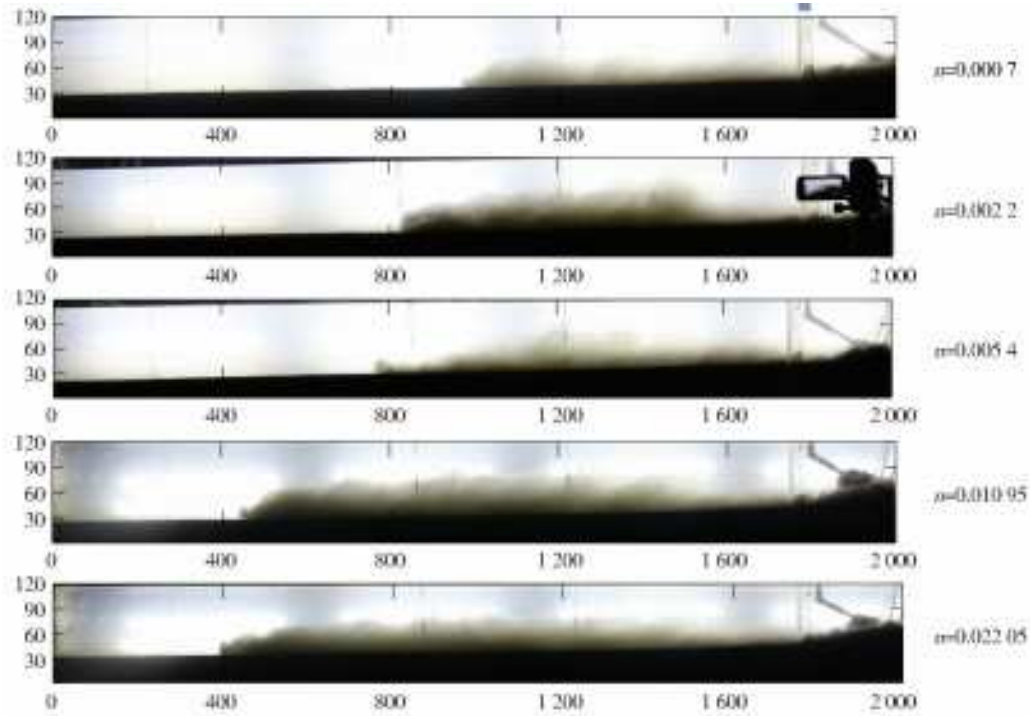


图 10 冲蚀时间  $t=10$  s 时不同坡度下浑水流运动情况(单位:mm)  
Fig. 10 Muddy water flow at different slopes during erosion time  $t=10$  s(mm)

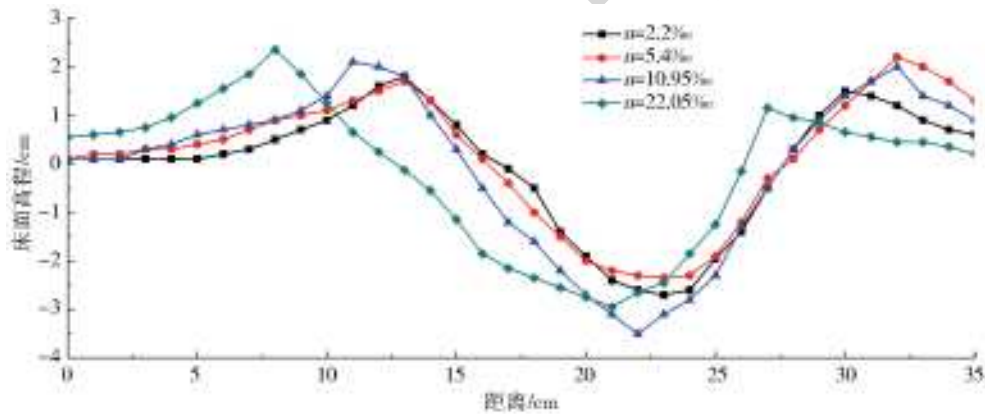


图 11 坡度对冲坑形态发展的影响  
Fig. 11 Effects of sink slopes on scour holes

### 3 结论

本文研究了静止喷嘴平面斜向射流冲蚀不同坡度沙床的过程和效果,探讨了二维冲坑的几何相似性、喷射角度和沙床坡度与冲坑参数的关系,分析了不同因素对射流冲蚀效果的影响。主要得到如下结论。

(1) 在强冲蚀( $E_c > 0.35$ )条件下,二维冲坑形态具有几何相似性,但是几何形状不对称性,整体向下游偏移,下游侧坡面平缓而上游侧坡面较陡峭。

(2) 冲坑的发展过程根据冲蚀速率的变化可分为初始、发展和稳定三个阶段,冲坑的最大深度随时间的变化呈对数增长的特性,最大冲蚀速率出现在深度达到最大冲蚀深度一半的位置。

(3) 二维冲坑面积(冲蚀量)随射流角度  $\theta$  ( $30^\circ \sim 60^\circ$ 变化范围内)的变化先减小、后增大,且冲蚀量在  $45^\circ$  时存在极小值。随着沙床坡度的增大,泥沙的冲蚀量和坑外浑水流运动速度也随之增大,但坡度大于  $10\%$  后增长趋势趋缓。

#### 参考文献(References):

[1] 范家骅. 异重流与泥沙工程实验与设计[M]. 中国水利水电出版社, 2011: 18-19. (FAN J H. Density current and sedimentation engineering; experiment and design [M]. China Water Resources and Hydropower Press, 2011: 18-19. (in Chinese))

[2] YEH P H, CHANG K A, HENRIKSEN J, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets[J]. Ocean Engineering,

- 2009,36(3):248-255. DOI:10.1016/j.oceaneng.2008.11.006.
- [3] 范家骅,祁伟,戴清. 异重流潜入现象探讨 I:水槽实验与理论分析成果回顾[J]. 水利学报,2018,49(4):404-418. (FAN J H, QI W, DAI Q. Investigation of density current plunging I: Review of previous flume experiment works and theoretical analysis[J]. Journal of Water Conservation, 2018, 49(4): 404-418. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20170641.
- [4] 董伟,魏伟,周茜. 浅谈黄河河口拦门沙疏浚综合技术[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 142-145. (DONG W, WEI W, ZHOU Q. Analysis of comprehensive dredging technology of Yellow River delta sandbar [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 142-145. (in Chinese)) DOI:10.3969/SP.J.1201.2010.03142.
- [5] 王楠,何炎平,黄超. 射流清淤船技术进展[J]. 船海工程,2013,42(3):1-6. (WANG N, HE Y P, HUANG C. The technology development of water injection dredger[J]. Marine Engineering, 2013, 42(3): 1-6. (in Chinese)) DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2013.03.001.
- [6] 李涛,张俊华,李书霞,等. 基于浑液面变化的水库异重流不平衡输沙规律探讨[J]. 水力发电学报,2013,32(4):148-152. (LI T, ZHANG J H, LI S X. Discussion on non-equilibrium sediment transport law of turbidity current under muddy lake interface changes in reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4):148-152. (in Chinese))
- [7] 李振升,倪福生,顾磊,等. 双喷嘴射流冲坑的几何相似性研究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(1):82-85. (LI Z S, NI F S, GU L, et al. Geometrical similarity of double nozzle jet scour hole[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(1): 82-85. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.2095-509X.2016.01.019.
- [8] AZIMI A H, RAJARATNAM, ZHU. An experimental study of sand deposition from slurry wall jets[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(140): 296-314. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000664.
- [9] 李彬,李果,郭志学,等. 变坡陡比降河道泥沙淤积逆向发展速度的试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):148-151. (LI B, LI G, GUO Z X, et al. Experimental study on speed of sediment deposition reversible transmission in steep slope river [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 148-151. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2016.02.026.
- [10] 宁锋,高传昌,王为术. 基于脉冲射流的小浪底水库人工异重流输沙方法探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2007,5(2):75-77. (NING F, GAO C C, WANG W S. Research of manpower density flow in Xiaolangdi Reservoir based on pulsed Jet [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007,5(2): 75-77. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2007.02.027.
- [11] TANG Y, CHAN D H, ZHU D Z. Numerical investigation of sand-bed erosion by an upward water jet [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 143(9). DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001319.
- [12] 曹慧群,李青云,黄苗,等. 我国水库淤积防治方法及效果综述[J]. 水力发电学报,2013,32(6):183-18. (CAO H Q, LI Q Y, HUANG Z, et al. Overview on control measures and their effects against reservoir sedimentation in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 183-189. (in Chinese))
- [13] 顾磊,倪福生,徐立群,等. 垂直射流冲刷砂床的喷嘴间距试验研究[J]. 泥沙研究,2017,42(3):54-58. (GU L, NI F S, XU L Q, et al. Experimental study on nozzle distance of sand bed scour by impinging water jets [J]. Sediment Research, 2017, 42(3): 54-58. (in Chinese)) DOI:10.16239/j.cnki.0468-155x.2017.03.010.
- [14] 高传昌,赵礼,刘新阳,等. 淹没条件下自激脉冲射流冲蚀试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1):53-56. (GAO C C, ZHAO L, LIU X Y et al. Experiment research on erosion of self-excited inspired pulsatile jet in submerged condition [J]. Journal of Mechanical Engineering of Irrigation and Drainage, 2012, 30(1): 53-56. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.01.011.
- [15] 刘晓杰,化晓锋,陈伟,等. 新型渠道清淤技术与设备研究[J]. 南水北调与水利科技,2013(5):189-192. (LIU X J, HUA X F, CHEN W, et al. Research on dredging technology and equipment of new channels [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(5): 189-192. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.05189.
- [16] 李文学,张隆荣,张原锋,等. 射流冲刷试验研究[J]. 泥沙研究,1999(4):7-13. (LI W X, ZHANG L R, ZHANG Y F, et al. Experimental study of scour by water jets [J]. Sediment Research, 1999(4): 7-13. (in Chinese))
- [17] 李文学. 二维贴壁射流冲刷水槽试验[J]. 泥沙研究,1995(4):50-59. (LI W X. Experiments of scour caused by a wall jet [J]. Sediment Research, 1995(4): 50-59. (in Chinese))
- [18] 张原锋,张隆荣. 射流冲刷试验及其在黄河潼关河段

- 的应用[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 19-22. (ZHANG Y F, ZHANG L R. Jet flow scouring experiments and application of their results to the Tongguan stretch of Yellow River[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2004, 35(12): 19-22. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2004.12.005.
- [19] ADERIBIGBE O O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 134(1): 19-34. DOI: 10.1080/00221689609498762.
- [20] 槐文信, 王增武, 钱忠东, 等. 二维垂向射流沙质河床冲刷的数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2012(1): 72-81. (HUAI W X, WANG Z W, QIAN Z D, et al. Numerical simulation of two-dimensional vertical jet sand bed erosion[J]. Chinese Science: Technical Science, 2012(1): 72-81. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11431-011-4574-y.
- [21] 顾磊, 倪福生, 李雯, 等. 喷嘴间距对双股平面射流冲刷的影响[J]. 泥沙研究, 2016(6): 32-37. (GU L, NI F S, LI W, et al. Influence of nozzle distance on scour by two plane water jets[J]. Sediment Research, 2016(6): 32-37. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2016.06.006.
- [22] BELTAOS S, RAJARATNAM N. Impinging circular turbulent jets[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol, 100, No. HY10, Oct, 1974.
- [23] PERNG A T H, CAPART H. Underwater sand bed erosion and internal jump formation by travelling plane jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 595(595): 1-43. DOI: 10.1017/S0022112007008567.
- [24] RAJARATNAM N. Erosion by plane turbulent jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 1981, 19(4): 20. DOI: 10.1080/00221688109499508.
- [25] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京, 科学出版社, 1983: 41-43. (QIAN N, WAN Z H. Sediment movement mechanics[M]. Beijing, Science Press, 1983: 41-43. (in Chinese))
- [26] 钱忠东, 胡晓清, 槐文信, 等. 基于欧拉模型的淹没射流冲刷数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(4): 419-425. (QIAN Z D, HU X Q, HUI W X, et al. Numerical simulation of submerged jet scour based on Euler model[J]. Chinese Science: Technical Science, 2011, 41(4): 419-425. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11431-010-4165-3.
- .....
- (上接第 114 页)
- [24] QIN D, QIAN Y, HAN L, et al. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye basin, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(1): 194-208. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.023.
- [25] MILLER C J, MILLER C J. Impact of artificial recharge on Tucson area groundwater quality[J]. 1990.
- [26] KUMAR S, GHOSH N C, SINGH R P, et al. Impact of canal recharge on groundwater quality of Kolar Area, District Bikaner, India[J]. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-18663-4\_52.
- [27] 黄修东, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 渗滤池砂样对回灌水中污染物去除的研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 62-65. (HUANG X D, SHU L C, LIU P G, et al. Study on the removal of pollutants in recirculating water by percolating sand samples[J]. Hydropower Science, 2009, 27(1): 62-65 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2009.01.017.
- [28] 王恩, 束龙仓, 黄修东, 等. 松散砂层及其有效粒径对回灌水水质影响的实验研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 37-40. (WANG E, SHU L C, HUANG X D et al. Experimental study on the effect of loose sand layer and its effective particle size on the quality of recharged water[J]. Hydropower Energy Science, 2009, 27(4): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2009.04.013.
- [29] 武显仓, 赵琪, 桓颖, 等. 深层承压含水层人工回灌条件下地下水中硝酸根的衰减[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 28-32. (WU X C, ZHAO Q, HUAN Y, et al. Attenuation of nitrate in groundwater under artificial recharge conditions of deep confined aquifer[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(4): 28-32. (in Chinese)) DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.004.
- [30] 李学礼, 孙占学, 刘金辉. 水文地球化学. 第 3 版[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (LI X L, SUN Z X, LIU J H. Hydrogeochemistry. 3rd edition [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010. (in Chinese))
- [31] BIAN C, CAI W T, LIU J W, et al. In Situ determination of nitrite in water and its application in groundwater contamination investigation[J]. Environmental Engineering, 2016, 39(9): 130-133. DOI: 10.13205/j.hjgc.201609028.