

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.011

# 30°分水角明渠水流紊动特性试验研究

程勇, 王文娥, 胡明宇, 凌刚, 胡笑涛

(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 杨凌 712100)

**摘要:**灌区分水口多为直角, 附近普遍存在冲刷、淤积及结构破坏现象。天然河流分、汇流多为锐角, 为探索非直角分水口区域明渠水流紊动特性, 以30°分水角明渠为研究对象, 采用声学多普勒点式流速仪测量各断面上的三维瞬时流速, 分析典型断面上的时均流速、环流强度、紊动强度、紊动能和床面剪切应力分布规律。试验结果显示: 分水口处水流横向流速沿渠宽方向变化较大, 易形成环流, 导致局部冲淤现象明显; 靠近口门侧水流紊动强度变化剧烈且分布无规律, 最大值出现在口门上唇断面; 分水口处下层水体紊动能明显大于上层水体, 紊动能较大值多集中在口门附近; 口门断面下唇附近床面剪切应力较大, 易出现冲刷侵蚀, 破坏渠道稳定; 与直角分水口相比, 分水角为30°时, 泥沙颗粒不易进入侧渠道, 水流对渠底及边壁侵蚀速率较低。研究结果可为灌区渠系设计及运行提供参考。

**关键词:**分水口; 环流强度; 紊动强度; 紊动能; 床面剪切应力

**中图分类号:** TV135.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2022)04-0638-10

灌区输配水多采用主渠与支渠轴线垂直布置, 具有占地面积小、渠系建筑物结构紧凑等优点, 但灌区运行结果发现, 分水口附近区域出现冲刷、淤积及结构破坏现象<sup>[1-2]</sup>, 原因是渠道侧向分流形成弯道水流, 环流及螺旋流等流速急剧变化引起水流结构紊乱, 导致局部泥沙淤积和冲刷现象, 也造成分水口两侧受力不平衡, 影响渠道正常运行及结构稳定。水流紊动是影响泥沙运移和边壁侵蚀与崩塌的主要因素<sup>[3-4]</sup>, 因此研究分水口区域水流紊动特性对渠系规划设计及稳定运行具有重要意义。

天然河道水流紊动特性与冲刷关系研究较多, 学者们通过原型测量、物理模型和数值模拟等方法对河道水流结构进行分析<sup>[5-7]</sup>。河道形态是影响水流结构的重要因素, 常见的有顺直型、弯曲型等。对顺直型河道研究发现, 过流宽度的束窄、扩散直接影响床面形态变化及泥沙颗粒运移和沉积<sup>[8]</sup>; 来流量与水流分离区长度呈正相关、床面剪切应力最大值出现在收缩段入口区域<sup>[9]</sup>; 扩散段侧壁侵蚀严重, 易引起河道拓宽<sup>[10]</sup>; 环流强度分布规律与涡旋发展密切相关, 河床阻力会加快近床区域涡旋的消散<sup>[11]</sup>。对弯曲型河道研究发现, 弯道环流是泥沙颗粒横向运动的主要动力, 环流的发展和形式与弯曲率密切相关, 环流区域内部紊动强度较小<sup>[12-13]</sup>; 近壁区流速变化直接影响河岸侵蚀速率<sup>[14]</sup>, 紊流运动和涡旋对局部冲刷有影响<sup>[15]</sup>。这些研究表明环流强度、紊动强度、紊动能和剪切应力等因素与河道冲刷关系密切。灌区渠系分水口附近水流结构对渠道冲刷研究成果较少, 尚需进一步研究。

河道稳定的多泥沙河流分流处, 支流与主河道轴线夹角多小于45°, 著名的都江堰水利工程分流处内江与外江夹角约为30°, 本文以30°分水角明渠为研究对象, 探索分水口附近水流紊动特性, 可为灌区渠道设计及运行提供参考。

收稿日期: 2022-01-17; 网络出版日期: 2022-05-09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220509.0815.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079113); 陕西省水利科技计划资助项目(2021slkj-8)

作者简介: 程勇(1994—), 男, 河南泌阳人, 博士研究生, 主要从事水工水力学研究。E-mail: 2582522560@qq.com

通信作者: 王文娥, E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

# 1 试验概况

## 1.1 水槽系统

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室进行, 试验系统由供水系统、变坡升降系统、数据采集系统、智能控制终端、试验水槽和回水系统组成。其中, 供水系统包括变频器、变频水泵、电磁流量计等, 可以根据设定目标流量自动调节变频器频率, 精准控制渠道流量。变坡升降系统由伸缩液压缸、储油槽、升降器等组成, 渠道坡度调节控制精度  $\pm 0.1$  mm。试验水槽布置如图 1 所示, 主渠道长 1 800 cm, 宽 80 cm, 深 50 cm; 侧渠道长 500 cm, 宽 40 cm, 深 35 cm, 均为矩形渠道; 侧渠底部高程高于主渠底部高程, 形成堰坎, 高为 6 cm; 主渠道与侧渠道中轴线夹角为  $30^\circ$ , 主渠道与侧渠道坡降均为 0.000 5。将坐标原点设置在主渠道进水口底部,  $x$  方向为主渠水流方向(纵向),  $y$  方向为垂直主渠水流方向(横向),  $z$  方向垂直向上(垂向)。

## 1.2 试验方案

灌区相似宽度的分水渠道的分流比约为 0.3<sup>[16]</sup>, 本试验通过调节主渠道末端尾门开度控制侧渠道分流量, 分流比为 0.3。试验设置 4 种工况, 主渠道来流量( $Q$ )分别为 20 L/s、30 L/s、40 L/s、50 L/s。

主渠道共设置 21 个水深测量断面(图 1(a)断面 01—断面 21), 其中, 分水口上下唇之间的主渠道设置 9 个测量断面(断面 07—断面 15), 断面间距 10 cm; 分水口上下游各设置 6 个断面, 断面间距 20 cm。每个断面设置 2 个测点, 分别在靠近分水口侧 3 cm 处(a 线)、距主渠左岸 3 cm 处(b 线)。

流速断面设置与水深测量断面一致。每个断面布设 11 条垂线(图 1(b)垂线 I—垂线 XI), 其中, 靠近口门一侧垂线间距 5 cm, 其余垂线间距 10 cm。每条垂线上选择 7 个 0.5 cm 间距的测点(近底区域), 其余测点间距 1 cm(最上面的测点位置根据水深调整)。

水深( $H$ )使用 SCM60 型水位测针测量, 精度  $\pm 0.1$  mm。三维流速采用声学多普勒点式流速仪(ADV)测量, 采样空间距离下视探头 5 cm, 探头对水流的影响较小, 水面下 5 cm 和近侧壁 3 cm 内为不可测区域。利用 ADV 流速测量频率选择 100 Hz, 采样时间为 60 s, 每个测点可以得到 6 000 对瞬时流速值。为了降低探头移动对瞬时流速产生的影响, 提高采样数据可靠性, 对所测数据进行筛分处理, 选取满足平均信噪比大于 15、相关系数大于 85% 的值。同时, 由于外部环境影响, 水流中可能出现气泡、杂质等, 在时间序列中表现为毛刺, 利用速度阈值法换掉不在阈值内的数据, 最终筛选出用于分析计算的数据。

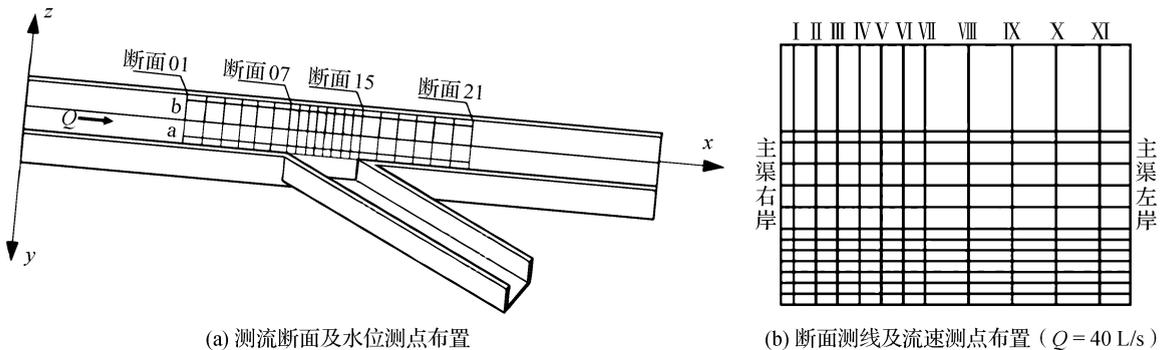


图 1 试验布置  
Fig. 1 Layout plan

# 2 结果分析

## 2.1 分水口区域水深沿程变化

图 2 给出了 4 种主渠道来流量下水深沿程分布。由图 2 可知, 分水口区域 a 处水深变化较大; 当水流靠近口门断面上唇时, 在侧向离心力作用下流线方向发生突变, 水流流速变大, 动能随之增加, 此时水流势能

减小,水深迅速减小,在断面07处产生最小值,之后随着主渠流量减少,水流动能减小,势能逐渐增加,分水口处开始缓慢壅水,在断面15处产生最大值。对比4种工况可知,主渠来流量为20~50 L/s时,分水口区域水深沿程变化规律基本一致,本文以来流量40 L/s为例,设距分水口120 cm处断面01、口门上唇断面07、中间断面11、下唇断面15为典型断面,对分水口区域环流强度及紊动特性进行分析。

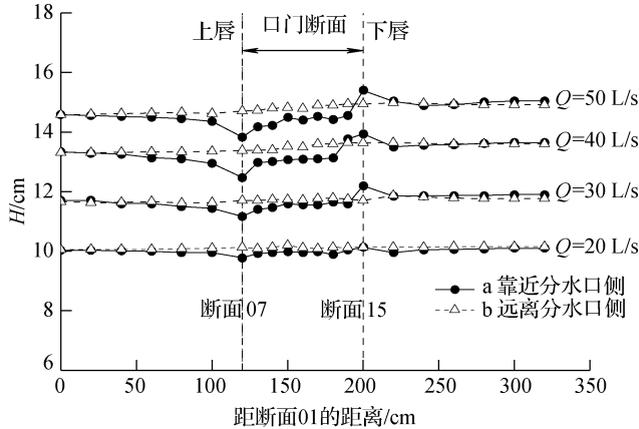


图2 主渠道水深沿程变化

Fig.2 Water surface change map in the main channel

## 2.2 时均流速分布规律

### 2.2.1 纵向流速与横向流速

主渠道纵向流速可以反映主要流动趋势,图3(a)给出了典型断面上4条特征垂线的纵向流速( $u$ )分布,垂线分别为靠近分水口侧的垂线I和IV、断面中间的垂线VIII、远离分水口侧的垂线XI( $z$ 为测点距主渠道底

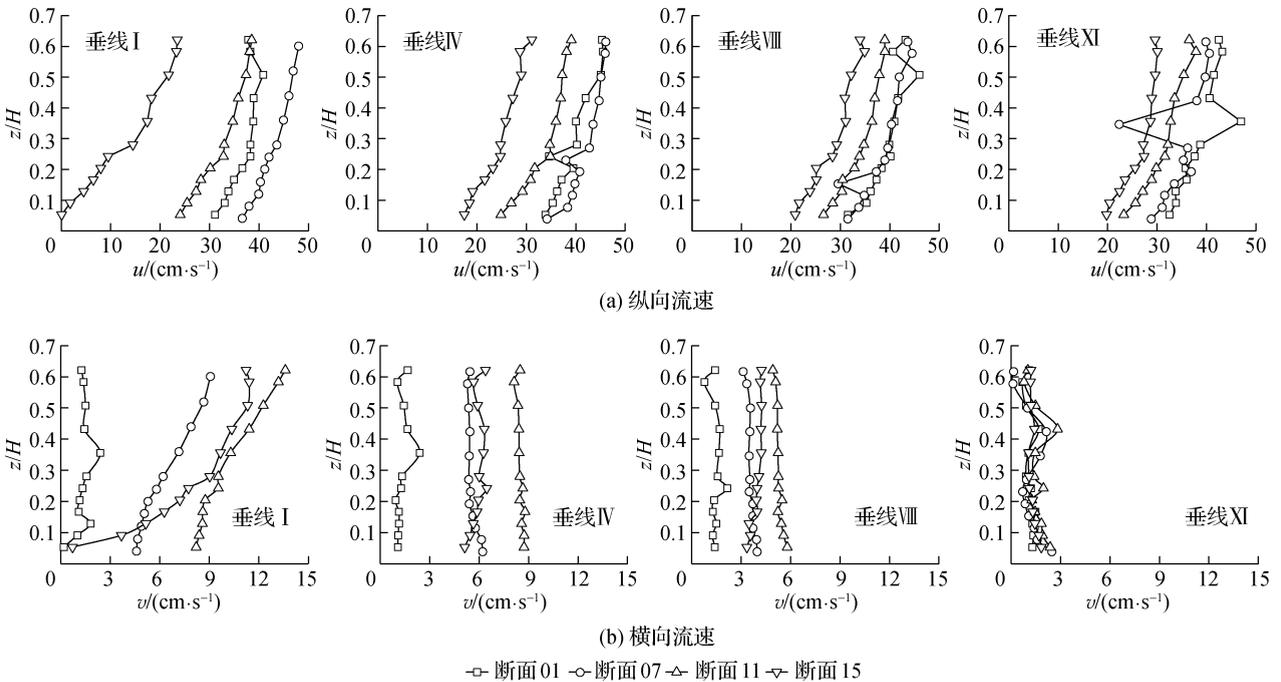


图3 典型断面垂线I、IV、VIII、XI流速分布

Fig.3 Velocity distribution of typical section vertical lines I, IV, VIII and XI

部的距离)。从图3(a)中可以看出, 各断面纵向流速基本符合对数型, 流速大小存在明显差异及沿程变化。由于分水口分流, 在口门附近主渠流量减小, 断面15的流速明显小于其他各断面。断面01在分水口上游较远位置(大于8倍水深)处, 纵向流速主要受渠底及两侧边壁影响, 中轴线区域流速明显大于近壁区流速, 在主流区域出现聚中现象; 分水口处各断面纵向流速最小值多位于近底层, 低于0.4倍水深流速变化较大, 这是因为高于侧渠底部高程水流所受边界条件发生突变, 上层水体对下层水体产生较大扰动, 近底区域水流纵向流速变化明显。

主渠道横向流速能够更好地看出分水口分流对流速方向的改变, 图3(b)给出了典型断面上4条特征垂线的横向流速( $v$ )分布。从图3(b)中可以看出, 断面01上横向流速较小且分布均匀, 这是因为此处水流远离分水口, 流线分布与顺直明渠类似。由于口门附近边界条件变化较大, 此处水流流向沿口门断面变化明显, 其中, 口门上下唇作为分流的起点和终点, 流向变化明显大于其他部分。靠近分水口处各断面垂线I上横向流速变化较大, 基本符合指数型, 上层水流横向流速明显大于下层, 结合图2可知, 此处水流参与分水, 水面波动较大, 流速大小和方向均发生明显变化。随着垂线远离分水口, 横向流速分布逐渐均匀, 在靠近主渠边壁处, 各断面横向流速趋于重合。

对比图3(a)和图3(b)发现, 分水角为30°时, 主渠道分水口处垂线纵向流速分布规律较为统一; 横向流速分布规律较为多变, 流速值沿渠宽方向变化较大。结合弯道水流结构可知, 横向流速变化是过流断面环流形成的主因, 分水口处横向流速大幅度改变亦会形成环流, 从而对泥沙颗粒的输移及边壁的稳定产生影响。

### 2.2.2 环流强度

明渠分水口处流速变化剧烈, 存在明显的高流速区和低流速区, 易产生类似天然河床的横向变形。环流强度是反映渠道冲刷和淤积趋势的重要指标, 可以用绝对强度、相对强度以及旋度来表示<sup>[17]</sup>。本文以环流旋度( $C$ , 横向分速与纵向分速的比值)来衡量环流强度大小, 图4给出了主渠道典型断面环流旋度等值线分布,  $B$ 为主渠道宽度。

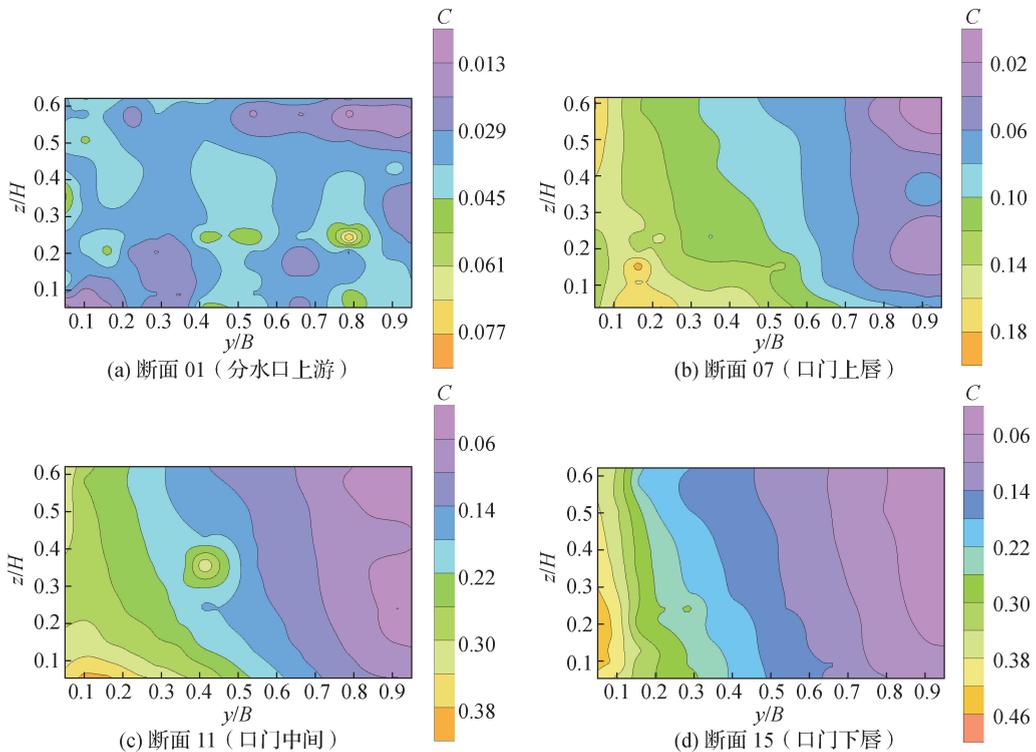


图4 主渠道典型断面环流旋度分布

Fig.4 Circulation curl distribution of typical sections in the main channel

由图4可知,断面01的环流旋度明显小于分水口处各断面,环流不易产生。主渠道分水口区域环流旋度分层较为明显,靠近口门处环流旋度明显大于远离口门处,这是因为该区域水流受侧向离心力影响较大,流线发生明显改变,流速沿 $y$ 方向变化较大。天然河道或多泥沙水源中主渠道分水口区域含有大量泥沙,而环流是引起泥沙颗粒横向运移的主要动力,在环流作用下,靠近口门处泥沙向另一侧发生转移会形成明显的冲刷、淤积效果。对于 $30^\circ$ 分水角明渠,水流刚到分水口时,环流强度分布虽层次明显但值不大,此处环流并未完全发展,将不会产生明显的冲淤现象;随着水流流动,环流强度逐渐增大,环流充分发展,断面15

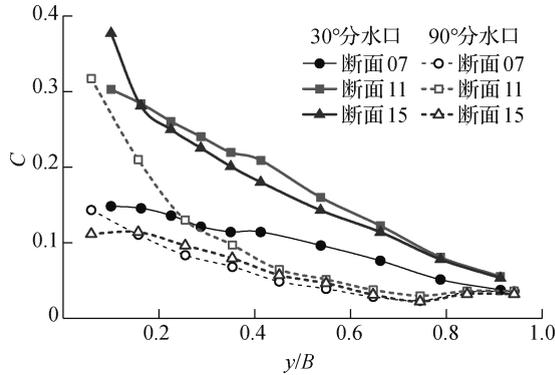


图5 垂线平均环流旋度分布

Fig.5 Circulation curl distribution of typical sections

上环流旋度梯度沿渠宽方向变化最大,泥沙颗粒横向移动范围较大,将会引起较明显的冲淤现象。

结合已有直角分水口研究<sup>[18]</sup>,图5给出了2种分水角度下各断面垂线平均环流旋度分布。由图5可知,各断面垂线平均环流旋度在靠近口门侧出现最大值,随着垂线远离口门,环流旋度值逐渐减小,在靠近主渠边壁处趋于重合。分水角为 $90^\circ$ 时,环流在主渠道分水口经历了增强、减弱2个阶段,中间区域环流现象明显;分水角为 $30^\circ$ 时,主渠水流从分水口进口端流向中间区域时,环流充分发展并持续到出口端。灌区渠系中含有大量泥沙,分水口处横向环流存在时,上层水体中较细的悬移质泥沙颗粒易被带入侧渠道,床沙颗粒在近底水流作用下逐渐远离口门。综上所述,与直角分水口相比,

$30^\circ$ 分水口处环流强度较大,环流效应相对明显,横向环流与纵向水流叠加形成的螺旋流影响范围较大,较多的泥沙颗粒随水流流向主渠下游,侧渠道输沙量相对较少,与Alomari等<sup>[19]</sup>研究结果一致。

## 2.3 脉动流速分布规律

### 2.3.1 紊动强度

紊动强度是水流紊动性能的基本参数,代表瞬时流速的波动幅度,常用脉动流速的均方根表示:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}{N}} \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{N}} \quad \sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}{N}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$ 分别为纵向、横向、垂向的紊动强度,cm/s; $u_i$ 、 $v_i$ 、 $w_i$ 分别为纵向、横向、垂向的瞬时流速,cm/s; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ 分别为纵向、横向、垂向的时均流速,cm/s; $N$ 为样本数量。

图6为各典型断面上垂线I、IV、VIII、XI的紊动强度分布图。由图6可知,远离分水口处主渠水流紊动强度分布表现为核心区域小、边壁区域大;近壁水流流动时受壁面切应力影响较大,产生较大流速梯度,紊动强度大;远离边壁区域水流受黏滞力影响较大,紊动被抑制,越靠近中轴线区域紊动强度越小;分水口处纵向和横向紊动强度明显大于垂向紊动强度;各断面垂线上纵向和垂向紊动强度变化规律类似,沿水深方向分布均匀,无明显最大值点(断面07除外);横向紊动强度沿水深方向变化较多,分布较为紊乱。对比图6各分图发现,断面07、断面15作为分水的起点和终点,紊动强度值和分布规律变化较大。图7给出了这2个断面上垂线平均紊动强度分布,其中 $\sigma_j(j=u, v, w)$ 为3个方向的紊动强度。

由图7可知,断面15上各方向垂线平均紊动强度沿渠宽方向变化规律一致,最大值出现在靠近口门下层处,随着垂线远离口门,平均紊动强度迅速减小,在 $0.2B$ 之后基本保持不变。断面07上纵向、垂向垂线平均紊动强度分布规律类似,靠近口门区域出现2次极大值;横向垂线平均紊动强度沿渠宽方向波动不大,最大值出现在远离口门侧。这是因为主渠水流流经分水口时,口门侧低于侧渠底部高程水流参与分水,与主渠边壁发生激烈碰撞,流速大小、方向变化较大,易形成不同尺度的漩涡,在二次流作用下,小尺度漩涡不断旋转、叠加,造成靠近口门侧水流紊动强度变化剧烈且分布无规律。

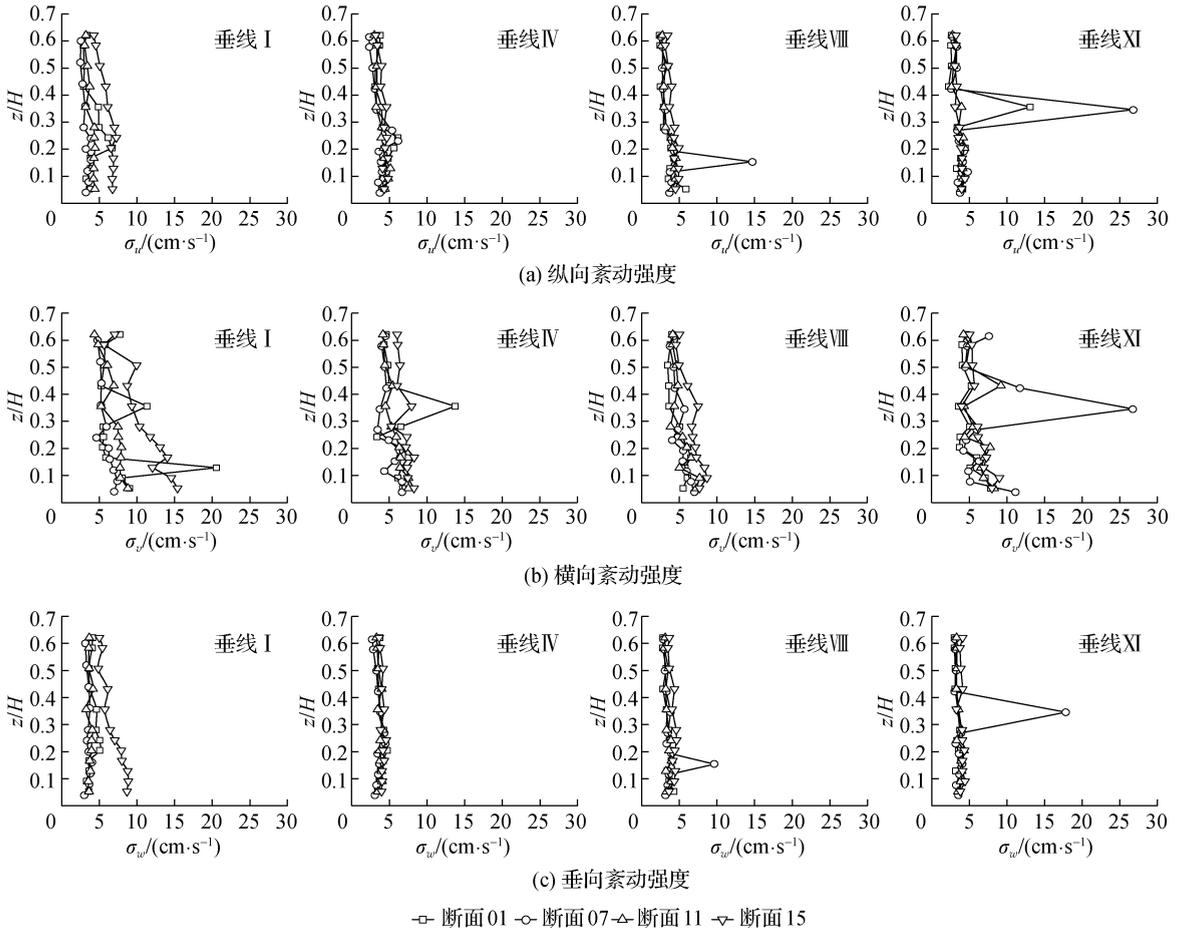


图6 典型断面各垂线紊动强度分布

Fig. 6 Turbulent intensity distribution of typical sections

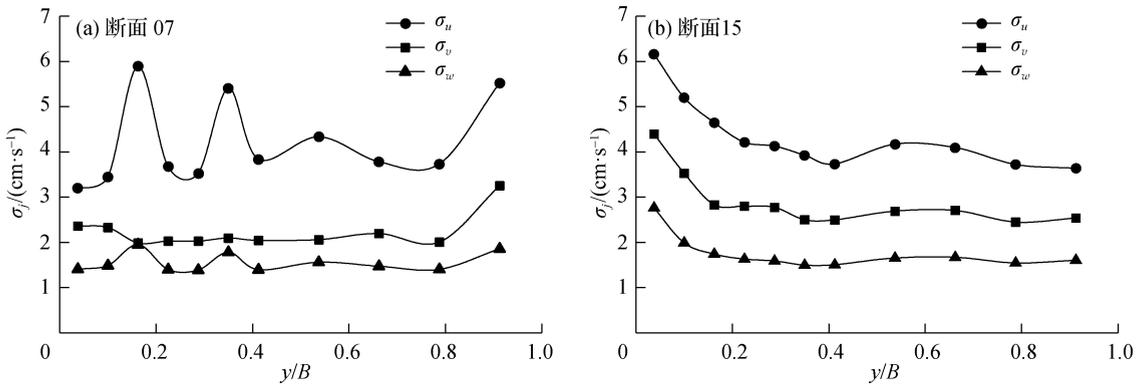


图7 断面07、断面15的垂线平均紊动强度分布

Fig. 7 Average turbulent intensity distribution of vertical lines in sections 07 and 15

### 2.3.2 紊动能

紊动能是表征水流整体紊动状况的物理量, 为物质输移及能量传递提供支持, 表达式为

$$T = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2 \quad (2)$$

式中:  $T$  为紊动能,  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ;  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  分别为纵向、横向和垂向上的脉动流速,  $\text{cm}/\text{s}$ 。

图8为主渠道典型断面紊动能分布,由图8(a)可知,分水口上游断面紊动能沿渠宽方向对称分布,较大值出现在 $0.3H$ 以下两侧边壁及渠底中轴线附近。这是由于固液交界处水流紊动切应力较大,产生较大紊动能,且易生成不同尺度的漩涡,漩涡在向上和向中轴线移动及混掺过程中会伴随能量的转移和耗散,最终导致上层水体( $>0.3H$ )紊动能较小。分水口处水流紊动扩散速率和方向是改变紊动能分布的主要因素,对比图8(b)、8(c)、8(d)发现,口门上唇断面边壁条件发生突变,水流向侧渠方向发生偏转,水体漩涡亦随之向口门侧转移,靠进口门区域水流波动较大,则紊动能较大;口门中间断面紊动能较大值( $T > 15$ )分布广,多处出现极大值,结合前文研究内容可知,此处环流充分发展,在侧向离心力和水压力共同作用下,上层水体流向侧渠,下层水体流向主渠左岸,导致水流紊动扩散速率较快;口门下唇断面紊动能较大值分布集中,最大值出现在 $0.1B$ 附近,这是由于主渠右岸边壁切应力突然增大,水流紊动加剧,各尺寸漩涡发生剧烈碰撞,水头损失增加,故紊动能较大。

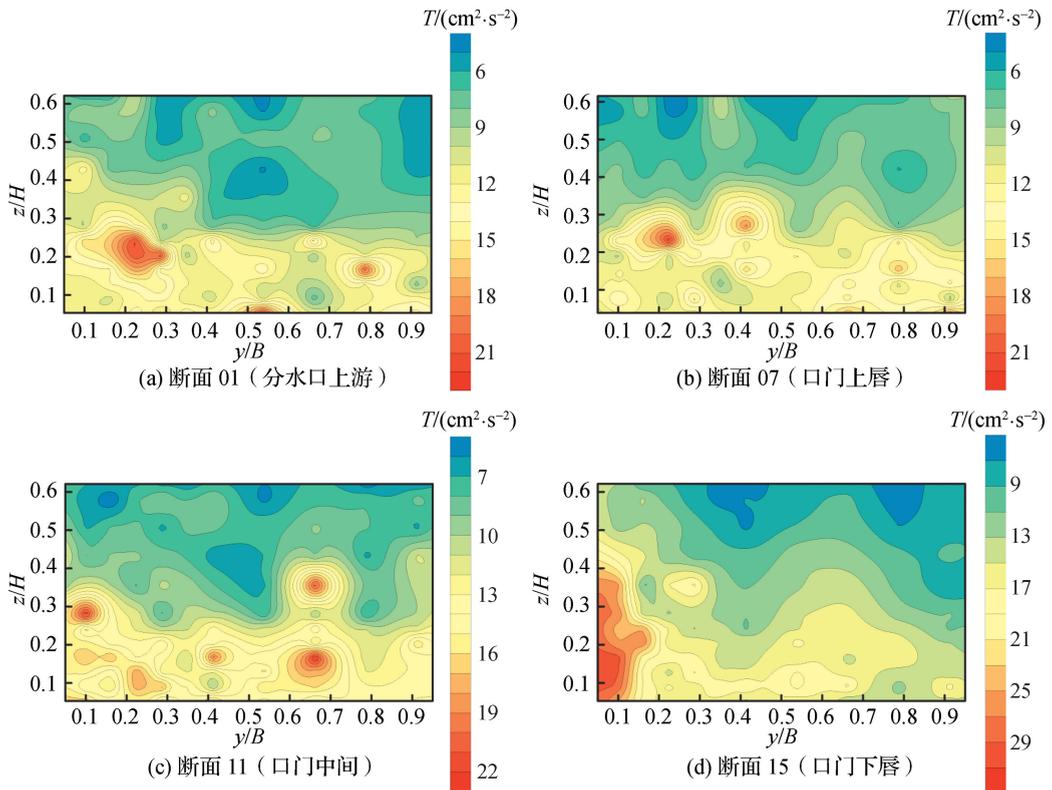


图8 主渠道典型断面紊动能分布

Fig.8 Turbulent kinetic energy distribution of typical sections

由图8可以看出,分水角为 $30^\circ$ 时,口门下唇断面紊动能较大且分布规律明显与其他断面不同,说明紊流结构在口门中间断面至下唇断面区域变化较大,与环流强度分布、大小密切相关。灌区常见的直角分水口,紊动能最大值出现在口门上唇断面,口门下唇断面紊动能较小<sup>[18]</sup>,这是因为分水角为 $90^\circ$ 时,主渠水流进入侧渠后形成的回流区域较大,侧渠有效进水宽度较小,口门上唇断面水流流速大小及方向变化较多,紊动剧烈,下唇断面水深较大,水流动能多转化为势能,紊动不明显。相比于直角分水口, $30^\circ$ 分水口过流能力较强,流线更加平顺,紊动扩散速率相对较小,边壁侵蚀速率较慢,渠道维护所需人力物力成本相应减少。

## 2.4 床面剪切应力

床面剪切应力是连接水流特征和动床冲刷的一个重要参数,可以一定程度预测动床冲刷规律。当近底水流所产生的剪切应力大于Shields剪切应力后,床面就会产生相应反应<sup>[20]</sup>。主渠分水口区域水流结构复杂,床面剪切应力变化与水流流速及紊动参数变化相互影响,导致无法准确获得床面剪切应力值。常见的床面剪

切应力求解方法包括平均切应力法、对数率估测法、流速二次法、雷诺切应力法、紊动能法和修正紊动能法, 因各方法适用条件限制, 本文选择后3种方法计算床面剪切应力, 并通过对比分析选出合适的计算方法。图9为主渠道分水口附近床面剪切应力分布, 对 $x$ 轴、 $y$ 轴坐标分别进行量纲一化处理, 设口门上唇处为零点(0,0), 相对口门长度为1,  $X^*$ 、 $Y^*$ 为相对长度。

$\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$ 分别为3种计算方法下的床面剪切应力值<sup>[21]</sup>。

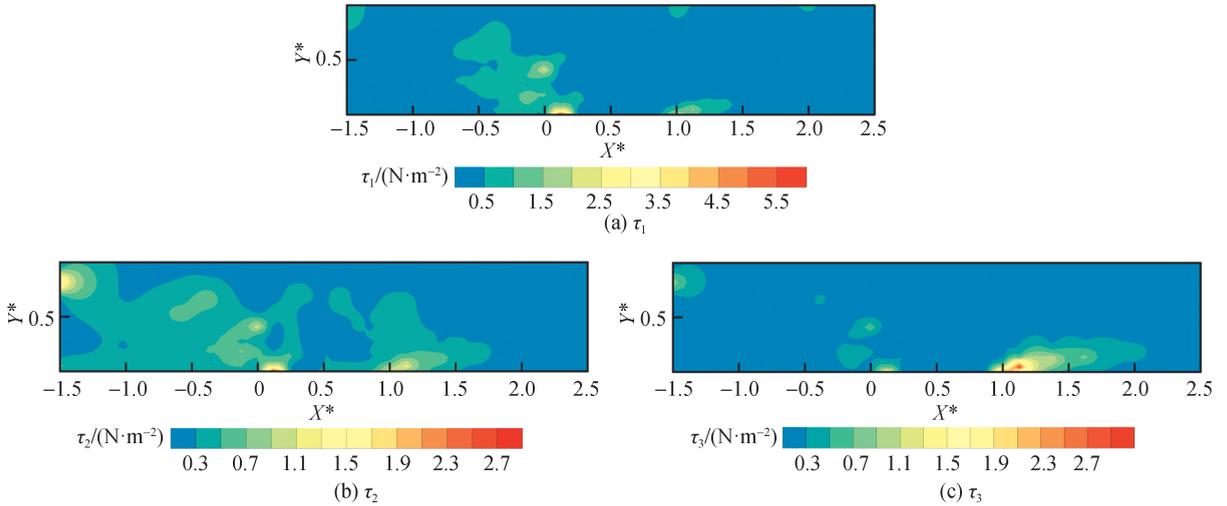


图9 主渠道分水口附近床面剪切应力

Fig. 9 Shear stress on the bed surface near the water diversion outlet of the main channel

由图9可知, 利用雷诺切应力法和紊动能法求得的床面剪切应力值 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 明显大于修正紊动能法的计算值 $\tau_3$ , 这是因为相比于纵向和横向脉动流速, 垂向脉动流速值较小。3种方法下床面剪切应力分布规律不一致, 对于 $\tau_1$ , 较大值集中分布在分水口上游靠近口门上唇区域;  $\tau_2$ 极大值出现位置与 $\tau_1$ 一致, 但较大值分布面积广;  $\tau_3$ 较大值分布面积最小且集中在分水口下游靠近口门下唇区域。结合环流强度分布规律可知, 主渠分水口出口断面横向流速梯度最大, 靠近口门侧冲刷严重, 床面剪切应力值最大, 因此 $\tau_3$ 的分布规律更加符合实际, 建议利用修正紊动能法计算分水口附近床面剪切应力。由 $\tau_3$ 的分布规律可知, 分水角为30°时, 分水口上游床面剪切应力较小, 渠底不易发生冲刷, 泥沙颗粒不易起动, 可以有效防止沉积于渠底的泥沙被水流带入侧渠道, 对分水口取水防沙效果起到积极作用。

### 3 结 论

为了探索非直角分水口区域水流紊动特性, 以30°分水角明渠为研究对象, 通过多断面多垂线三维瞬时流速观测试验, 分析了分水口附近明渠水流紊动特性, 主要得到以下结论:

(1) 分流使主渠局部水深发生变化, 主渠来流量为20~50 L/s时, 分水口附近水面波动规律基本一致, 远离口门侧水深波动较小, 靠近口门侧水深波动较大, 在分水口上游、下游断面出现最小值和最大值, 波动幅度随主渠来流量增加而增大。

(2) 对于30°分水口, 主渠断面上横向流速值和分布规律变化较大, 形成较大环流区域, 易引起局部泥沙颗粒冲刷或淤积; 30°分水口的环流效应明显大于90°分水口, 更多的泥沙颗粒在水流作用下逐渐远离口门, 流向主渠下游。

(3) 主渠道分水口区域纵向和横向紊动强度值明显大于垂向紊动强度, 进口断面紊动强度较出口断面分布紊乱, 最大值出现在远离口门侧; 紊动能较大值多分布于0.3倍水深以下, 最大值靠近口门下唇; 30°分

水口与直角分水口相比紊动扩散速率小, 边壁侵蚀速相对较慢。

(4) 修正紊动能法求解分水口附近床面剪切应力比较精确; 分水角为  $30^\circ$ , 床面剪切应力较大值多分布于口门下唇附近, 分水口上游床面剪切应力值较小且分布均匀, 渠底泥沙颗粒不易随水流运动, 侧渠道输沙量相应减小, 分水口防沙效果较好。

本试验对清水条件下分水口区域水流紊动特性进行研究, 忽略了多泥沙水源中泥沙颗粒与水流之间的相互作用, 还需进一步研究含沙量及泥沙颗粒级配对分水口水流紊动的影响。

#### 参考文献:

- [1] 罗优, 简鸿福, 罗琳, 等. 多沙河流河口泥沙淤积自生性过程试验研究[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 348-356. (LUO Y, JIAN H F, LUO L, et al. An experimental study of autogenic processes in river deltas with a high sediment load/water ratio [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 348-356. (in Chinese))
- [2] 张芳芳, 张耀哲, 粟晓玲. 灌渠闭闸期间闸前段流场特征及泥沙淤积速率分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 111-118. (ZHANG F F, ZHANG Y Z, SU X L. Analysis of flow field characteristics and sediment deposition rate in irrigation canal in front of sluice during gate closing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 111-118. (in Chinese))
- [3] 假冬冬, 陈诚, 牛晨曦, 等. 岸滩侧蚀崩塌速率的试验量测方法[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 537-542. (JIA D D, CHEN C, NIU C X, et al. Study on the experimental method to measure the lateral erosion rate of riverbanks[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 537-542. (in Chinese))
- [4] 张幸农, 牛晨曦, 假冬冬, 等. 流滑型窝崩水流结构特征及其变化规律[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 112-119. (ZHANG X N, NIU C X, JIA D D, et al. Flow structure characteristics and changes in a simulated riverbank nest-shaped flow slide[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(1): 112-119. (in Chinese))
- [5] KURDISTANI S M, PAGLIARA S. Experimental study on cross-vane scour morphology in curved horizontal channels[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017, 143(7): 04017013.
- [6] 熊海滨, 孙昭华, 李明, 等. 清水冲刷条件下长江中游沙卵石河段局部卵石淤积成因[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 524-534. (XIONG H B, SUN Z H, LI M, et al. Causes of local gravel deposition in gravel-sand transition of the Middle Yangtze River under clear water scour[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 524-534. (in Chinese))
- [7] YARAHMADI M B, BEIESTARN M S, PAGLIARA S. An experimental study on the secondary flows and bed shear stress at a 90-degree mild bend with and without triangular vanes[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2020, 33(10): 1-9.
- [8] NIKFAR M, HOJJAT A A, TAHERSHAMSI A. An experimental study of mobile boundary transitions in alluvial canals[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2022, 148(1): 04021064.
- [9] ASNAASHARI A, AKHTARI A A, DEGHANI A A, et al. Experimental and numerical investigation of the flow field in the gradual transition of rectangular to trapezoidal open channels[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016, 10(1): 272-282.
- [10] 王文娥, 廖伟, 漆力健. 宽窄相间河道水流紊动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 394-403. (WANG W E, LIAO W, QI L J. Experiment of turbulent characteristics of flow in wide-and-narrow channels[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 394-403. (in Chinese))
- [11] SINGHA A, BALACHANDAR R. Structure of wake of a sharp-edged bluff body in a shallow channel flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(2): 233-249.
- [12] YAN X H, RENNIE C D, MOHAMMADIAN A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 20(6): 1491-1510.
- [13] 何建波. 弯道水流结构及其紊流特性的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (HE J B. Experimental study on the flow structure and turbulent characteristics in open-channel bends[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))
- [14] HACKNEY C, BEST J, LEYLAND J, et al. Modulation of outer bank erosion by slump blocks: disentangling the protective and destructive role of failed material on the three-dimensional flow structure[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10663-10670.

- [15] JAMIESON E C, RENNIE C D, TOWNSEND R D. Turbulence and vorticity in a laboratory channel bend at equilibrium clear-water scour with and without stream barbs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(3): 259-268.
- [16] 程满金. 内蒙古河套灌区渠道衬砌和渠系建筑物设计图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (CHENG M J. Design atlas of canal lining and canal buildings in hetao irrigation district, Inner Mongolia [M]. Beijing: China Water Power Press, 2015. (in Chinese))
- [17] 吴岩. 弯道水流结构及泥沙输移过程研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (WU Y. Study on flow structure and sediment transport processes of the bend river[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [18] 王文娥, 刘海强, 胡笑涛. 侧渠底高对分水口水力特性影响数值模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 60-68. (WANG W E, LIU H Q, HU X T. Numerical simulation of influence of side channel bottom height on hydraulic performance of bleeder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 60-68. (in Chinese))
- [19] ALOMARI N K, YUSUF B, MOHAMMAD T A, et al. Influence of diversion angle on water and sediment flow into diversion channel[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(6): 600-608.
- [20] 高术仙, 徐海珏, 白玉川. 近临界弯曲比率水槽水流与近床剪应力特性[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(7): 717-724. (GAO S X, XU H J, BAI Y C. Characteristic of flow structures and bed shear stress with near-critical curvature ratio in a bend flume[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(7): 717-724. (in Chinese))
- [21] VAGHEFI M, AKBARI M, FIOUZ A R. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: secondary flow and bed shear stress[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(4): 1582-1593.

## Experimental study on turbulent characteristics of open channel flow at 30° diversion angle\*

CHENG Yong, WANG Wene, HU Mingyu, LING Gang, HU Xiaotao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The main and branch channels are positioned vertically in irrigated areas, and damage occurs at the side wall structure near the bleeder, owing to scouring and deposition of sediment particles. The divergence and confluence angles of natural rivers typically acute. In this paper, the open channel at a 30° water separation angle was used as the research object. The three-dimensional instantaneous velocity was measured using an acoustic Doppler velocimeter, and the distribution of the average velocity, circulation intensity, turbulence intensity, turbulence kinetic energy and bed shear stress at typical cross-sections were analyzed. The experimental results showed that for the 30° water separation angle, the lateral velocity of the water flow at the water outlet varied significantly along the canal width, and easily formed circulations, causing local erosion and deposition. The turbulent intensity near the branch channel changed sharply and irregularly, and the maximum value was observed at the forefront section of the bleeder. The kinetic energy of the lower flow significantly exceeded that of the upper flow at the water outlet, and the higher value was mostly concentrated near the water inlet of the side channel. The bed shear stress at the end of the water diversion section of the main channel was high, eroding the side wall and reducing stability. Compared to the right bleeder, the 30° water separation angle adversely caused the sediment particles to enter the side channel and decreased the erosion rate of the water flow to the bottom and side walls of the channel. This study provides a reference for channel design and operation in irrigation areas.

**Key words:** bleeder; circulation intensity; turbulence intensity; turbulent kinetic energy; bed shear stress

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52079113) and Shaanxi Province Water Conservancy Science and Technology Project, China (No. 2021slkj-8).