

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

非淹没刚性挺水植被对弯道水流特性的影响

赵瑜琪, 彭清娥, 史学伟, 杨克君

Influence of non-submerged rigid vegetation on the flow characteristics of bend

ZHAO Yuqi, PENG Qing'e, SHI Xuewei, YANG Kejun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20200829002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等宽明渠交汇口流速分布特性数值模拟

Numerical investigation on distribution characteristics of velocities at equal-width open-channel confluences

水利水运工程学报. 2020(1): 32 <https://doi.org/10.12170/20190501005>

大尺度散粒体周围水流结构试验研究

Flow structures around large-scale artificial roughness elements

水利水运工程学报. 2019(1): 67 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.009>

非淹没双直立圆柱系统波浪爬升的数值模拟

Numerical analysis of wave run-up characteristics on dual non-submerged vertical cylinders system

水利水运工程学报. 2020(6): 42 <https://doi.org/10.12170/20191018004>

水力坡度对淹没单丁坝近区水流结构的影响

Influences of different hydraulic gradients on flow structures near submerged spur dike

水利水运工程学报. 2017(2): 75 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.010>

植被联合植筋带护坡水力特性模型试验

Model test on hydraulic characteristics of soil slopes with geotextile belts and vegetation

水利水运工程学报. 2021(3): 136 <https://doi.org/10.12170/20200830005>

梅花形阵列粗糙床面明渠紊流特性

Turbulence characteristics in open channel with glass-sphere quincunx arrays

水利水运工程学报. 2020(6): 1 <https://doi.org/10.12170/20191026002>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20200829002

赵瑜琪, 彭清娥, 史学伟, 等. 非淹没刚性挺水植被对弯道水流特性的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 80-88. (ZHAO Yuqi, PENG Qing'e, SHI Xuewei, et al. Influence of non-submerged rigid vegetation on the flow characteristics of bend[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 80-88. (in Chinese))

非淹没刚性挺水植被对弯道水流特性的影响

赵瑜琪, 彭清娥, 史学伟, 杨克君

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 广泛分布于天然河道浅滩的植被能够改变河流局部的水力特性和泥沙运移过程, 为了解植被对弯道水流特性的影响, 针对特定流量下凸岸侧含有刚性挺水植被的弯道, 对植被密度、位置不同时水流特性的沿程分布规律开展试验探究。通过建立弯道水流概化模型, 利用 ADV 采集三维流速数据, 对比无植被和有植被(植被密度分别为 0、2.2% 和 4.5%)条件下的流速分布, 定性分析不同工况下植被对弯道水流紊动特性的作用, 确定弯道环流的结构及强度。结果表明, 凸岸侧植被的存在(在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 弯段, 1/4 河宽区间内均匀分布)能有效削弱弯道环流强度, 但对凸岸区的消减效果并不随植被密度的增大而加强。非植被区上下不同流向水层的分界点位置随植被密度变化而变化, 且植被分布对弯道各断面不同水深处的环流结构也有影响。

关 键 词: 刚性植被; 弯曲河道; 速度分布; 横向环流; 紊动特性

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)06-0080-09

弯曲河道的水动力特性和水生植被的阻水作用是当前河流动力学研究的热点问题, 在弯道的水面横比降^[1-2]及流速重分布^[3-4]等方向已取得一定成果, 对植被阻力的分析主要从水流雷诺数^[5]、能坡^[6]和植被特性参数^[7-10]等层面展开。目前, 国内外关于弯道水沙运动的研究较少考虑到植被作用, 而含植被水流的研究大多聚焦于顺直河道。弯曲型河段作为冲积河流中常见的河型, 由于“凹冲凸淤”的演变特征, 其凸岸侧更易生长植被, 含植被河道不仅受边界黏性剪切力的作用, 还因植被形态阻力而产生局部流速亏损^[11], 如改变淹没植被的属性与排列方式均对河道糙率系数有一定影响^[12]。因此, 将植被因素加入河流动力及生态学研究具有重要的科学与实践价值。

本文利用 90° 弯道水槽概化模型模拟天然河道, 通过试验获取典型断面水深和三维流速数据, 探讨当弯道凸岸侧布设刚性非淹没植被时, 不同密度和生长位置下各断面的环流沿程分布规律(环流结构及环流强度)。研究旨在明确植株“群体效应”对弯道水流特性的改变, 理解水体中营养成分、污染物及泥沙的输运方式, 为预测含植被弯道水流的流速分布、环流特性及河道治理等提供理论依据。

1 试验模型及方案设计

1.1 试验弯道水槽

试验模型采用 90° 弯道水槽系统, 平面布置如图 1 所示, 水槽上游设有水泵、储水池、三角测量堰、静水池和消能栅。上游顺直段长 10.5 m, 确保水流进入弯道区域前形成稳定状态, 下游顺直段长 6.5 m, 水槽宽为 0.6 m, 试验段内径为 1.2 m, 外径为 1.8 m, 水槽高为 0.8 m, 全程固定坡度为 5%, 尾门开度可以通过调节螺旋尾门手动控制。

收稿日期: 2020-08-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407302); 国家自然科学基金资助项目(51539007)

作者简介: 赵瑜琪(1995—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: 1085169272@qq.com 通信作者: 彭清娥(E-mail: Pengqinge@scu.edu.cn)

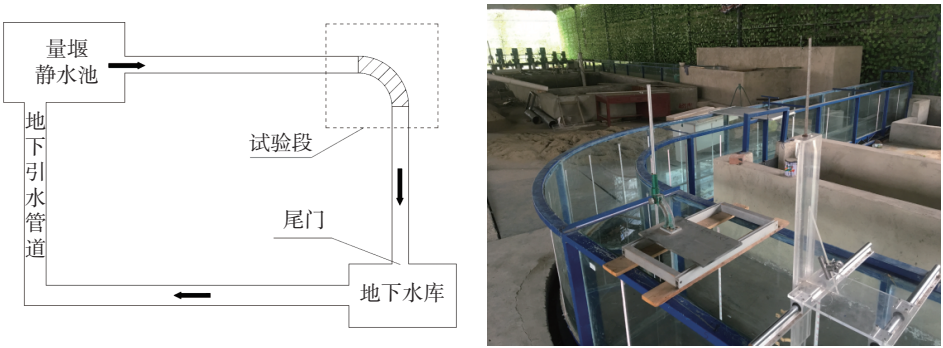


图 1 90°弯道水槽布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 90° curved flume

水槽上安装有流速仪支架和测针架, 支架在横向设有滑轨, 纵向安装有滑动螺丝, 该设计可以在两个方向上满足流速仪的自由精确移动, 满足不同测点的测量要求。试验选用挪威 Nortek AS 公司生产的多普勒声速三维剖面流速仪, 数据采样频率为 100 Hz, 经预试验分析发现, 将测量时间控制在 60~90 s 内所采集的数据可信度更高。流速仪的采样区位于探头下方 4~7 cm 处, 可以消除探头对水流的影响。原始数据采用文献 [13] 的方法进行处理, 当同时满足相关性大于 70 且信噪比在 15 以上时即可记录保存, 并利用 MATLAB 程序将测得的瞬时速度转换为时均流速。

1.2 试验方案

试验将植被布设在凸岸侧 0°~90°区间内, 植被段宽度设计为河道宽度的 1/4。单株模型植被选用均匀圆柱形 PVC 签, 直径 4 mm, 长度 30 cm, 按照设计密度布置于带有预留孔的 PVC 板中, 该板由上游至下游紧密衔接, 确保床底糙率一致。具体布设情况见图 2。

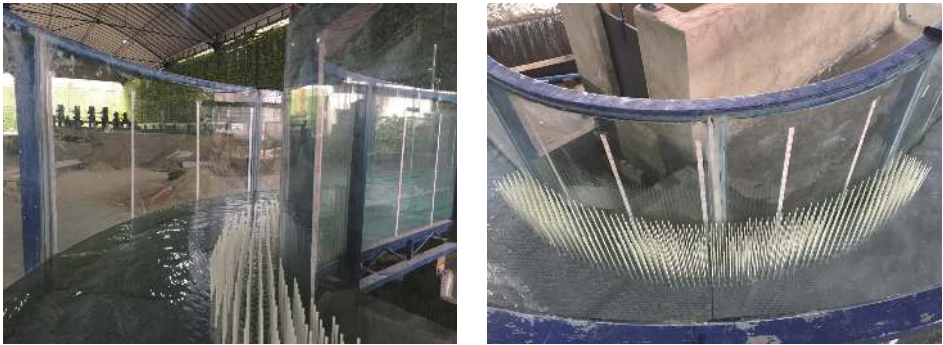


图 2 植被模型布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vegetation layout

研究采用植被密度为 2.2% 和 4.5% 代表稀疏和茂密情况, 密度计算方法为单株模型植被的底面积乘以总株数与植被群布设区域总面积的比值。在系列试验中, 采取控制变量法, 以距离试验段上游 3.5 m 处为控制水位断面, 通过调节尾门开度将水位控制在 20 cm。

试验将植被密度及分布位置(长度)作为主要变量, 设计工况见表 1。

试验段上游到下游一共设有 13 个测量断面 (CS1~CS13), 其中对 0°~90°弯道段上 CS5~CS11 之

表 1 定床工况

Tab. 1 Summary of design conditions

工况序号	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	H/m	$\rho/\%$	位置分布/ $^{\circ}$
A1	0.035	0.20	0	0~90
A2	0.035	0.20	2.2	0~90
A3	0.035	0.20	4.5	0~90
B1	0.035	0.20	2.2	0~30
B2	0.035	0.20	2.2	0~60
B3(A2)	0.035	0.20	2.2	0~90

间的 7 个断面, 分别以 D0、D15、D30、D45、D60、D75 和 D90 标记。每个断面设置有 11 条测线, 测线间隔为 5 cm, 垂线序号由凸岸向凹岸递增, 断面和测线的布置示意图如图 3 所示。

2 弯道植被作用下水流特性

张红武等^[14]采用反证法从理论上证明了弯道中出现横向环流的必然性, 且根据环流产生机制分析, 其在河汊、分水口附近及支流入汇处都会存在, 对河道物质运输、调整动量平衡等具有重要作用。研究以无植被作用下的弯道水流为参照, 对比分析在不同植被密度、分布条件下弯道环流的位置、强度及规模等水流特性。

2.1 不同植被密度

2.1.1 环流结构沿程分布 图 4 是流量为 0.035 m³/s, 植被密度分别为 0、2.2%、4.5% 三种工况下各断面横向环流沿程分布(z/H 为相对水深), D45~D75 断面间的环流结构分布较相似, 故以 D60 断面作为代表断面分析。

水流入弯道后环流逐渐发展, 无植被条件下的环流沿程分布见图 4(a1)~(e1), 可见, 在 D0 断面处流线已经发生微弯, 初步判断可能是受弯道水流作用及水槽边壁的阻碍作用形成了折冲水流^[15]。D15 断面前横向环流尚未完全成型, 而 D30 断面环流结构已经非常明显, 此时环流中心位于 $z/H=0.2\sim0.3$ 区间。到 D45 断面时, 横向流速进一步增大, 环流中心靠近凸岸侧。至弯道出口断面(D90), 环流范围与横向流速均有所减小, 但因水流惯性作用, 环流在弯道下游一定范围内仍存在影响。试验中也发现水流过弯顶后环流会出现分层结构, 在 D75 和 D90 断面发现了这种趋势, 即在表层出现与主环流方向相反的次生环流, 次生环流的位置应该在凹岸上部。因此, 弯道水流在运动过程中会出现双涡二次流, 试验中主环流即大尺度涡中心位于凸岸底部, 次生环流即小尺度涡位于凹岸表面, 双涡二次流方向相反且尺度沿程变化。

由图 4 可知, 植被的存在使横向环流发生的位置偏向非植被区, 且高密度($\rho=4.5\%$)植被下的环流区域较低密度植被($\rho=2.2\%$)更大。同时, 凹岸侧底部水流的横向流速明显大于上部横向流速, 环流中心位于非植被区 $z/H=0.2$ 水深位置。在弯道前端($0^\circ\sim30^\circ$ 区间)未发现环流, 且无植被工况下观察到的次生环流在植被作用下也未出现, 这表明植被会削弱环流的规模, 改变其结构及形成位置, 但弯道环流并没有随着植被密度的增大而消减。

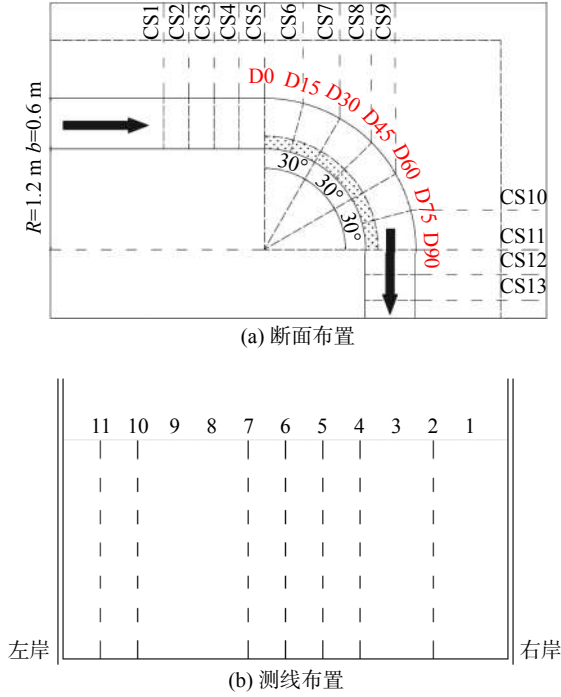
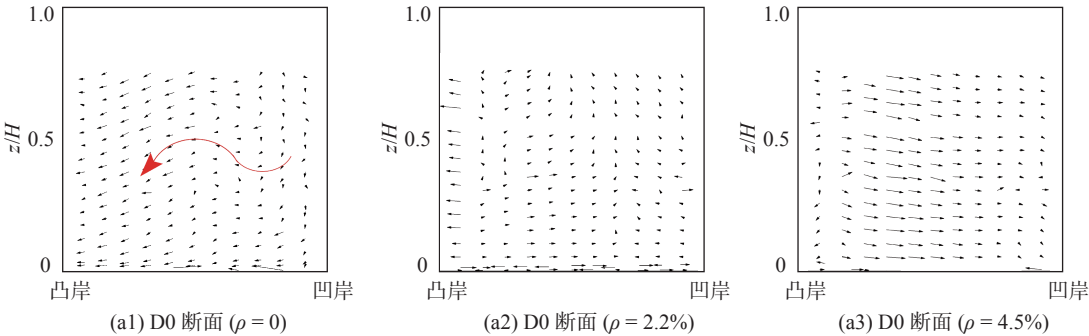


图 3 试验断面及测线布置

Fig. 3 Schematic diagram of test section and line arrangement



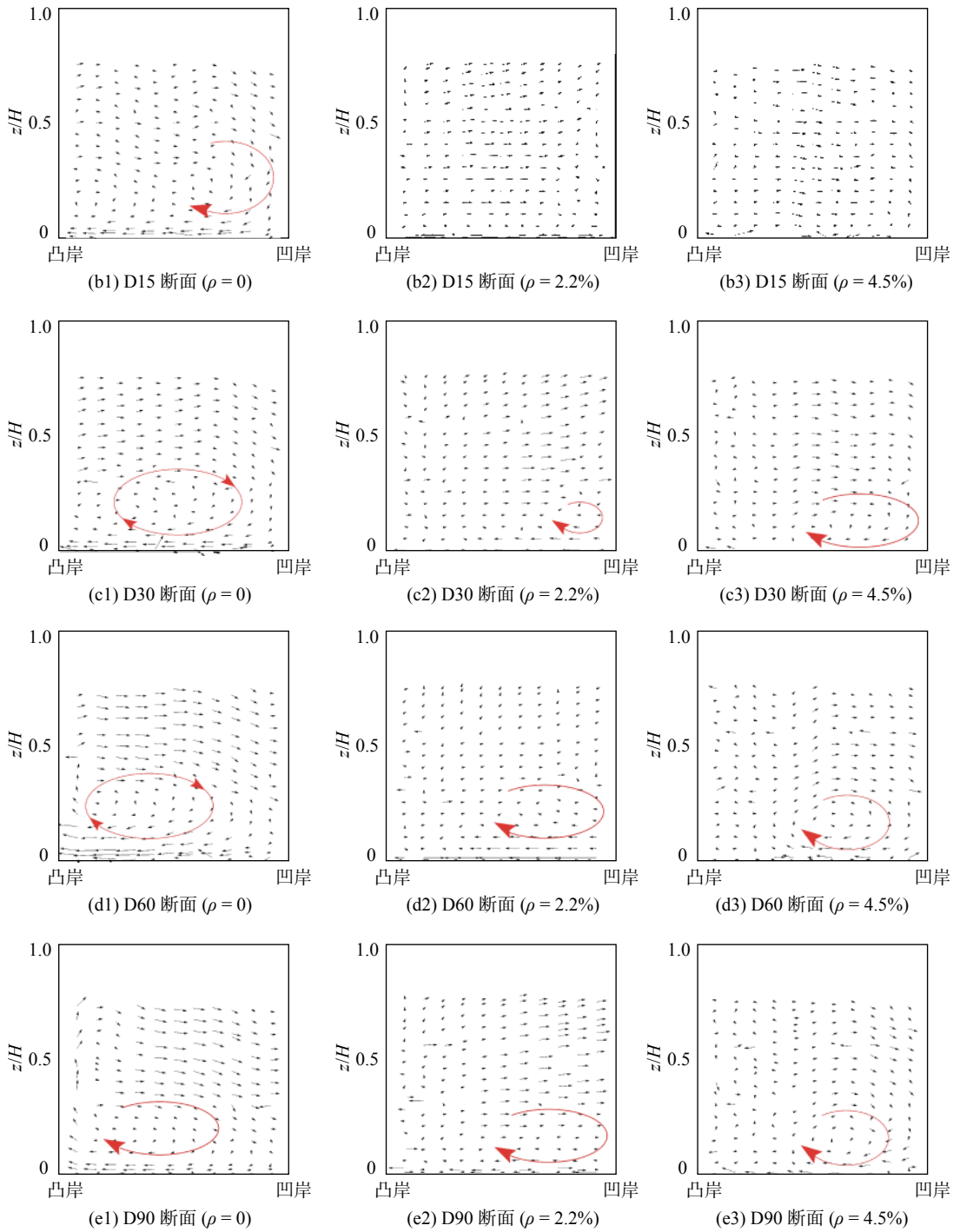


图 4 不同密度植被作用下断面横向环流分布

Fig. 4 Transverse circulation distribution under different densities of vegetation

2.1.2 环流强度沿程分布 环流强度沿程分布较为复杂,与纵向流速、河弯半径及水深等因素有关,本文采用环流旋度(横向流速 v /纵向流速 u)作为衡量横向环流强度的标准,不同密度植被作用下沿程各断面环流旋度分布如图 5 所示。剖取 $z/H=0.1$ 、 $z/H=0.3$ 、 $z/H=0.5$ 和 $z/H=0.7$ 四个流层平面,试验中每个断面选取 5 条测线代表凸岸区($x=0.17B\sim0.33B$)、中心区($x=0.50B$)和凹岸区($x=0.67B\sim0.83B$)。

由图 5 可知,无植被条件下在弯道前半段(D0~D45),凹岸侧底层水流的环流强度要明显高于上层,而上部水流($z/H>0.5$)的沿程环流旋度(绝对值)逐渐增大,在弯顶断面后达到最大值,该趋势说明次生环流在

不断发展;凸岸侧及中心线附近的底部水流($z/H=0.1$)在弯顶断面达到最大环流旋度,强度持续到 D75 断面后开始衰减,但在弯道下游一定范围内仍然存在。根据 $z/H=0.3$ 流层的相对环流旋度沿程数值较小,可以判断主环流中心位于 $z/H=0.3$ 流层,且靠近凸岸位置,因为在中心点高度处会出现最小环流旋度。值得注意的是,主环流经过弯顶断面后环流旋度出现衰减趋势,而凹岸侧次生环流则沿程发展,在弯道出口断面达到最大。该趋势表明,水流经过弯顶断面后,次生环流对凹岸侧的影响逐渐开始超过主环流。

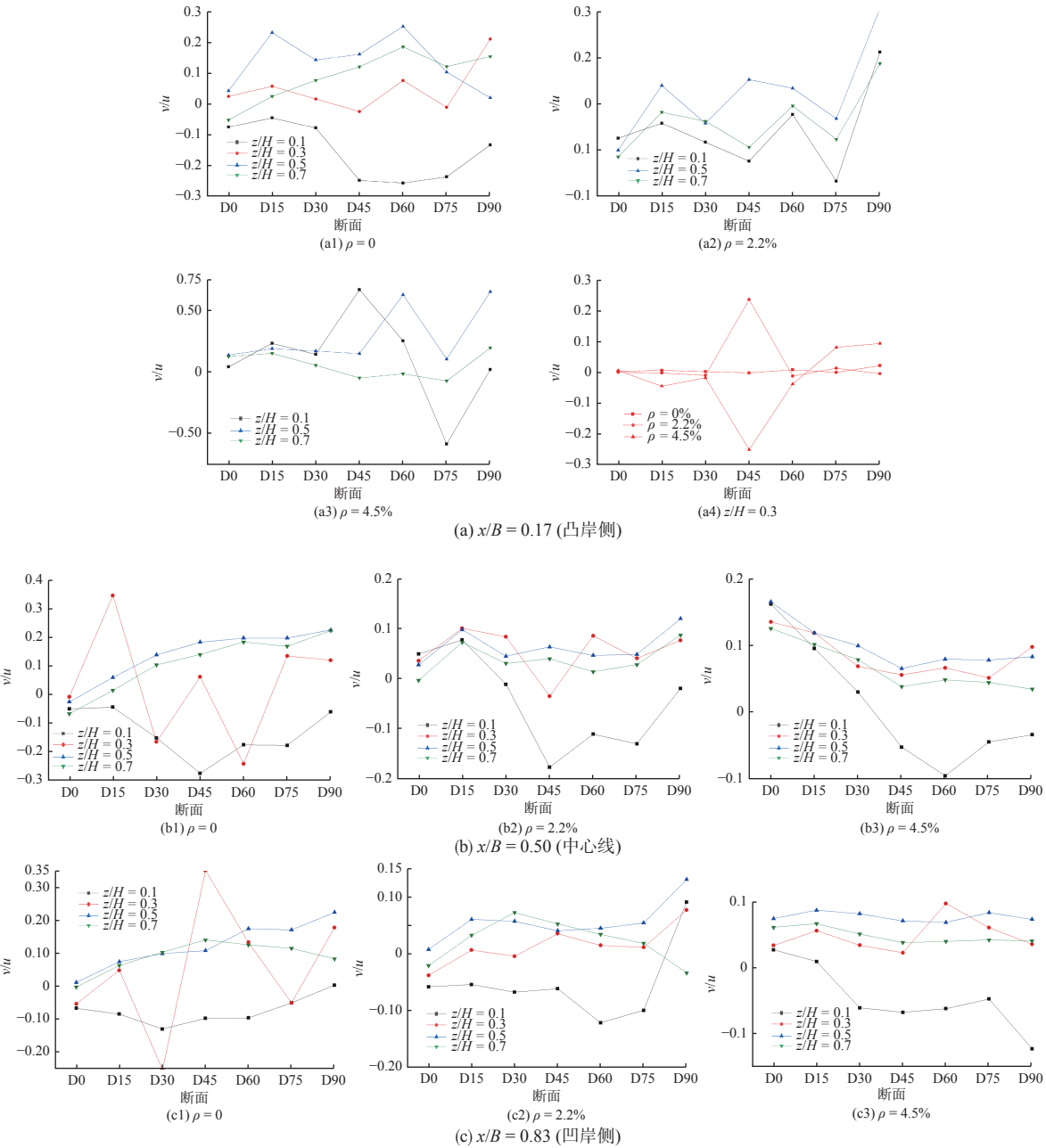


图 5 不同密度植被作用下沿程环流旋度对比

Fig. 5 Comparison of the intensity of circulation with different vegetation densities

而当弯道存在植被时,断面 D0~D30 之间植被区对环流旋度的影响并不明显,D30 断面后(弯道段中下游),随着植被密度的增加环流旋度增大,这是由于凸岸侧植被的阻力作用使得纵向流速大幅减小,尤其是环流中心 $z/H=0.3$ 水深位置的环流旋度远大于断面其他流层;图 5(b)表明,中心区($x/B=0.5$)的环流旋度在

植被作用下有所降低。低密度植被下($\rho=2.2\%$), 弯道中下游 $z/H=0.1$ 水深处的环流旋度要大于其他流层; 高密度植被下($\rho=4.5\%$), $z/H=0.5$ 水深处的环流旋度大于其他流层, 因此植被密度对各断面不同水深处环流强度的作用效果不同, 对其定量描述时需要综合考虑断面水深变化; 由图 5(c)可知, 植被作用下非植被区的沿程环流旋度趋于平稳, 不同水深位置环流旋度的差值较小。

2.2 不同植被位置

2.2.1 环流结构沿程分布 为研究凸岸侧植被段的位置对弯道环流结构的影响, 将植被区分布铺设为 $0^\circ\sim30^\circ$ 、 $0^\circ\sim60^\circ$ 及 $0^\circ\sim90^\circ$ 三种工况, 试验中发现 D0~D15 断面的环流形态较不明显, 而 D45~D60 断面、D75~D90 断面的环流结构和规模相似, 故分别以 D60 和 D90 作为代表断面分析, 其横向环流沿程分布如图 6 所示。

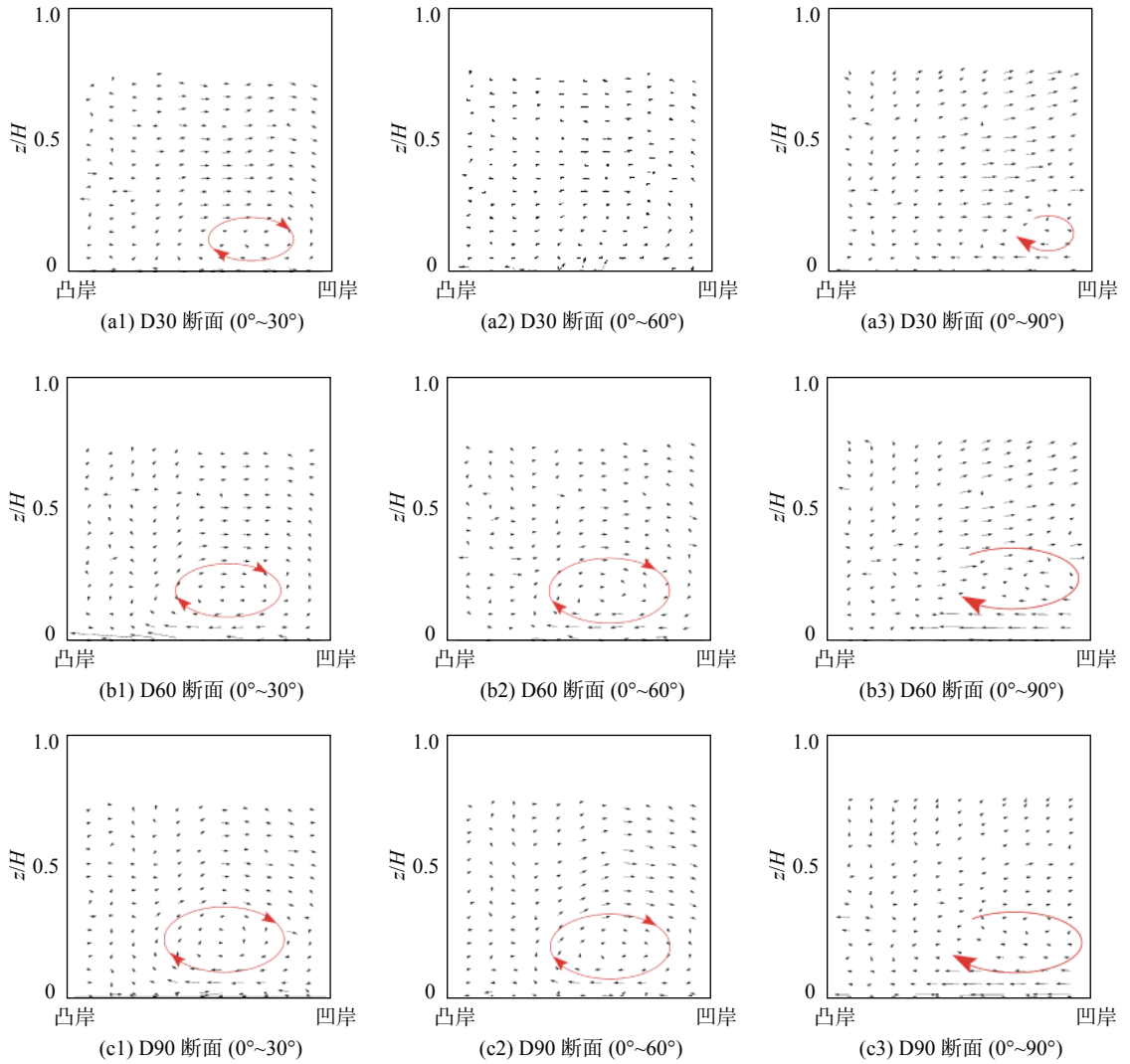


图 6 不同格局植被作用下断面横向环流分布

Fig. 6 Distribution of bend circulation with the vegetation at different locations

由图 6 可知, D30 附近环流现象逐渐形成, 此时环流规模较小。下游(D45~D90)环流进一步发展, 且主要位于 $x/B=0.75$ 的非植被区(凹岸侧)和植被区边缘之间, 环流中心约在 $z/H=0.2$ 水深处。 $0^\circ\sim60^\circ$ 和 $0^\circ\sim30^\circ$ 植被段上的环流结构分布规律相似。

与无植被条件下断面环流分布相比, 植被作用下环流的规模减小, 环流中心下降。3 种植被布设方式均

抑制了 0°~30°弯道段环流的产生, 其中 0°~90°植被段对弯道环流的削弱作用最大, 横向环流的中心被压缩向凹岸侧, 在弯道出口处环流趋于消失。

2.2.2 环流强度沿程分布 植被在不同布设方式(长度)下, 沿程各断面环流旋度(横向流速/纵向流速)的分布见图 7。

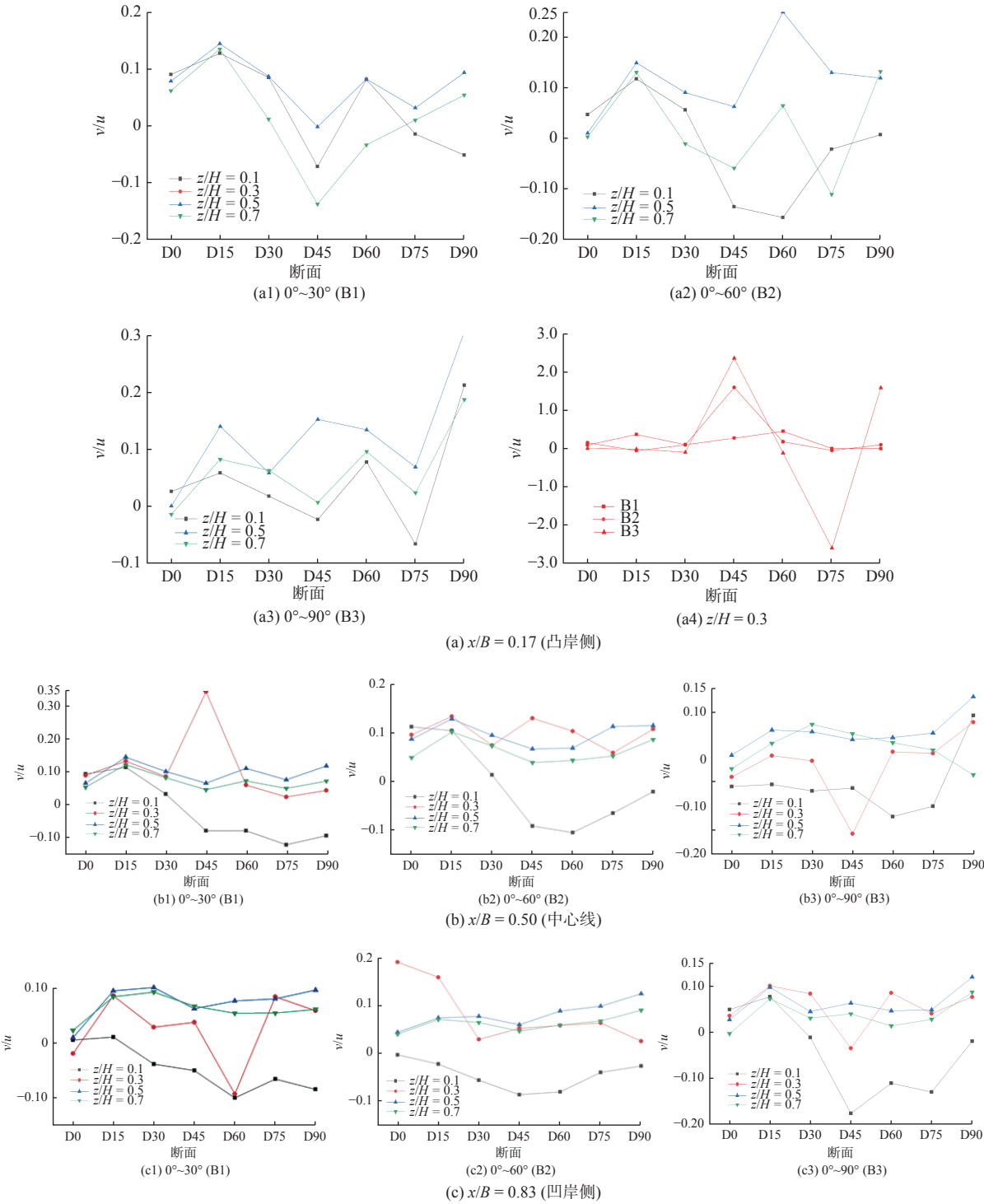


图 7 不同位置植被作用下沿程环流旋度对比

Fig. 7 Comparison of the circulation curl with vegetation at different locations

试验发现,植被区的环流旋度一般在植被尾段较大,如 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 植被段的D15断面附近, $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 植被段的D45断面附近,以及 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 植被段的弯道出口处。从中心线环流强度的沿程变化来看,植被段布设长度的变化导致沿程环流旋度数值整体减小,尤其是对弯道中下游,且 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 植被段对弯道环流的削弱效果相对更明显。凹岸侧环流旋度整体较平稳,受植被布设方式影响较小。

3 结 语

本文通过物理模型研究了在 90° 弯曲河道中,凸岸侧布设刚性非淹没植被对弯道水流特性的影响,研究表明,植被阻力减缓了弯道前段主环流的发展,且环流中心向无植被区(凹岸侧)底层转移,次生环流消失;植被段的纵跨越长,对弯道环流的削弱作用越大,在一定范围内抑制了纵向紊动强度,凸岸侧垂向紊动明显减弱。此外,相比于高密度植被($\rho=4.5\%$),低密度植被($\rho=2.2\%$)对弯道环流的消减作用更强,环流区域更小,初步判断是由于高密度植被作用下,动能交换强度更大从而影响范围越大,其间是否存在临界密度值还需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 刁明军, 杨海波, 李斌华, 等. 弯道水力学研究现状与进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2007, 33(3): 596-601. (DIAO Mingjun, YANG Haibo, LI Binhua, et al. A summary of the study and progress on hydraulics of curved flow[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2007, 33(3): 596-601. (in Chinese))
- [2] 孙东坡, 朱岐武, 张耀先, 等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 61-66. (SUN Dongpo, ZHU Qiwu, ZHANG Yaonian, et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 61-66. (in Chinese))
- [3] 王平义, 蔡金德, 方铎, 等. 弯曲河道纵向垂线平均流速平面分布的研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1994, 9(3): 267-275. (WANG Pingyi, CAI Jinde, FANG Duo, et al. A study on the distribution of the depth-averaged longitudinal velocity in channel bends[J]. Journal of Hydrodynamics (SerA), 1994, 9(3): 267-275. (in Chinese))
- [4] 童思陈, 高建, 许光祥, 等. 弯道水流纵向垂线平均流速分布的计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 126-129. (TONG Sichen, GAO Jian, XU Guangxiang, et al. Calculation of the longitudinal depth averaged velocity distribution of curved conduit flow[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(1): 126-129. (in Chinese))
- [5] 王付. 含双重植物明渠水流特性研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(9): 70-72, 33. (WANG Cun. Study on flow characteristics of open channels with double vegetation[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(9): 70-72, 33. (in Chinese))
- [6] 房春艳. 植被作用下复式河槽水流阻力实验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010. (FANG Chunyan. Flow resistance in compound channels with vegetation floodplains[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [7] 曾玉红, 槐文信, 张健, 等. 非淹没刚性植被流动阻力研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 834-838, 847. (ZENG Yuhong, HUAI Wenxin, ZHANG Jian, et al. Flow resistance of emerged rigid vegetations in open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 834-838, 847. (in Chinese))
- [8] TANG H W, TIAN Z J, YAN J, et al. Determining drag coefficients and their application in modelling of turbulent flow with submerged vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2014, 69: 134-145.
- [9] 渠庚, 张小峰, 陈栋, 等. 含柔性植物明渠水流阻力特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1344-1351. (QU Geng, ZHANG Xiaofeng, CHEN Dong, et al. Experimental study on flow resistance characteristics in open channel with flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11): 1344-1351. (in Chinese))
- [10] 吴福生. 含植物明渠水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009. (WU Fusheng. Dynamic characteristics of open channel flow with vegetation[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [11] 徐卫刚, 张化永, 王中玉, 等. 植被对河道水流影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 251-259. (XU Weigang, ZHANG Huayong, WANG Zhongyu, et al. Effects of vegetation on river flow: a review[J]. Chinese Journal of Applied

Ecology, 2013, 24(1): 251-259. (in Chinese))

- [12] 姬昌辉, 洪大林, 丁瑞, 等. 含淹没植被明渠水位及糙率变化试验研究[J]. *水利水电工程学报*, 2013(1): 60-65. (JI Changhui, HONG Dalin, DING Rui, et al. Variation characteristics of water level and roughness of an open channel with submerged vegetation[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(1): 60-65. (in Chinese))
- [13] GORING D G, NIKORA V I. Despiking acoustic doppler velocimeter data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(1): 117-126.
- [14] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993. (ZHANG Hongwu, LÜ Xin. Curve hydraulics[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993. (in Chinese))
- [15] 郭维东, 于冰, 张雪涛, 等. 弯道上游顺直河段水流流态的研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(2): 247-250. (GUO Weidong, YU Bing, ZHANG Xuetao, et al. Flow pattern experiment at the straight channel up the bend[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(2): 247-250. (in Chinese))

Influence of non-submerged rigid vegetation on the flow characteristics of bend

ZHAO Yuqi, PENG Qing'e, SHI Xuewei, YANG Kejun

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Vegetation widely distributed in natural river shallows can change the local hydraulic characteristics of the river and the process of sediment transport. In order to understand the influence of vegetation on the flow characteristics of the bend, our experiment is aimed at the bend with rigid emergent vegetation on the convex bank under a specific flow rate, to explore the distribution law of water flow characteristics along the way when vegetation density and location are different. By establishing a generalized model of curved water flow, using ADV to collect and process the three-dimensional velocity data, and comparing the velocity distribution under the conditions with and without vegetation (vegetation density respectively $\rho=0$, $\rho=2.2\%$, $\rho=4.5\%$), we qualitatively analyze the effect of vegetation on the turbulence characteristics of the curve flow under different working conditions, and determine the structure and strength of the curve circulation. The results show that the existence of vegetation on the convex bank (0° - 90° bend, evenly distributed in the quarter of the river width) can effectively weaken the circulation intensity of the bend, but the reduction effect on the convex bank area does not increase with the increase of vegetation density. The location of the dividing point of different flow direction water layers in the non-vegetation area changes with the change of vegetation density, and the distribution of vegetation also affects the circulation structure at different water depths in each section of the bend.

Key words: rigid vegetation; curved channel; velocity distribution; transverse circulation; turbulence characteristics