

# 基于水工试验探究挺水植物群落对水流结构的影响

樊荣<sup>1</sup>, 权全<sup>1\*</sup>, 王浩<sup>2</sup>, 刘挺<sup>2</sup>, 闫团进<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年3月28日

## 摘要

在植物群落之中, 因为挺水植物与水流之间的关系最为密切, 且缓流和净水效果最为突出, 常常作为湿地植被修复的首选材料。本文选择芦苇作为研究区优势挺水植物物种, 基于室内水工试验确定了不同植株密度的缓流效果。结果表明: ① 对于不同植株密度条件下的沿程水位变化, 由于存在植被阻力的影响使得群落段前的水位雍高, 而在进入植株群落时, 由于植株阻力面积的减小使得水位逐渐降低; ② 观测不同植被植株密度下各个横纵断面流速分布发现, 当植株密度为108株/m<sup>2</sup>时的植株缓流效果最好; ③ 比较不同植被植株密度下各个测点垂向流速分布, 发现不同植株密度下各个测点的垂向流速规律相似。研究结果为湿地修复中的植物群落构建提供数据支撑。

## 关键词

挺水植物, 水流结构, 水工实验, 植物群落

# Exploring Rigid Vegetation Community's Influence on the Flow Structure Based on the Hydraulic Experiment

Rong Fan<sup>1</sup>, Quan Quan<sup>1\*</sup>, Hao Wang<sup>2</sup>, Ting Liu<sup>2</sup>, Tuanjin Yan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Shaanxi Province, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 樊荣, 权全, 王浩, 刘挺, 闫团进. 基于水工试验探究挺水植物群落对水流结构的影响[J]. 植物学研究, 2022, 11(2): 197-209. DOI: 10.12677/br.2022.112024

## Abstract

Emergent plants are often used as the preferred materials for wetland vegetation restoration, because they have the closest relationship with water flow and have the most prominent effect of slow flow and water purification. In this study, *Phragmites australis* was selected as the dominant emergent plant species in the study area, and the slow-flow effects of different plant densities were determined based on laboratory hydraulic tests. The results were as follows: 1) For the water level change along the path under different plant densities, the water level in front of the community segment was high due to the influence of vegetation resistance, but when entering the community, the water level gradually decreased due to the decrease of plant resistance area. 2) It was found that the slow flow effect was the best when the plant density was 108 plants/m<sup>2</sup>. 3) Comparing the vertical velocity distribution of each measuring point under different plant densities, it was found that the vertical velocity distribution of each measuring point under different plant densities was similar. The results provide data support for general lake wetland restoration.

## Keywords

Rigid Vegetation, Flow Structure, Hydraulic Experiment, Plant Community

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水生植被作为河流生态系统的不可替代的一部分,一方面,水生植被不仅可为水生生物提供营养物质和生长环境,而且植物的根茎具有吸附固定作用抑制泥沙悬浮和改善水质;另一方面,植被可增加河道水流阻力、流速减缓以及水位升高,从而间接地控制河道泥沙输移、堤岸侵蚀、航运效率、水质净化及水环境等方面,所以植被是影响河道水流特性的关键因子[1] [2]。因此研究河道植被水流流动变化规律在水土保持、稳定河堤及环境工程等领域具有重要意义。针对挺水对水流结构的研究,国内外研究者提出了明渠植被水流结构“分层理论”方法,在明渠植被水流中沿水深分为若干层以研究植被对水流水动力学特性的影响。Huai 等[3]基于普朗特混合长度理论进行分析,通过三层水流结构模型预测明渠植被水流的垂向时均流速分布和紊流特性。王雯等[4]研究了刚性双层淹没植被水流特性,依据垂向流速的拐点划分为4个区域,在植被层的顶端雷诺应力和紊动能分布明显增强。Yang 等[5]将双层水流结构模型运用于研究淹没植被明渠水流,假设植被层流速分布均匀以及自由层流速遵循对数分布,结果证实了实测数据和理论值高度吻合。Nepf 等[6]分析淹没植被冠层顶部和内部水流紊动特性,冠层顶部产生的KH涡流控制垂直方向上动量交换,冠层内部的湍流动能与茎秆尺度相关。Li 等[7]研究淹没植被的不同排列方式、间距以及密度对边界底层、植被层、非植被层水流结构的影响,结果表明时均流速在植被的顶部发生显著的变化。Yang 等[8]采用塑料圆柱模拟河道刚性植被,并建立二维格点玻尔兹曼模型用来反应植被覆盖下河道水流流场分布。Liu 等[9]通过多普勒测速仪测得高矮刚性植被组合水流流速在断面的分布特征。Tan 等[10]通过水槽试验研究了刚性植被群对水流流速分布规律、紊动特性和消波效果的影响。以上所述研究,从多角度研究了水流结构与植被关系,但仍存在一定的局限性,在理论模拟方面研究较多,具体试验研究缺乏。据此,本研究选择芦苇作为研究区优势挺水植物物种,基于室内水工试验探究挺水植物

群落对水流结构的影响, 为流域水土保持以及河道治理等提供依据。

## 2. 试验设计与原理

实验装置设在西安理工大学水力学大厅水槽试验平台, 借助室内河道模型, 水流试验在长 16 m, 宽 1.2 m 的水槽模型中进行, 渠底坡度为 6‰ 可通过调控系统进行调控。边壁、渠底均为透明厚玻璃板。水流经离心水泵抽水、水压塔调压、实验室电脑控制供水系统供出, 设矩形薄壁堰测量流量, 进入静水池, 然后通过矩形堰流入消能池, 消能池尾端设有消力栅, 主要作用是用来消能使得水流稳定。水流经过消能池后水流流速变得平缓。试验系统图如图 1 所示。试验时, 水从水箱中流出, 通过水泵加压, 流经主路阀门节流(维持系统稳定), 然后流经流量计, 后经过变坡水槽, 尾水门后到水箱。试验平台主要实现三个功能: 提供恒定及按规律变化的流量、实现渠道水流不同的水位、试验参数监控并采集。采用 Model 801 电磁流速仪测量流速, 流速仪可以经过滑动螺杆调节可以垂直上下移动, 使得流速仪探头可以测量水槽的各个断面。水深可以用精确到 mm 的长刻度尺测量。

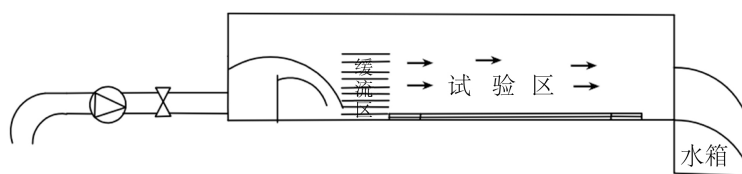


Figure 1. Test system diagram  
图 1. 试验系统图

实验选取和挺水植物有相似特征的圆木棒作为试验材料。考虑到实际情况中, 植物排列方式并无规律, 故模拟植株的圆木棒采用均匀交错排列方式。如下图 2 所示。试验结构、材料如图 3 所示。

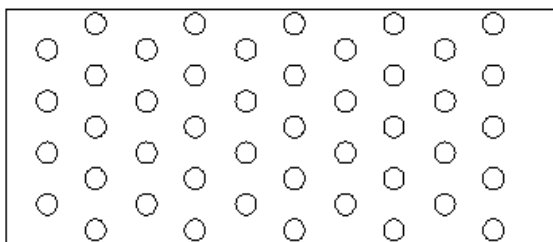


Figure 2. Vegetation staggered arrangement structure  
图 2. 植被交错布置结构



Figure 3. Test materials  
图 3. 试验材料

研究植被群落和水流结构之间的关系，参考近些年有关植株群落和水流机制研究的文献，在理论上确定了描述植被群落结构和水流相互作用力的生态水力学机制方程。

$$V = \frac{1}{\sqrt{\lambda D \cdot \theta}} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \tag{1}$$

式中： $\lambda$ ——非淹没挺水植株密度，株/m<sup>2</sup>； $D$ ——单株挺水植物的迎水面积，m<sup>2</sup>； $J$ ——水力坡度； $R$ ——水力半径，m； $\theta$ ——其他因素对水流的阻力； $V$ ——植株群落内部的流速，m/s。

显然，当水力坡度、水力半径和河道中水流阻力在确定的情况下，此时水体流速只和非淹没挺水植株的密度和植被的迎水面积有关。在非淹没情况下，水生植物群落的结构、地表径流的速度、地表面坡度和粗糙状况之间存在相互影响和相互作用的关系。

试验中，需要布设水流方向、横向、垂直方向的断面。顺水流方向，从 7 m~13 m 处沿程分别对 5 个断面进行测量。代表水流进入植株群落段前、刚刚进植株群落时、植株群落中间、即将出植株群落、出植株群落段后和 5 个断面。每个断面间隔 1.5 m；横向方向，在距离边壁 0 m、0.3 m、0.6 m、0.9 m、1.2 m 布设共 5 个断面，分别代表无植株边壁处，无植株中线处、主河槽中线处、植株种群中线处、植株种群边壁处五个断面；垂直方向，从水槽底部每隔 2 cm 布设一测量点，共 8 个测量点。所有数据测量均在水流达到稳定后进行测量，在每一个测点测量两次，每一次测量为 20 个值，取两次测量的平均值记录每种条件下的数据。断面布置图如图 4 所示。

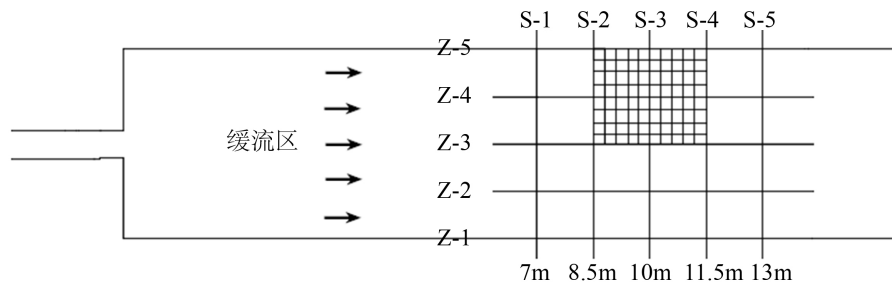


Figure 4. Layout of test section  
图 4. 试验断面布置图

根据野外调查，以三河口库区上游河道作为参照，测得靠近两岸的水流流速在 0.30~0.40 m/s 左右，根据实验室具体情况，发现当由电脑端控制系统的出水流量为 50 L/s 和 60 L/s 时流速在 0.3~0.4 m/s 之间范围内，故选取流量 50 L/s 和 60 L/s 两种不同的流量梯度并辅以由玻璃槽尾部的自动控制闸门进行控制，减小误差进行测量。根据现有实验系统设计在当流量处于 50 L/s，60 L/s 两种流量梯度情况，根据已有研究，设计种群植株密度为 0 株/m<sup>2</sup>，54 株/m<sup>2</sup>，108 株/m<sup>2</sup>，202 株/m<sup>2</sup> 4 个植株密度梯度。具体试验工况如表 1 所示。

Table 1. Table of test conditions  
表 1. 试验工况表

实验组次	1	2	3	4	5	6	7	8
密度(株/m <sup>2</sup> )	0	0	54	54	108	108	202	202
流量(L/s)	50	60	50	60	50	60	50	60

### 3. 结果分析

#### 3.1. 水位变化分析

沿水槽断面从 6 m 起始至 13 m, 每隔 0.5 m 对 15 个水深测量断面的平均值进行测量, 分别分析植被群落不同密度条件下的水位变化情况, 如图 5 所示。

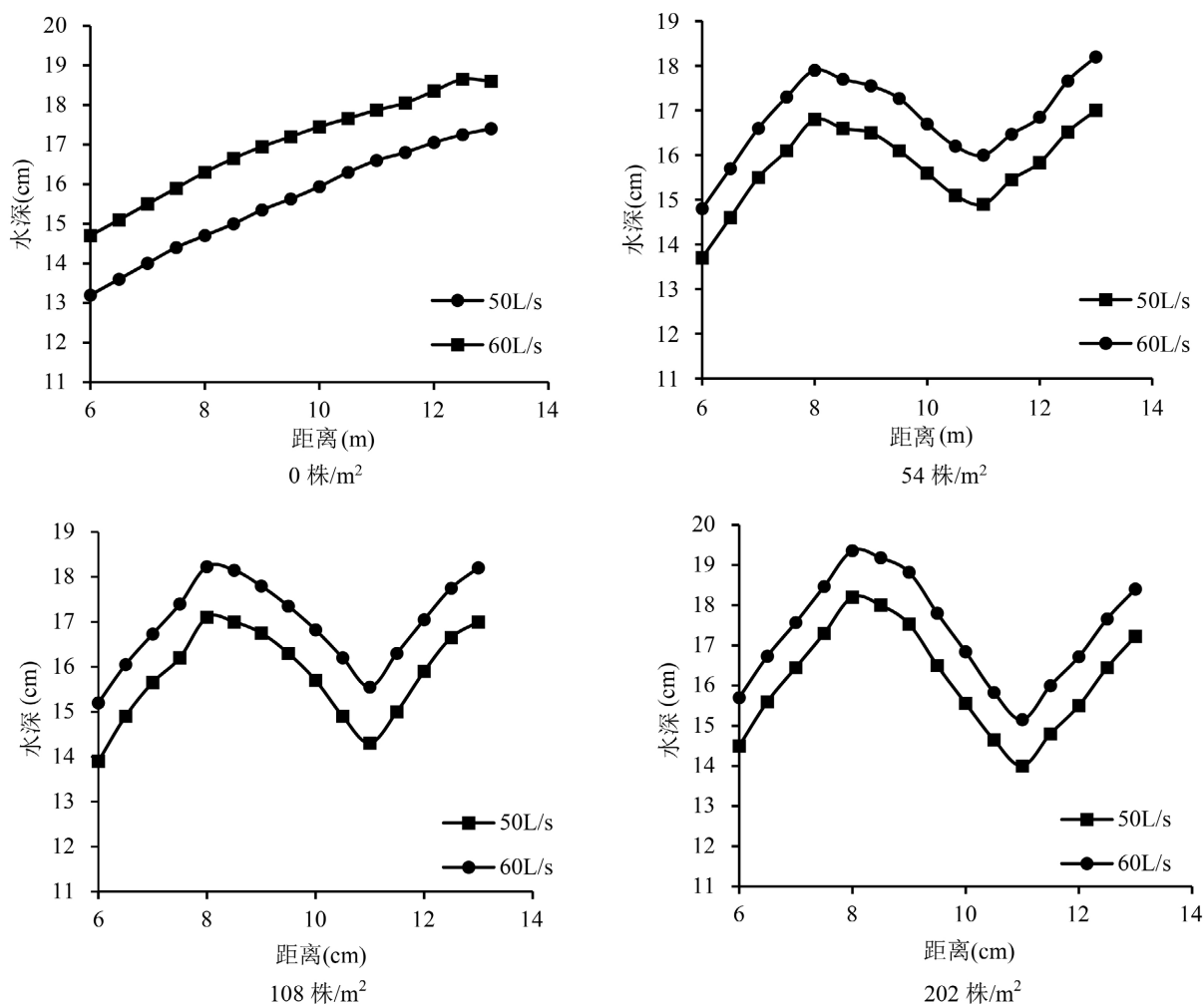


Figure 5. Water level changes along the path under different densities

图 5. 不同密度下沿程水位变化

由图 6 可知, 当河道中不存在植被时, 沿程水位变化呈现逐渐增加的趋势, 此时水位变化符合水力学中 M1 型渐变流的定义。对于当河道中存在植被时, 不同植株密度下沿程水位变化呈现相似的变化特征, 由于受到植株群落阻力的作用使得水位变化在进入植株前水位呈现逐渐增加的趋势, 而在进入植株群落时随着植株阻力的减小水位变化呈现逐渐下降的趋势, 在出植株群落时, 水位又呈现增加的趋势, 且随着河道中植株密度的增加, 水位最高点和最低点之间的差距也在逐渐增大。

#### 3.2. 横向流速分布

分析各个横断面处流速的分布情况, 对 5 个横断面处每一个测点上的流速值进行分析。

1) 0 株/m<sup>2</sup>

分别分析当流量分别为 50 L/s 和 60 L/s 两个组别下的流速变化情况。因为断面对称布置的，故纵断面 4 对称纵断面 2，纵断面 5 对称纵断面 1。所以在实际测量中，只测量了纵断面 1、纵断面 2、纵断面 3 的流速数据。如图 6 所示。

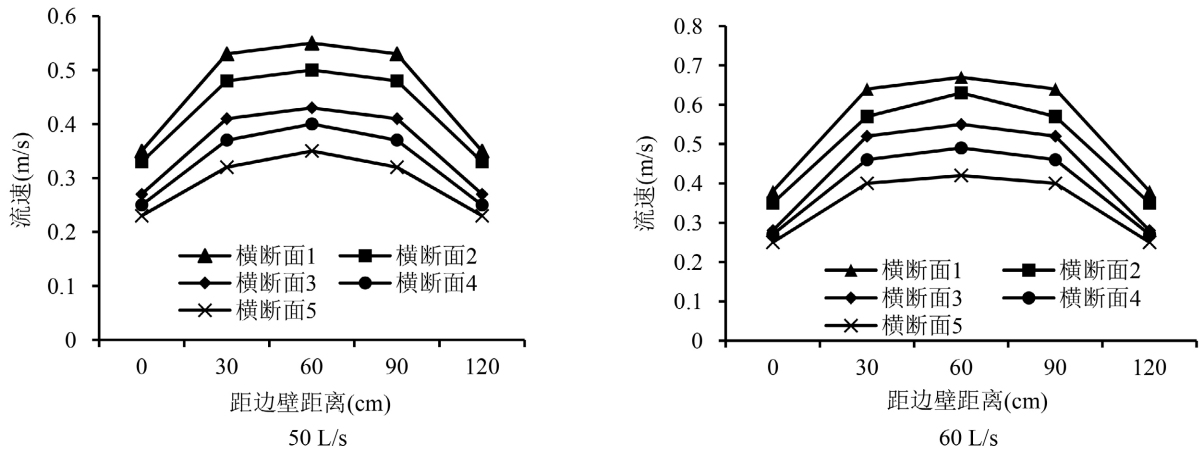


Figure 6. Change of cross section velocity at different flow rates of 0 plants /m<sup>2</sup>  
 图 6. 0 株/m<sup>2</sup> 不同流量下横断面流速变化情况

在流量为 50 L/s 情况下，由于受到了边壁阻力的阻碍，故边壁处流速较低，越靠近水槽中心处受到的边壁阻力越小，故流速呈现逐渐增大的趋势，在水槽中线处流速达到最大值。当流量为 50 L/s 时，横断面 1 处流速最大，其流速平均值为 0.5 m/s，横断面 5 处流速最小，平均值为 0.34 m/s。变化幅度取横断面的最大流速与最小流速之差为 0.16。当流量为 60 L/s 情况时，横断面 1 处流速最大，其值为 0.52 m/s，横断面 5 处流速最小，其值为 0.35 m/s，变化幅度为 0.17。随着流量的增加，流速也随之增加，流速的变化幅度也随之增加。由于受到了沿程阻力和边壁阻力的影响，从横断面 1 到横断面 5 流速呈现逐渐下降的趋势。

2) 54 株/m<sup>2</sup>

当流量组别为 50 L/s，60 L/s 两种情况下，分析各断面测点的平均流速，如图 7 所示。

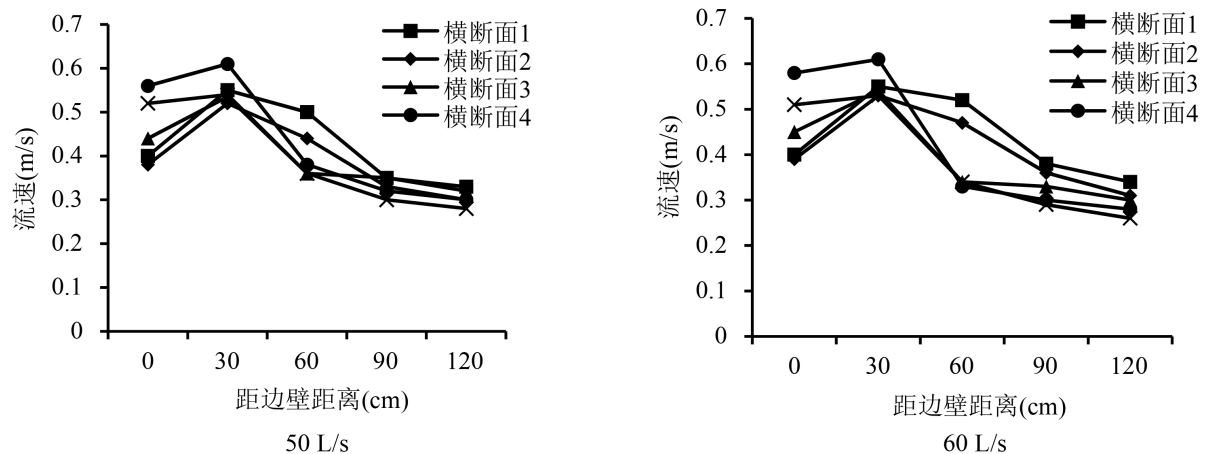


Figure 7. Change of cross section velocity at different flow rates of 54 plants /m<sup>2</sup>  
 图 7. 54 株/m<sup>2</sup> 不同流量下横断面流速变化情况



由图分析可知,当植株密度为 54 株/m<sup>2</sup>时,两种流量下各个横断面的流速横向分布规律大体一致。从无植株边壁处到无植株中线处流速逐渐增大,然后受到植株阻力的影响,逐渐减小,在植株群落内流速变化不大,植株群落边壁处流速略小于植株中线处流速。横断面 3、横断面 4、横断面 5 由于受到较大的植株阻力影响,流速变化幅度相较于横断面 1、横断面 2 变化较大。从整体的流速变化幅度来看,在 50 L/s 情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.07;在 60 L/s 情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.04。该植株密度下随着输入流量的增加流速变化幅度呈现减小的趋势。

### 3) 108 株/m<sup>2</sup>

在流量组别为在 40 L/s, 50 L/s 两种情况下,计算分析各断面测点的平均流速,如图 8 所示。

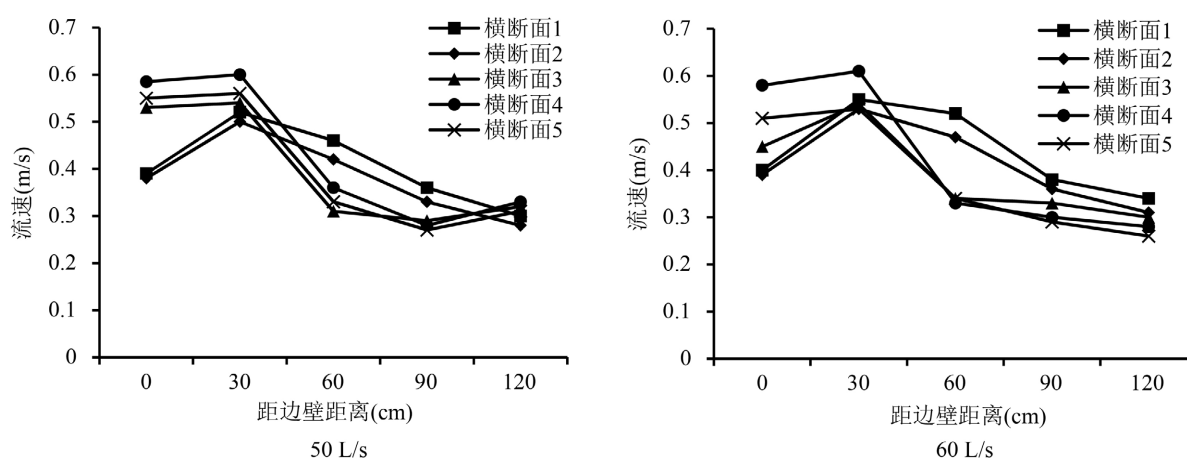


Figure 8. Change of cross section velocity at different flow rates of 108 plants/m<sup>2</sup>

图 8. 108 株/m<sup>2</sup> 不同流量下横断面流速变化情况

由图分析可知,在植株 108 株/m<sup>2</sup>的情况下,两种流量下的流速变化规律大致相似。从无植株边壁处到无植株中线处流速逐渐增大,然后受到植株阻力的影响,逐渐减小,在植株群落内流速变化不大,但此时由于受到较多植被阻力的影响,植株边壁处流速略大于植株中线处流速。从流速变化幅度来看,随着受到更多植株阻力的影响,50 L/s 情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.04。在 60 L/s 流量情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.03。随着流量的增加,该密度下的植株对水流流速变化幅度影响接近。

### 4) 202 株/m<sup>2</sup>

在流量组别为在 40 L/s, 50 L/s 情况下,分析各断面测点的平均流速,如图 9 所示。

由图分析可知,在植株密度为 202 株/m<sup>2</sup>的情况下,两种流量下的流速分布规律大致相似,局部存在差异。从无植株边壁处到无植株中线处流速逐渐增大,然后受到植株阻力的影响,逐渐减小,在植株群落内流速变化不大,但此时由于受到更多植被阻力的影响,使得植株边壁处流速大于植株中线处流速,相较于 108 株/m<sup>2</sup>,变化幅度更为剧烈。从流速数据变化幅度来看,当流量处于 50 L/s 情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.06。当流量处于 60 L/s 情况下,所有横断面的平均流速的变化幅度为 0.08。此时随着流量的增加,流速变化幅度反而呈现增加的趋势,说明该密度下的对水流的缓流效果没有前两种情况好且植被群落内部流速变化幅度更为剧烈。

## 3.3. 纵向流速分布

分析纵断面 1, 2, 3, 4, 5 共 5 处流速的变化情况,对 5 个纵断面处每一个点上的流速值进行统计

及分析。

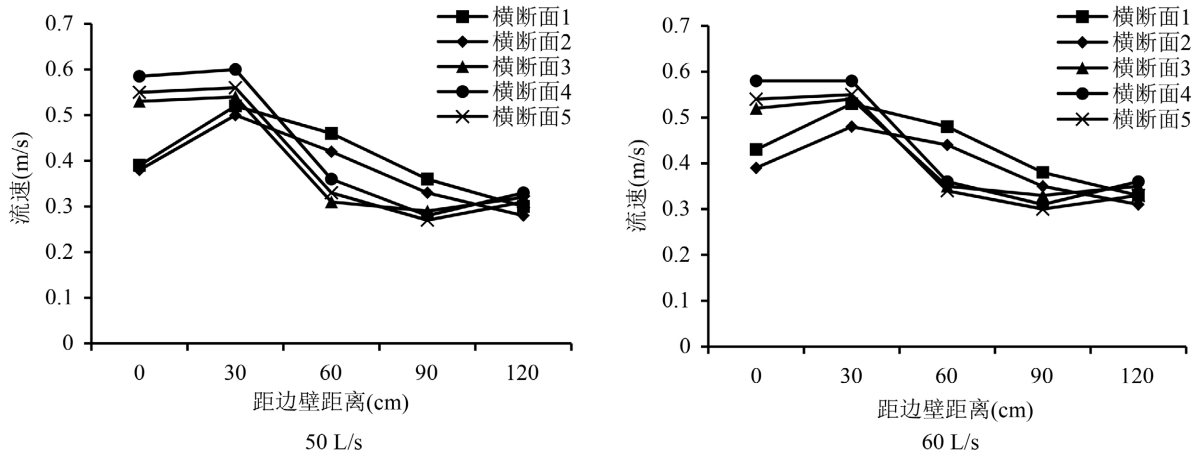


Figure 9. Change of cross section velocity at different flow rates of 202 plants /m<sup>2</sup>

图 9. 202 株/m<sup>2</sup> 不同流量下横断面流速变化情况

1) 0 株/m<sup>2</sup>

分别计算由尾部闸门控制的当流量分别为 50 L/s、60 L/s 两个流量梯度下的平均流速。因为断面对称布置的，故纵断面 4 对称纵断面 2，纵断面 5 对称纵断面 1。所以在实际测量中，只测量了纵断面 1、纵断面 2、纵断面 3 的流速数据。做出流速分布图，如图 10 所示。

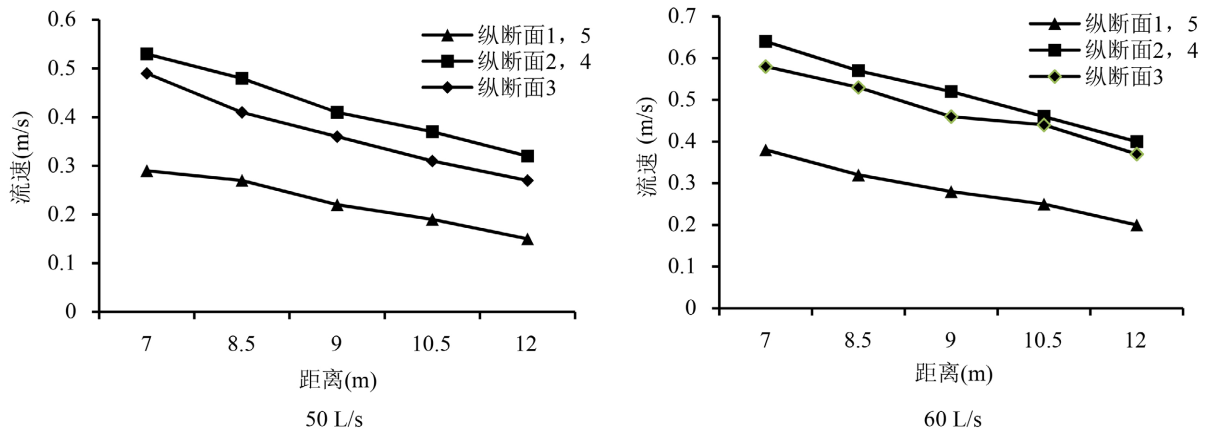


Figure 10. Velocity change of longitudinal section under different flow rate of 0 plants/m<sup>2</sup>

图 10. 0 株/m<sup>2</sup> 不同流量下纵断面流速变化情况

由图分析可知，两种流量情况下，各个纵断面平均流速呈现逐渐平缓且减小的趋势。纵断面 1、5 处由于存在边壁阻力的原因，流速低于其他纵断面。纵断面 3 处流速大于其他纵断面，且纵断面 2、纵断面 3、纵断面 4 之间流速变化幅度差距较小。流量为 50 L/s 时，纵断面 1 (5)与纵断面 3 的流速变化幅度为 0.24，纵断面 2 (4)与纵断面 3 的流速变化幅度为 0.03。流量为 60L/s 时，纵断面 2 (4)与纵断面 3 的流速变化幅度为 0.04，纵断面 1 (5)与纵断面 3 的流速变化幅度为 0.28。

2) 54 株/m<sup>2</sup>



分别绘制流量组别为在 50 L/s 和 60 L/s 情况下各个纵断面流速的变化情况。如图 11 所示。

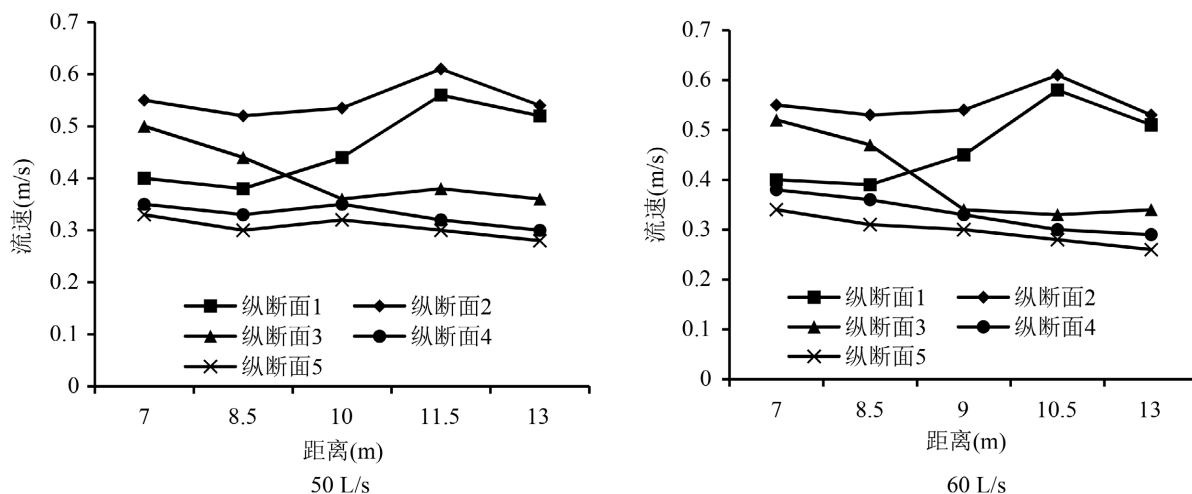


Figure 11. Velocity change of longitudinal section under different flow rate of 54 plants/m<sup>2</sup>

图 11. 54 株/m<sup>2</sup> 不同流量下纵断面流速变化情况

由图分析可知, 相较于无植株时各个纵断面流速分布规律变化较大, 但两种流量组别情况下整体规律类似。从整体来看, 纵断面 3、纵断面 4、纵断面 5 由于受到植被群落阻力的原因, 流速变化呈现下降或者略微上升的趋势; 同时, 纵断面 1、纵断面 2 在进入植被群落后, 流速明显大于纵断面 3、纵断面 4、纵断面 5, 这说明纵断面 3、纵断面 4、纵断面 5 受到植被阻力的原因。当流量为 50 L/s 时, 有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.1, 无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.14。当流量为 60 L/s 时, 有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.1, 无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.15。

### 3) 108 株/m<sup>2</sup>

分别绘制流量在 50 L/s 和 60 L/s 情况下各个纵断面流速的变化情况。如图 12 所示。

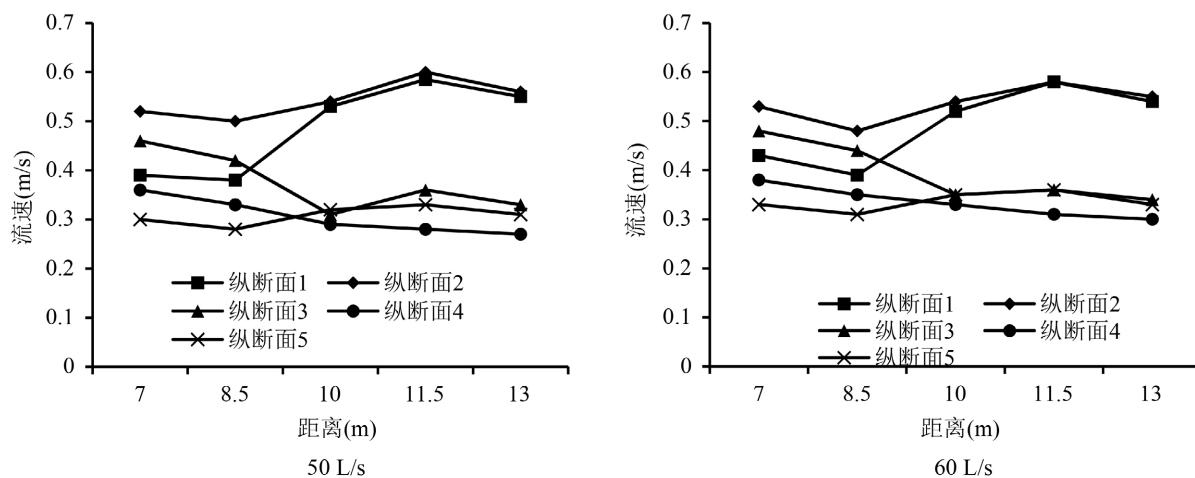


Figure 12. Velocity change of longitudinal section under different flow rate of 108 plants /m<sup>2</sup>

图 12. 108 株/m<sup>2</sup> 不同流量下纵断面流速变化情况

由图分析可知, 相较于 54 株/m<sup>2</sup>, 流速分布规律相似但变化幅度逐渐增大。纵断面 3、纵断面 4 呈现

下降的趋势,纵断面 5 先下降在进入植株群落后有上升趋势后继续下降,纵断面 1、纵断面 2 有逐渐上升的趋势。在进入植被群落后,纵断面 3、纵断面 4、纵断面 5 流速小于纵断面 1、纵断面 2 流速,而且这中间的流速幅度变化差相较于 54 株/m<sup>2</sup>有扩大的趋势,说明此时受到了更多的植被阻力。纵断面 5 在进入植被群落后流速高于纵断面 4,说明此时有植株边壁处的植被阻力已经超过了边壁阻力。当流量为 50 L/s 时,有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.06,无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.17。当流量为 60 L/s 时,有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.06,无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.14。

4) 202 株/m<sup>2</sup>

分别绘制流量在 50 L/s 和 60 L/s 情况下各个纵断面流速的变化情况。如图 13 所示。

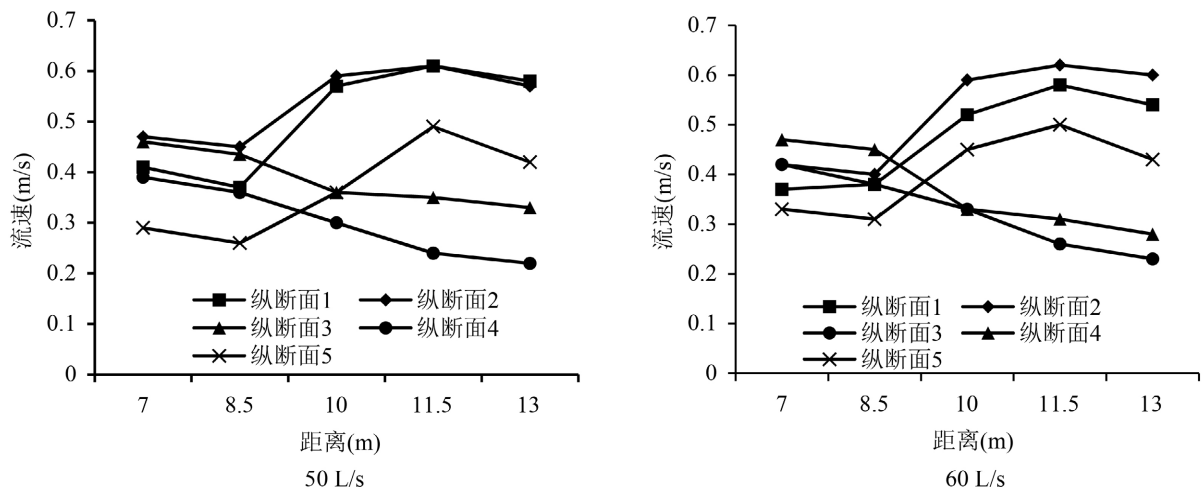


Figure 13. Velocity change of longitudinal section under different flow rate of 202 plants /m<sup>2</sup>

图 13. 202 株/m<sup>2</sup> 不同流量下纵断面流速变化情况

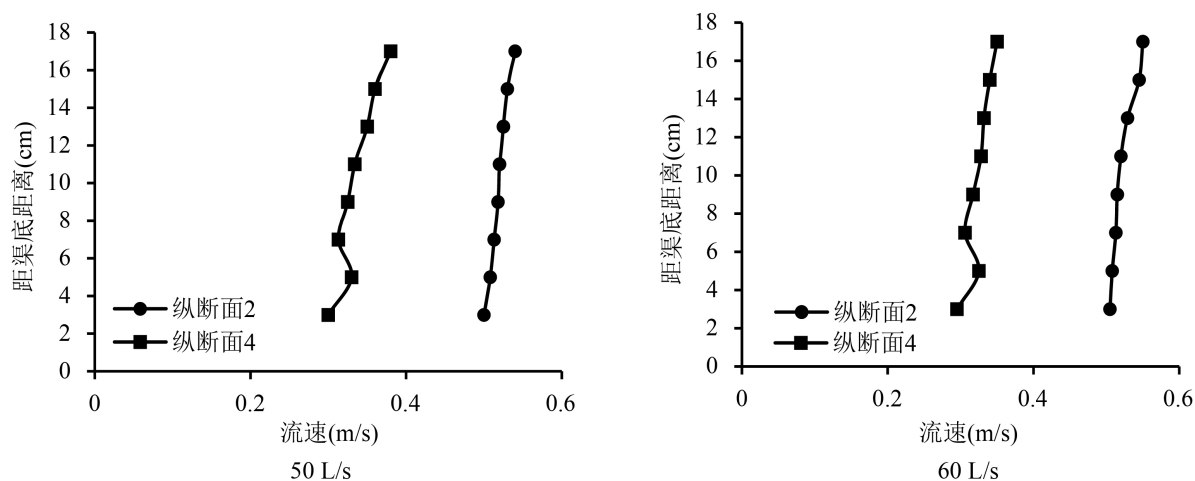
由图分析可知,各纵断面流速变化幅度进一步扩大,尽管个别断面有差异但整体情况类似。纵断面 3、纵断面 4 呈现下降的趋势,纵断面 5 先下降在进入植株群落后有上升趋势后继续下降,纵断面 1、纵断面 2 有逐渐上升的趋势。在进入植被群落后,纵断面 3、纵断面 4、纵断面 5 流速小于纵断面 1、纵断面 2 流速。此时植株群落内各纵断面流速变化幅度相较于 108 株/m<sup>2</sup>呈现扩大的趋势且无植株群落纵断面 1、纵断面 2 流速变化幅度也更为剧烈。植株群落边壁处纵断面 5 在进入植株群落后流速高于纵断面 3、纵断面 4,说明此时受到的植株阻力以及远远大于边壁阻力。当流量为 50 L/s 时,有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.08,无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.17。当流量为 60 L/s 时,有植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.05,无植株群落纵断面内流速变化幅度为 0.14。

3.4. 垂向流速分布

考虑水流流速的稳定情况,结果能很好的反应垂向流速的变化情况。故选取横断面 4、纵断面 2、纵断面 4 代表无、有植被群落区域。分析在植株密度为 54 株/m<sup>2</sup>、128 株/m<sup>2</sup>、202 株/m<sup>2</sup>时分析垂向流速情况。

1) 54 株/m<sup>2</sup>

分别对流量在 50 L/s、60 L/s 两种流量情况下,从渠底到水面,间距 2 cm 垂直 8 个测点,分析其流速平均值。结果如图 14 所示。



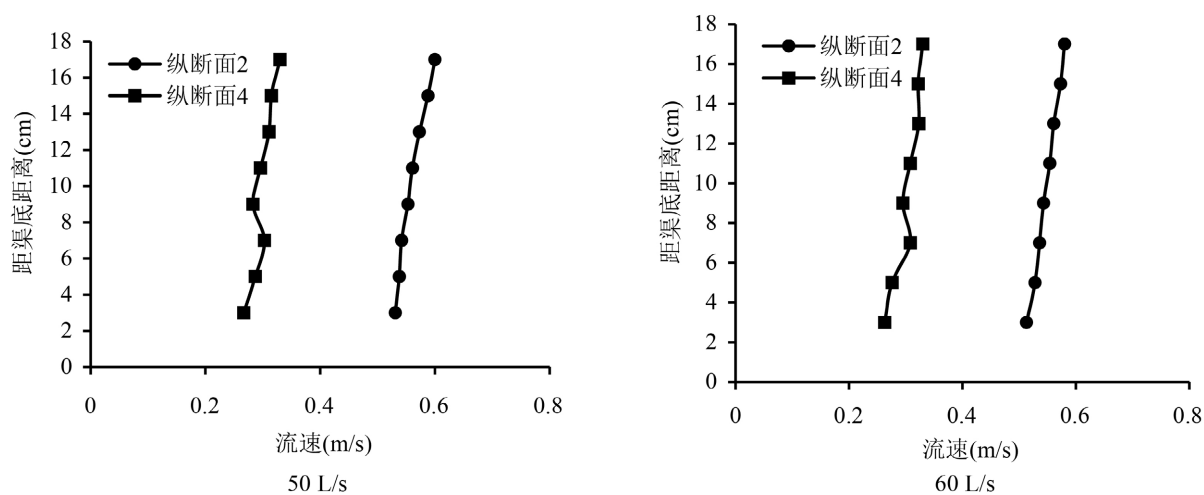
**Figure 14.** Velocity change of vertical section under different flow rate of 54 plants/m<sup>2</sup>

**图 14.** 54 株/m<sup>2</sup> 不同流量下垂直断面流速变化情况

结果表明：对于无植被种群断面处，水流流速从渠底到水面逐渐增加，波动性较弱，近似为一条直线；而对于有植被种群断面处，水流流速变化波动性较强，流速从渠底到水面呈现“S”型曲折上升的趋势。分析原因，水流流速受到植株自身结构和群落密度共同影响产生阻力导致水流流速出现近“S”型分布。两种流量情况下在有植株各测点流速均小于无植株处流速。

#### 2) 108 株/m<sup>2</sup>

分别对流量在 50 L/s、60 L/s 两种流量梯度情况下，计算分析其流速变化。结果如图 15 所示。



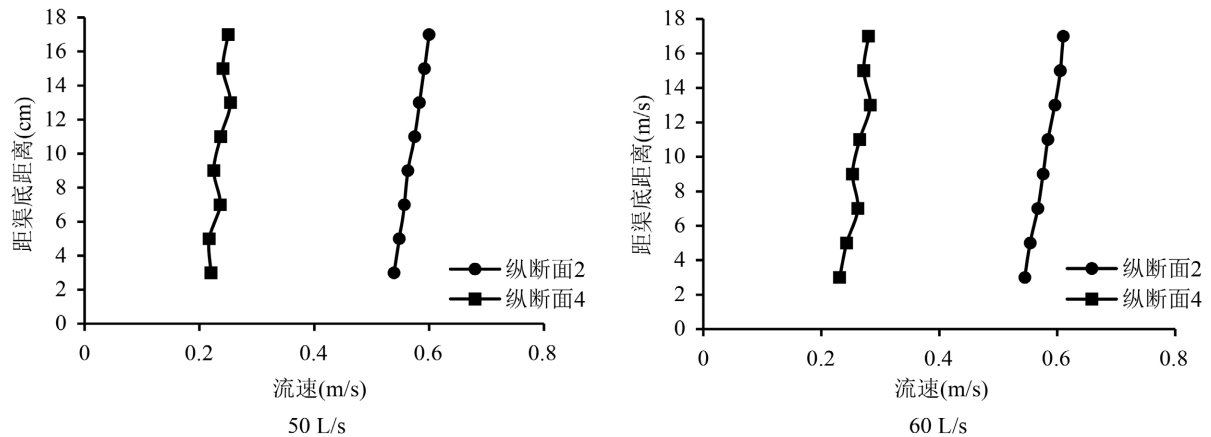
**Figure 15.** Velocity change of vertical section under different flow rate of 108 plants/m<sup>2</sup>

**图 15.** 108 株/m<sup>2</sup> 不同流量下垂直断面流速变化情况

结果表明，对于无植被种群断面处，水流流速从渠底到水面呈现一种线近似性增加的趋势，此时水流流速波动性较弱；而对于有植被种群断面处，水流流速呈现“S”型曲折上升的趋势，且此时波动性相较于 54 株/m<sup>2</sup> 波动性更剧烈。分析原因，此时随着植株密度的增加，水流受到的植株阻力更大，导致出现“S”型的流速分布。两种流量情况下有植株断面各测点流速均小于无植株处测点的流速。

3) 202 株/m<sup>2</sup>

分别对流量在 50 L/s、60 L/s 两种流量梯度情况下, 计算分析其流速变化。结果如图 16 所示。



**Figure 16.** Velocity change of vertical section under different flow rate of 202 plants/m<sup>2</sup>

**图 16.** 202 株/m<sup>2</sup>不同流量下垂直断面流速变化情况

结果表明, 对于无植被种群断面处, 水流流速波动性较弱从渠底到水面近似为一条平滑的曲线呈现逐渐增加的趋势。而对于有植被种群断面处, 水流流速波动性很强, 相较于前两种情况, 流速分布呈现不规则的“S”型曲折上升的趋势。分析原因, 此时植株密度进一步增大, 水流受到很大的植株阻力影响, 使得渠底处流速发生变化, 流速变化进一步呈现复杂的趋势。两种流量情况下有植被断面各测点流速均小于无植株处测点的流速。

对比赵春霞(2021)的研究[11], 沿程水位变化基本一致, 且本文除了垂向流速研究以外, 还增加了横向和纵向流速研究, 从而得出整个河道水流结构影响。

#### 4. 结论

基于水工实验首先研究了植株群落结构和水流结构之间的关系, 确立植被群落结构和水流相互作用力的生态水力学机制方程, 理论分析了影响水流结构的相关因素, 模拟了不同密度下植被种群对河道水流流速的影响。主要结论有:

1) 在不同植株密度条件下的沿程水位变化: 当无植物时, 沿程的水位变化呈现逐渐增加的趋势, 此时的水位变化曲线在水力学中称为  $M_1$  型曲线。随着植株密度的增加, 其水位波动的幅度进一步增加。

2) 由四种植被植株密度下各个横纵断面流速分布可知, 植株密度为 108 株/m<sup>2</sup>时, 此时两种流量情况下流速变化幅度接近一致。所以当植株密度为 108 株/m<sup>2</sup>时的植株缓流效果最好; 由三种植被植株密度下各个测点垂向流速分布可知, 无植株群落处从渠底到水面处流速分布呈现近似一条直线逐渐上升的趋势; 而有植株群落处从渠底至水面呈现“S”型曲线分布, 且随着植株密度的增加, 波动性越来越剧烈, 有植株处各测点的流速均小于无植株处的流速。

3) 比较不同密度下顺水流方向、横向、垂向流速变化, 发现植株密度为 108 株/m<sup>2</sup>时对水流的缓流效果较为理想。可以将其应用与水库上游两岸的植被修复设计方案中, 该密度下的植被群落修复也被应用于一般湖泊湿地的生态修复中。

#### 基金项目

陕西水利科技计划项目(2019slkj-B1)。

## 参考文献

- [1] 王子建, 丁雪, 吉庆丰. 含刚性沉水植物明渠水流结构的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 78-83.
- [2] Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., *et al.* (2014) Fluvial Sediment Budget of a Modern, Restrained River: The Lower Reach of the Rhine in Germany. *Catena*, **122**, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.007>
- [3] Huai, W.X., Chen, Z.B., Han, J., *et al.* (2009) Mathematical Model for the Flow with Submerged and Emerged Rigid Vegetation. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, **21**, 722-729. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60205-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60205-X)
- [4] 王雯, 槐文信. 刚性淹没双层植被明渠水流紊流特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1): 61-67.
- [5] Yang, W. and Choi, S.U. (2010) A Two-Layer Approach for Depth-Limited Open-Channel Flows with Submerged Vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, **48**, 466-475. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.491649>
- [6] Nepf, H. and Ghisalberti, M. (2008) Flow and Transport in Channels with Submerged Vegetation. *Acta Geophysica*, **56**, 753-777. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0017-y>
- [7] Chen, S.C., Kuo, Y.M. and Li, Y.H. (2011) Flow Characteristics within Different Configurations of Submerged Flexible Vegetation. *Journal of Hydrology*, **398**, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.018>
- [8] Yang, Z.H., Bai, F.P., Huai, W.X., *et al.* (2017) Modelling Open-Channel Flow with Rigid Vegetation Based on Two-Dimensional Shallow Water Equations Using the Lattice Boltzmann Method. *Ecological Engineering*, **106**, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.039>
- [9] Liu, D., Diplas, P., Hodges, C.C., *et al.* (2010) Hydrodynamics of Flow through Double Layer Rigid Vegetation. *Geomorphology*, **116**, 286-296. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.024>
- [10] Tan, C., Huang, B.S., Liu, D., *et al.* (2019) Effect of Mimic Vegetation with Different Stiffness on Regular Wave Propagation and Turbulence. *Water*, **11**, 109. <https://doi.org/10.3390/w11010109>
- [11] 赵春霞. 含刚性植被明渠水流动力学特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.