

# 不同布设形式刚性植被群对连续弯道水力特性的影响

张朝瑜<sup>1</sup>, 孙雪岚<sup>1</sup>, 冀自青<sup>2</sup>, 段京京<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了解植被群对天然弯曲河道水力特性的影响, 设计簇状、均匀两种布设形式分别模拟自然丛生及人工规律种植的植被群, 通过水槽试验探究植被不同布设形式对连续弯道流场、水动力轴线、紊动能、环流结构分布的影响。结果表明, 连续弯道流场出现明显的流速分区, 其中高流速区靠近凸岸侧, 低流速区依附在凹岸侧; 植被布设使得高、低流速区的分布范围产生相反的变化规律, 即高流速区增加, 低流速区削减。弯道作用下水动力轴线在“弯顶上游侧逐渐摆向凸岸—弯顶附近紧贴凸岸—弯顶下游侧摆向凹岸”完成一个周期的运动变化; 植被布设使其摆向水槽中部且簇状布设的偏离程度大于均匀布设。弯道作用下水流紊动能的沿程分布表现为“两侧小中间大”; 整体上看植被布设使得弯顶下游侧紊动能增加且簇状布设的影响程度大于均匀布设。植被布设改变了环流结构, 表现为涡核位置的摆动以及分布范围的变化。

**关键词:** 连续弯道; 刚性植被; 流场; 水动力轴线; 紊动能; 环流

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0031-04

## 1 引言

弯曲型河流在自然界占比极大, 稳定的河湾平面形态类似于正弦曲线的平滑曲线<sup>[1]</sup>, 在河道中或多或少伴生着植被群落, 流经植被的水流称为植被水流。当前, 对植被水流的研究多集中在紊动特性、植被类型及淹没程度<sup>[2,3]</sup>等方面, 且多以顺直河型为研究载体。也有研究<sup>[4,5]</sup>探究了植被对弯道水流的作用机理, 但其试验水槽多为90°或180°折返的单弯水槽, 与天然稳定弯曲河型相差较大。从生态学角度来看, 水生植被具备很高的生态服务价值<sup>[6]</sup>; 从河流动力学角度看, 植被的存在会改变水流的水力特性<sup>[7]</sup>, 部分河流的洪水调查报告表明河道中丛生的禾本科植物及高秆作物等植被因素在一定程度上阻碍了河道行洪。因此, 充分了解并利用植被在河流系统中的双重作用尤为重要, 本文通过正弦派生水槽概化模型模拟天然弯曲河道, 设计簇状、均匀两种布设形式分别模拟自然丛生不规则分布的挺水植被以及人工种植相对均匀的高秆作物, 对比分析植被群不同布设形式对连续弯道水力特性的影响, 以期揭

示植被群对连续弯道水流的影响规律, 为生态河流治理提供一定的理论依据。

## 2 试验概况

### 2.1 试验水槽

试验在天津大学河流海岸工程泥沙研究所进行, 自循环试验水槽由3个周期相同的有机玻璃弯段、上下游水箱、立式轴流泵、电磁流量计、“蜂窝状”消能装置等组成, 见图1。水槽宽20 cm, 高

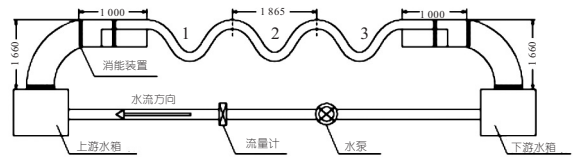


图1 试验水槽平面布置图(单位: mm)

Fig. 1 Plane layout diagram of test flume

7.5 cm, 弯段中轴线为 Langbein and Leopold 正弦派生曲线, 表达式为:

$$\theta(s^*) = \theta_m \sin ks^* \quad (1)$$

其中

$$k = 2\pi/\lambda$$

式中,  $\theta_m$  为最大偏角,  $\theta_m = -56.7^\circ$ ;  $k$  为波数;  $s^*$  为该点距离弯段终点的曲线长度;  $\lambda$  为曲线波

收稿日期: 2022-09-16, 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979185, 51004120)

作者简介: 张朝瑜(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学与河流动力学, E-mail: 1163252496@qq.com

通讯作者: 孙雪岚(1978-), 女, 博士、讲师、硕导, 研究方向为河流健康, E-mail: tysxlan@souhu.com

长,  $\lambda = 2.42 \text{ m}$ 。

试验借助 ADV 进行流速数据的采集, 其中采样时间为 60 s, 采样频率为 50 Hz, 信噪比为 20 dB, 信号强度  $\geq 100$ , 相关系数  $\geq 80\%$ 。

为了得到水流运动的真实情况, 构建了适用于弯曲河道的正交曲线坐标系, 其中虚线为水槽的中轴线;  $s$  方向与中轴线相切, 为水流的纵向方向;  $n$  方向垂直  $s$  方向, 为水流的横向方向, 见图 2。

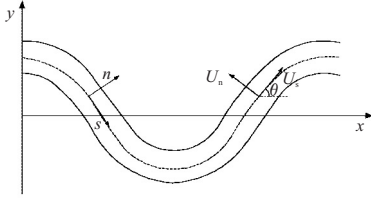


图 2 正交曲线坐标系示意图

Fig. 2 Diagram of orthogonal curve coordinate system

直角坐标系“ $xyz$ ”与正交曲线坐标系“ $snz$ ”的转换公式为:

$$\begin{cases} U_s = S_u \cos\theta + S_v \sin\theta \\ U_n = -S_u \sin\theta + S_v \cos\theta \\ U_z = S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为弯道轴线与  $x$  轴的偏角;  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  分别为测点在“ $xyz$ ”坐标系中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的时均流速;  $U_s$ 、 $U_n$ 、 $U_z$  分别为转换后该点在“ $snz$ ”坐标系中纵向、横向、垂向的时均流速。

### 2.2 试验工况

选取第二个弯段为试验段, 利用有机玻璃棒模拟刚性植被, 采用“底板预留孔”的方式来固定玻璃棒实现不同排列形式的切换。设计簇状、均匀两种排列形式, 其中簇状布设时横、纵间距为 4 cm  $\times$  4 cm; 均匀布设时横、纵间距为 5 cm  $\times$  5 cm, 见图 3。试验设计工况见表 1。

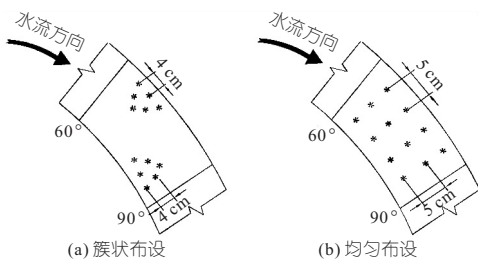


图 3 植被布设示意图

Fig. 3 Diagram of vegetation layout

表 1 试验工况表

Tab. 1 Table of test conditions

排列形式	流量 $Q$ / (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	静水位 $h$ / cm	玻璃棒直径 $D$ / mm	玻璃棒高度 / cm	淹没状态	植被密度 / %
无植被	9.5	5.5				0
簇状	9.5	5.5	4	8	未淹没	0.38
均匀	9.5	5.5	4	8	未淹没	0.38

使用相位的变化对试验弯段进行划分, 即  $0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $270^\circ \sim 360^\circ$  弯段区域间隔  $45^\circ$  布设测面,  $90^\circ \sim 270^\circ$  弯段区域进行加密设计, 间隔  $15^\circ$  布设测面, 共划分 17 个断面; 选择  $60^\circ \sim 90^\circ$  区域为植被布设区, 每个测面划分 13 条测线, 每条测线间隔 0.5 cm 布设测点, 见图 4。

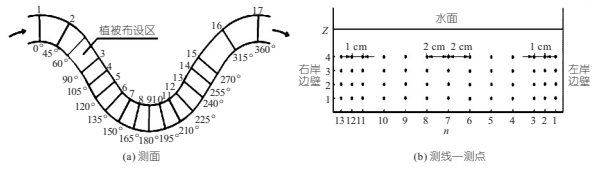


图 4 “测面—测线—测点”划分示意图

Fig. 4 Partition diagram of measuring surface-measuring line-measuring point

## 3 植被布设对流速分布的影响

### 3.1 流场分布

计算断面各测线纵向流速的平均值, 绘制植被不同布设形式下的流场分布云图, 见图 5。经计算, 试验水流  $\bar{v} = 0.26 \text{ m/s}$ , 为了反映流速分布的不均匀性, 将大于  $1.15\bar{v}$  称为高流速, 小于等于  $0.8\bar{v}$  称为低流速。由图 5(a) 可知, 无植被时受凹岸的顶托作用及入弯后随着弯道曲率的增大在离心力持续作用下连续弯道流场出现明显的流速分区, 其中高流速区集中分布在  $120^\circ \sim 240^\circ$  断面区域的凸岸侧, 而低流速区分布在  $105^\circ \sim 225^\circ$  断面区域的凹岸侧。对比图 5(a)、(b) 可知, 簇状布设下高流速区、低流速区的分布位置变化较小; 但高流速区的分布范围扩大了 150%, 而低流速区缩小了 20%。对比图 5(a)、(c) 可知, 均匀布设下高流速区的起始位置从  $120^\circ$  沿凸岸下移至  $135^\circ$  断面, 终止位置从  $240^\circ$  上移至  $210^\circ$  断面, 而低流速区的分布位置基本不变; 高流速区的分布范围扩大了 108%, 低流速区缩小了 12%。在连续弯道中凸岸侧的流速大于凹岸侧, 长此以往凸岸可能会向下游发生崩退, 形成切滩; 植被的布设会加速上述现象的发生, 且簇状布设的影响程度大于均匀布设。

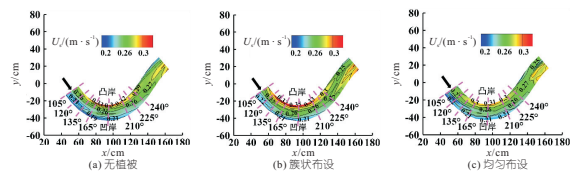


图 5 植被不同布设下流场分布云图

Fig. 5 Flow field distribution under different vegetation layout

### 3.2 水动力轴线

水动力轴线的偏移度  $I$  是定量判断其在弯槽中位置状态的指标,表达式为:

$$I = (L/B) \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $L$  为水动力轴线距水槽凸岸的距离;  $B$  为水槽宽度。

根据水动力轴线的定义<sup>[8]</sup>, 绘制植被不同布设形式下水动力轴线的沿程分布, 见图 6。由图 6 可知, 无植被时水动力轴线在  $105^\circ \sim 210^\circ$  断面区域内贴近凸岸贯穿整个弯顶, 表明在弯道的作用下凸岸侧的动力作用较强; 从  $210^\circ$  断面开始缓慢脱离凸岸, 在  $270^\circ$  断面发生大幅度摆动逐渐靠近凹岸, 最后于  $300^\circ$  断面处紧贴凹岸且一直向下游延伸, 这与曹玉芬等<sup>[9]</sup> 的试验结论类似。植被布设对水动力轴线分布的影响主要集中在  $105^\circ \sim 135^\circ$  断面区域内, 其中无植被时水动力轴线的偏移度  $I = 10\%$ , 均匀布设  $I = 15\%$ , 簇状布设  $I = 30\%$ ; 植被的布设延缓了水动力轴线摆向凸岸的进程且簇状布设的延缓程度大于均匀布设。

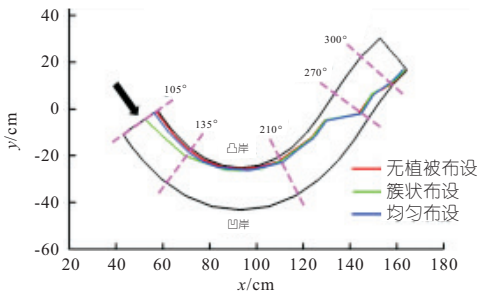


图 6 植被不同布设下水动力轴线沿程分布

Fig. 6 Hydrodynamic axis distribution along the course under different vegetation layout

## 4 植被布设对紊动能分布的影响

经计算试验水流的雷诺数  $Re = 11\ 143$ , 水流为紊流。本文使用紊动能表征水流的紊动特性, 选用数理统计中系综平均法计算水流的紊动能, 测点“纵向—横向—垂向”紊动强度的统计表达式依次为:

$$\begin{cases} T_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u'_{sk} - U_s)^2} \\ T_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u'_{nk} - U_n)^2} \\ T_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u'_{zk} - U_z)^2} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中,  $u'_{sk}$ 、 $v'_{nk}$ 、 $w'_{zk}$  分别为测点纵向、横向、垂向的

脉动流速;  $T_s$ 、 $T_n$ 、 $T_z$  分别为测点纵向、横向、垂向的紊动强度;  $N$  为测点采样总数。

则水流紊动能  $T$  的表达式为:

$$T = (T_s^2 + T_n^2 + T_z^2)/2 \quad (5)$$

选取  $z = 2.5\text{ cm}$  处的流层为研究对象, 对各测点的紊动能进行计算并绘制其沿程分布云图, 见图 7。由图 7(a) 可知, 在无植被时水流紊动能的沿程分布表现出不均匀性, 其中弯道两侧的紊动能较小而中部区域较大; 水流在弯道的过渡段紊动能较小(介于  $0.6 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}^2$ ) 这是由于在过渡段水流运动相对平稳, 掺混程度较弱; 而当水流进入弯道后受离心力的影响, 流速在三个方向上相互掺混使得水流的紊动加剧, 紊动能有所增加(多大于  $1.2 \times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}^2$ ), 最大值出现在弯顶( $180^\circ$  断面)下游  $210^\circ$  断面区域中部。对比图 7(a)、(b) 可知, 簇状布设下水流紊动能明显增大, 高紊动能分布区域显著增加; 其中向上游侧延伸至  $165^\circ$  断面, 向下游贴近凸岸侧延伸至  $270^\circ$  断面, 形成一“高紊动能带”; 对比图 7(a)、(c) 可知, 植被均匀布设对弯顶上侧水流紊动能的分布影响较小, 在弯顶下侧靠近凸岸侧区域水流紊动能的值增大延伸至  $270^\circ$  断面, 同样形成一“高紊动能带”。对比图 7(b)、(c) 可知, 植被的布设使得水流的紊动能发生重新分布, 无论从紊动能的分布位置还是分布范围簇状布设的影响程度均大于均匀布设。

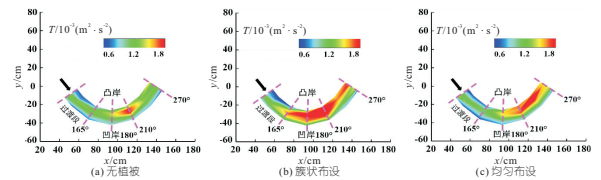


图 7 植被不同布设下紊动能沿程分布云图

Fig. 7 Distribution nephogram of turbulent kinetic energy along flow path under different vegetation layout

## 5 植被布设对环流结构分布的影响

为了探究植被不同布设形式对弯道环流结构的影响, 选取典型断面进行对比分析。断面的选取原则为试验水流的弗劳德数  $Fr = 0.35 < 1$  为缓流, 而缓流会影响植被区上游的环流结构, 故选取  $45^\circ$  断面; 在植被区下游选取  $105^\circ$  断面; 本文重点关注植被布设对弯顶附近区域环流结构的影响, 所以选取  $165^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $195^\circ$  断面; 对所选 5 个典型断面, 绘制典型断面环流结构的分布图, 其中显示环流结构的轮廓线为 Tecplot 绘制的流线, 见图 8。

由图 8(a) 可知, 在  $45^\circ$  断面处无植被时受上

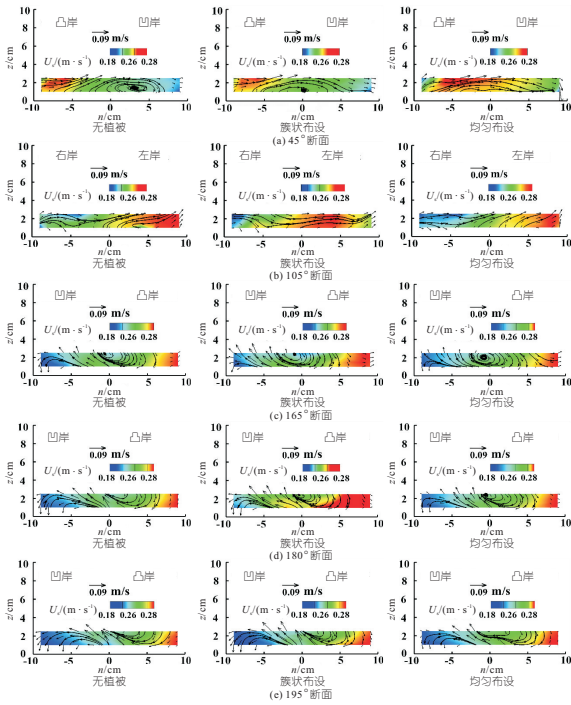


图8 植被不同布设下典型断面环流分布云图

Fig. 8 Circulation distribution cloud map of typical section under different vegetation layout

一弯道的影响,水流的流线发生弯曲并形成完整的顺时针单核环流结构,用坐标 $(n, z)$ 表示环流涡核位置,则 $45^\circ$ 断面处环流涡核位置为 $(3, 1.5)$ ;在簇状布设下环流涡核位置为 $(0, 1.5)$ ,涡核位置向凹岸侧移动且环流范围衰减了50%;而在均匀布设下,断面环流结构消失。由图8(b)可发现,在植被区下游 $105^\circ$ 断面处边壁相对顺直,水体几乎不受离心力的影响,不利于维持环流的发展,故未形成完整的环流结构,即植被的布设使断面流线变得顺直,削弱了环流结构的形成趋势。由图8(c)可知,无植被水体流经 $165^\circ$ 断面时由于水槽曲率变大在横向上水体在离心力及水压力的共同作用下使水面产生横向比降,进而导致断面流线弯曲程度加剧,最终形成一顺时针单核环流结构,涡核位置为 $(-0.25, 2.5)$ ;而在簇状布设时环流涡核位置为 $(-1, 2.5)$ ,均匀布设为 $(-1.5, 2)$ ;从涡核坐标变化来看,植被布设对断面流速的分布产生扰动,使得环流涡核位置向凹岸侧偏移;从环流结构的分布范围来看,簇状布设下分布范围增加了200%,均匀布设下增加了150%。由图8(d)可知,在弯顶 $180^\circ$ 断面处水槽曲率达到最大,无论植被布设与否皆形成一单核环流结构,无植被、簇状及均匀布设下的涡核位置依次为 $(0.25, 2.5)$ 、 $(-0.25, 2.5)$ 、 $(-1, 2.5)$ ,环流涡核及分布范围的变化趋势与 $165^\circ$ 断面处类似,簇状

布设下分布范围增加了150%,均匀布设下增加了130%。由图8(e)可知,在 $195^\circ$ 断面处由于凹岸侧底部次生环流趋势沿程不断增强,受其顶托作用主环流结构遭到破坏;植被布设下水流断面流线分布类似,植被的影响作用微弱。植被布设使得弯顶附近区域的环流涡核中心摆向凹岸侧,同时伴随着环流分布范围的扩大,这将会加速弯道的演变进程,不利于岸壁的稳定。

## 6 结论

a. 连续弯道流场存在明显的流速分区,即高流速区靠近凸岸,低流速区分布在凹岸附近;植被布设使高流速区分布范围扩大,低流速区减小,同时延缓了水动力轴线摆向凸岸的进程,也使弯顶下游侧紊动能增加且簇状布设的影响程度均大于均匀布设。

b. 弯道作用下断面环流结构若有则为单核环流结构;在植被区上游,植被的布设抑制了环流结构的形成,而在弯顶区域环流范围增大。

## 参考文献:

- [1] 张玮. 河流动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
- [2] 槐文信,韩杰,曾玉红,等. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7):791-797.
- [3] 李坤芳,王丹,杨克君,等. 植被群落作用下河道水流紊动能分布[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2):116-118.
- [4] 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.
- [5] YANG YU, LIN YINGTIEN, JI XIAOYAN. Hydrodynamic characteristics of flow over emergent vegetation in a strongly curved channel[J]. Journal of hydraulic research, 2022, 60(2).
- [6] 胡旭,何亮,曹特,等. 富营养化湖泊围隔中重建水生植被及其生态效应[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3):349-357.
- [7] 李树慧,张银华,蔡怀森. 河岸刚性植被缓冲带对水流阻力的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9):32-35.
- [8] 张红武,吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
- [9] 曹玉芬,白玉川,高术仙. 连续弯道水槽水流结构与床面形态试验研究[J]. 天津大学学报, 2020, 53(12):1226-123.

## Responses of Growing Period NDVI (G-NDVI) to Meteorological Factors Spatio-temporal Variations in Lhasa River Basin

ZHANG Yang, ZHANG Run-run, GUO Ming-chen, WANG Zhao

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The Lhasa River Basin is a typical arid and semi-arid basin in the Qinghai-Tibet Plateau, where the ecosystem is extremely fragile. It is of great significance to study the spatio-temporal variation of vegetation index (NDVI) in response to the changes of meteorological factors, and to explore the adaptability of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau to the meteorological factors under the background of climate change. Based on the monthly NDVI, precipitation ( $P$ ), and average temperature ( $T$ ) time series dataset in the Lhasa River Basin from 1982 to 2017, using Pettitt, Mann-Kendall trend test and Pearson correlation analysis, this paper analyzed the spatio-temporal variation characteristics of growing period NDVI (G-NDVI) and meteorological factors, and identified responses patterns of G-NDVI to climate factors. The results show that the G-NDVI changed abruptly in 1997, and there was a trend shift from increasing to decreasing. The climate of the watershed changed from “wetting-coldling” before the abrupt point to “drying-warming” after the abrupt point, and its effect on vegetation growth changed from promoting to inhibiting. There are two zones in the watershed where the responses patterns of G-NDVI to meteorological factors changed before and after the abrupt point. In the western permafrost areas, G-NDVI shows significant correlation with  $P$  and  $T$  in the second phase after 1997, i. e., emerging the “responding” function on meteorological factors variation. In the southern seasonal frozen zone, after the abrupt point, time lags of G-NDVI to  $P$  were elongated, and meanwhile the “responding” of G-NDVI to  $T$  has been triggered. The latency of NDVI response to  $P$  in the western permafrost region is longer than that in the southern seasonal frozen zone. In the second phase after 1997, the response area of NDVI to meteorological factors increased compared with that before the abrupt point, and the effect of meteorological factors on vegetation growth in the Lhasa River basin was enhanced.

**Key words:** NDVI; climate change; lag time; spatio-temporal dynamics; Lhasa River Basin

\*\*\*\*\*  
(上接第 22 页)

## Daily Runoff Prediction of Lanzhou Hydrological Station in Yellow River Basin Based on EMD Decomposition

LU Wei<sup>a</sup>, WEI Lin-jing<sup>b</sup>

(a. College of Science; b. College of Information Science and Technology,  
Gansu Agricultural University, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of runoff prediction, based on the control variable method and the daily runoff data of Lanzhou hydrometric station from August 2001 to December 2019, the models of the LSTM, ARIMA, SVR and XGBoost were used to establish 12 model schemes, including single model, EMD decomposition and reconstruction, EMD decomposition and reconstruction after removing noise components, and evaluation indicators of the 12 schemes were compared. The results show that the EMD sequence decomposition and reconstruction technology and noise component elimination based on Hurst exponent are helpful to improve the prediction accuracy. Compared with the single model, the  $R_{RMSE}$  of the model constructed by the former decreased by 15.16% on average, and that of the latter decreased by 28.49% on average. Among the 12 schemes, EMD-SVR-ARIMA with noise components removed is the best model.

**Key words:** daily runoff forecasting; EMD decomposition; Lanzhou hydrological station; machine learning model

\*\*\*\*\*  
(上接第 34 页)

## Effects of Different Layout Forms of Rigid Vegetation Groups on Hydraulic Characteristics of Continuous Bends

ZHANG Chao-yu<sup>1</sup>, SUN Xue-lan<sup>1</sup>, JI Zi-qing<sup>2</sup>, DUAN Jing-jing<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to understand the impact of vegetation groups on the hydraulic characteristics of natural meandering river, this paper designed two kinds of layout forms in which the cluster layout simulated the natural cluster vegetation group, and the uniform layout simulated the artificial regular planting vegetation group. Through the flume experiment, the impact of different layout forms of vegetation on the distribution of flow field, hydrodynamic axis, turbulent kinetic energy and transverse circulation structure in continuous bends was explored. The results show that the flow field in the bend appears obvious velocity partition in which the high velocity area is close to the convex bank, and the low velocity area is attached to the concave bank. Vegetation layout makes the distribution range of high and low flow rate areas have the opposite change rule: the high flow rate area increases, while the low flow rate area decreases. Under the action of the bend, the hydrodynamic axis gradually swings to the convex bank on the upstream side of the bend top, close to the convex bank near the bend top and swings to the concave bank on the downstream side of the bend top, completing a cycle of motion changes. Vegetation layout makes it swing to the middle of the flume and the deviation degree of cluster layout is greater than that of uniform layout. Under the action of the bend, the distribution of turbulent kinetic energy of water flow is small on both sides and large in the middle. On the whole, the layout of vegetation increases the turbulent kinetic energy on the downstream side of the bend top, and the impact of cluster layout is greater than the uniform. The vegetation layout changes the circulation structure of the section, which is manifested by the swing of the vortex core position and the change of the distribution range.

**Key words:** continuous bends; rigid vegetation; flow field; hydrodynamic axis; turbulent kinetic energy; circulating current