

# Effect of Bending Deformation of Submerged Flexible Vegetation on Flow Characteristics

Meng Wang<sup>1</sup>, Liquan Xie<sup>1</sup>, Yanhong Li<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Email: 1551642538@qq.com, xie\_liquan@tongji.edu.cn, yyhli@sjtu.edu.cn

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 19<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

To study the influence of bending deformation of submerged flexible vegetation on water flow, model tests were carried out in an indoor water flume. The special aluminum flakes were used to simulate the bending deformation of submerged flexible vegetation. And the models in a single plant, lateral arrangement and longitudinal arrangement were tested under five different flow conditions. The results show that the flexible vegetation causes the water flow eddies in different degrees on the backwater side and have different hindering effects between the stem and crown regions. Effect of the stem is much less than the crown regions. At the same time, the range of influence changes with bending deformation of the vegetation.

## Keywords

Ecological Water Conservancy, Flexible Vegetation, Flow Characteristics, Vegetation Distribution

# 弯曲水生植物周围的水流变化特征研究

王 梦<sup>1</sup>, 谢立全<sup>1</sup>, 李艳红<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院水利系, 上海

<sup>2</sup>上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海

Email: 1551642538@qq.com, xie\_liquan@tongji.edu.cn, yyhli@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2019年10月19日; 录用日期: 2019年11月12日; 发布日期: 2019年11月19日

## 摘 要

为了研究弯曲水生植物对水流影响机制,开展室内水槽试验。试验利用特制金属铝片模拟弯曲水生植物,

\*通讯作者。

并在5种不同流量工况下分别对单棵水生植物、横断面分布和纵向布置多种工况下的群体水生植物进行了试验。结果表明,弯曲的水生植物会使得水流在其背水侧产生不同程度的漩涡并且对水流产生阻碍作用,并在茎部和冠部区域处产生不同影响,其中茎部影响要远小于冠部的影响,同时影响的范围会随着植物的弯曲变形发生变化。

## 关键词

生态水利, 弯曲植物, 水流特征, 植物分布

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

水生植物,作为河流等生态系统的重要组成部分,广泛存在于绝大多数水利工程设施周围。保护水生植物可以改善河流、湖泊等水环境泥沙情况,减少水土流失,稳定河道。因此,水生植物对水流的影响作用研究,可以更好地对植物生态环境进行保护,同时能够根据这一影响状况更好地进行水利工程建筑物的设计。然而,由于水生植物的存在,河道的阻力特性、水流结构特性较传统的河工型河道发生了很大改变。随着河道修复工程的广泛应用,生长植物的河道水动力特性研究将越来越受到人们的重视,但由于水流问题与植被本身的复杂性,仍有许多研究工作亟待开展[1]。水生植物多种多样,不同的植物类型、植物规模以及分布情况都会对水流产生不同的影响。其中,在水流作用下植物本身是否会发生较大的弯曲形变,即刚性植物与柔性弯曲植物,也会对水流产生不同的影响效应,并且具有一定柔性的弯曲水生植物对于水流的影响更为复杂[2][3]。

当水流经过植物时,这些植物势必会对水流产生一定的阻碍作用,使得水流不再呈现正常的连续状态,进而产生阻力。根据相关研究,水生植物对于水流的这一影响要比许多其他因素要大得多。从20世纪开始,就有许多研究以此进行[2]-[8],其主要通过以下两种方法,一是通过对植被进行受力分析得出植被的阻力特性,如拖曳力参数的引入;另一种是通过增大表征河道粗糙程度的糙率系数(如曼宁系数、达西魏斯巴赫系数和谢才系数)。糙率系数可以很好的衡量河床的粗糙程度及边壁形状不规则引起的水流阻力,目前对糙率系数的研究立足点主要集中在河道糙率系数的估算、对曲线的修正以及糙率系数与植被属性关系上[9]。在这两种思路上,现有研究方法主要通过物理模型试验与数值模拟两种途径,并以物理模型试验居多。时钟、李艳红[10]通过水槽中布置水生植物,量取多个断面上的测点垂线流速数据,分析了水流流速、相对摩阻流速以及曼宁糙率系数的沿垂线方向的分布,以及它们随植物密度而变化的规律。王忖[11]对有柔性植物河道的水流情况作了较为系统的研究。量测了不同流量下不同位置的相关数据。重点对滩槽交界区域的垂线流速、紊动强度和雷诺应力的变化进行了分析。刘锋[12]等通过室内水槽实验,将装饰用的绿色塑料树比作沙棘等柔性植物,研究了植物对水流和泥沙运动的作用。拾兵[13]模拟复式河床在边滩部位安放乔木、灌木和草木为模拟植物,分析了有无植物情况的流速分布和相对雷诺应力,并得出结论,植物使水位上升,并预示将对由雷诺应力分布观察到得“第二边界层”切应力进行考虑分析。

因此,在此基础上,本文对弯曲水生植物周围的水流特征进行研究,制作具有一定长度茎部和一定大小冠部的水生植物模型,模拟不同尺寸的单个植物以及不同平面分布方式的植物群体在不同大小的流量下其本身的变形情况,测出模型周围流场分布情况,总结其对于水流的影响作用。

## 2. 试验设计

### 2.1. 模型制作

本实验中利用特制“倒凸”型的金属铝片来代替真实水生植物，并通过弯折底端的一部分将其固定在长钢条上，放置于水槽底部。实验制作的模型与实际理想中的水生植物的几何尺寸对应关系如图 1~2 所示：

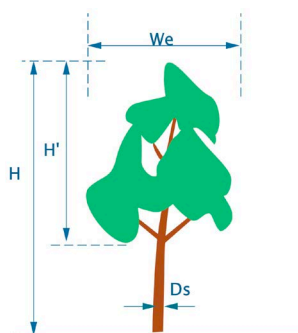


Figure 1. The size of real plant

图 1. 真实植物尺寸

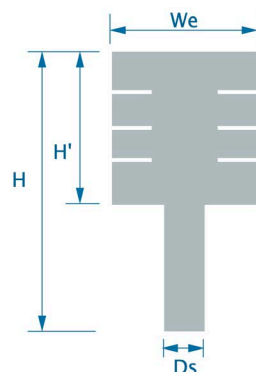


Figure 2. The size of test model

图 2. 试验模型尺寸

实验中采用两种几何尺寸植物模型进行水槽试验，其具体尺寸见表 1。两种模型的设计，主要是对比模型植物茎部直径的影响。

Table 1. The model size

表 1. 模型尺寸

模型尺寸(cm)	We (冠部直径)	H' (冠部高度)	H (植株高度)	Ds (茎部直径)
①	9	7	16	4.0
②	9	7	16	2.5

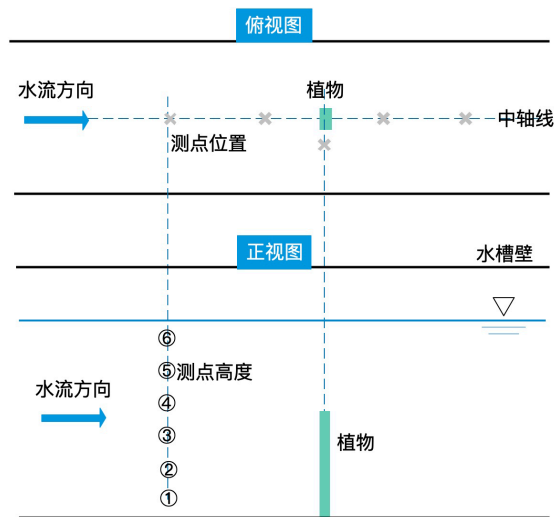
### 2.2. 试验方案

试验分别对单株植物以及两种不同排布方式的群体水生植物模型进行研究，试验共完成了 5 组流量工况下的研究，具体工况如表 2。

**Table 2.** The test conditions  
**表 2.** 试验工况

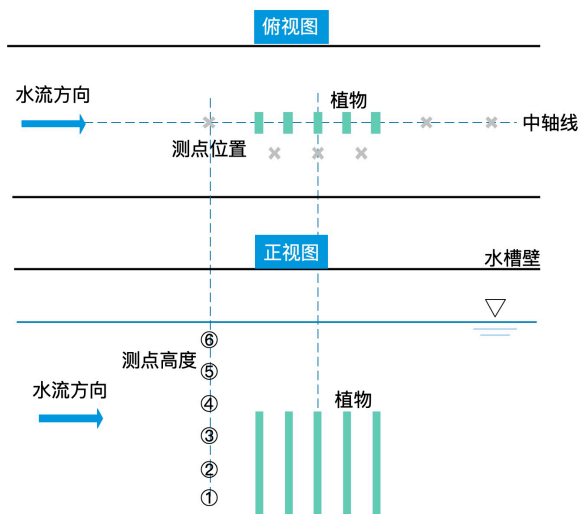
工况编号	T1	T2	T3	T4	T5
造流流量(L/s)	40	80	120	160	200

**1. 单株植物模型试验设计:** 针对两种不同尺寸模型进行单株模型试验, 利用三维流速仪测量植物周围流场情况。试验布置及测点如图 3 所示(植物旁边的测点位置距植物 5 cm, 其余测点位于植物中轴线上)。每个测点位置, 在垂线上测试 6 个点的流速。



**Figure 3.** The layout of measure points for single plant  
**图 3.** 单株植物测点布置图

**2. 群体植物模型试验设计:** 对于群体植物的试验设计, 选取模型尺寸编号②的五株试验模型, 分别进行横断面布置和纵向布置, 试验布置及测点如图 4、图 5 所示。



**Figure 4.** Measure points for longitudinally arranged plants  
**图 4.** 植物纵向分布测点布置图

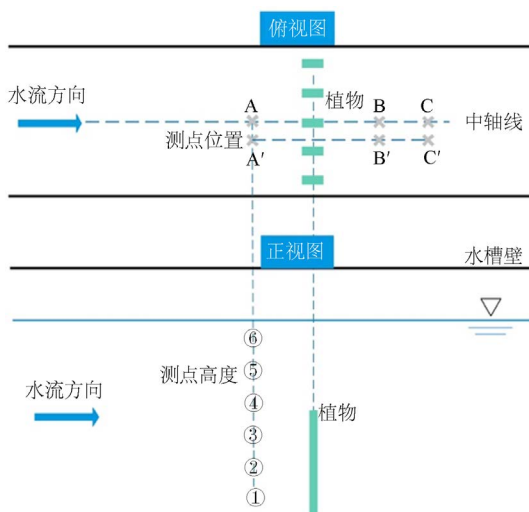


Figure 5. Measure points for laterally arranged plants  
图 5. 植物横向分布测点布置图

利用金属铝片进行模型试验，可以在实验中较为方便地大量制作所需要的固定尺寸的模型，金属的铝片弹性足以使模型在试验所设计工况发生弹性弯曲并且在水流停止后回弹返回初始的竖直设计状态。同时为了模拟水生植物冠部的枝叶的空隙透水现象，在植物模型的冠部两侧分别裁剪出了若干缝隙以更加接近真实植物情况。

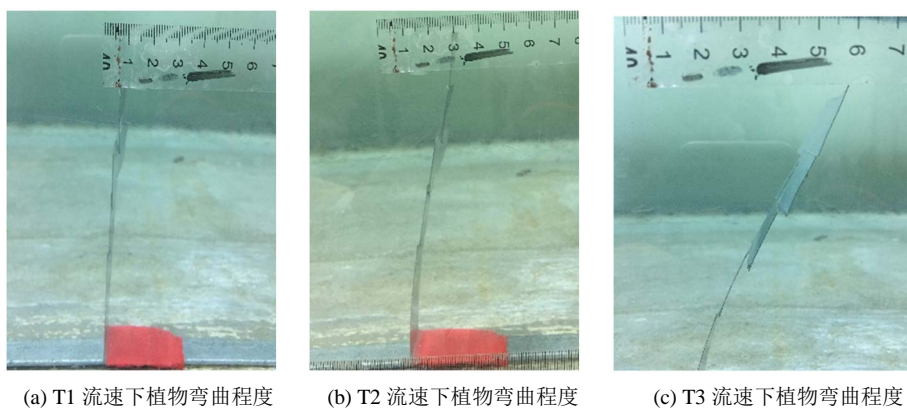
### 3. 结论与分析

#### 3.1. 单株水生植物对水流的影响作用结果分析

单株植物情况下，随着水流流速的增大，植物弯曲程度不断增大，图 6 显示了不同流量工况下的植物模型弯曲程度。

单株植物情况下，植物模型对周围水流的影响主要表现为阻水作用以及植物背水面涡旋的产生，以下图 7(a)~(e)为模型①在 T1~T5 工况下各个测点的流速矢量图。

分析图 7(a)~(e)可以看出，流量增大，水流流速也越大，对植物的弯曲形态也产生直接影响。流量较小时，植物模型迎水面对水流产生的反作用较大，会在迎水面产生较为较小的涡流。随着流量增大，植物弯曲趋近于流线型，因此对水流的反作用效果大大降低。同时，随着流量的增大，迎水面与上游的流速变化渐渐减小。



(a) T1 流速下植物弯曲程度

(b) T2 流速下植物弯曲程度

(c) T3 流速下植物弯曲程度

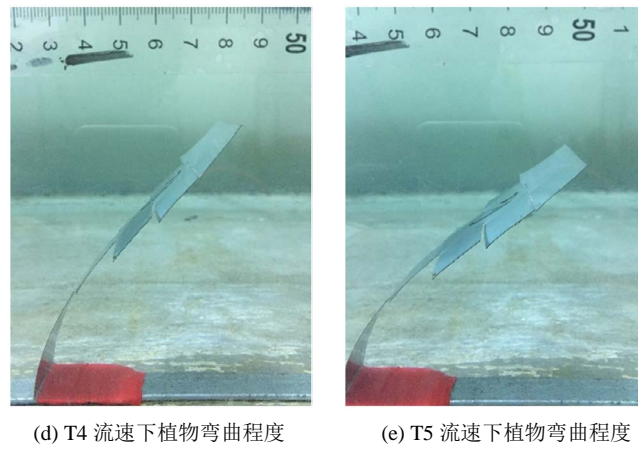
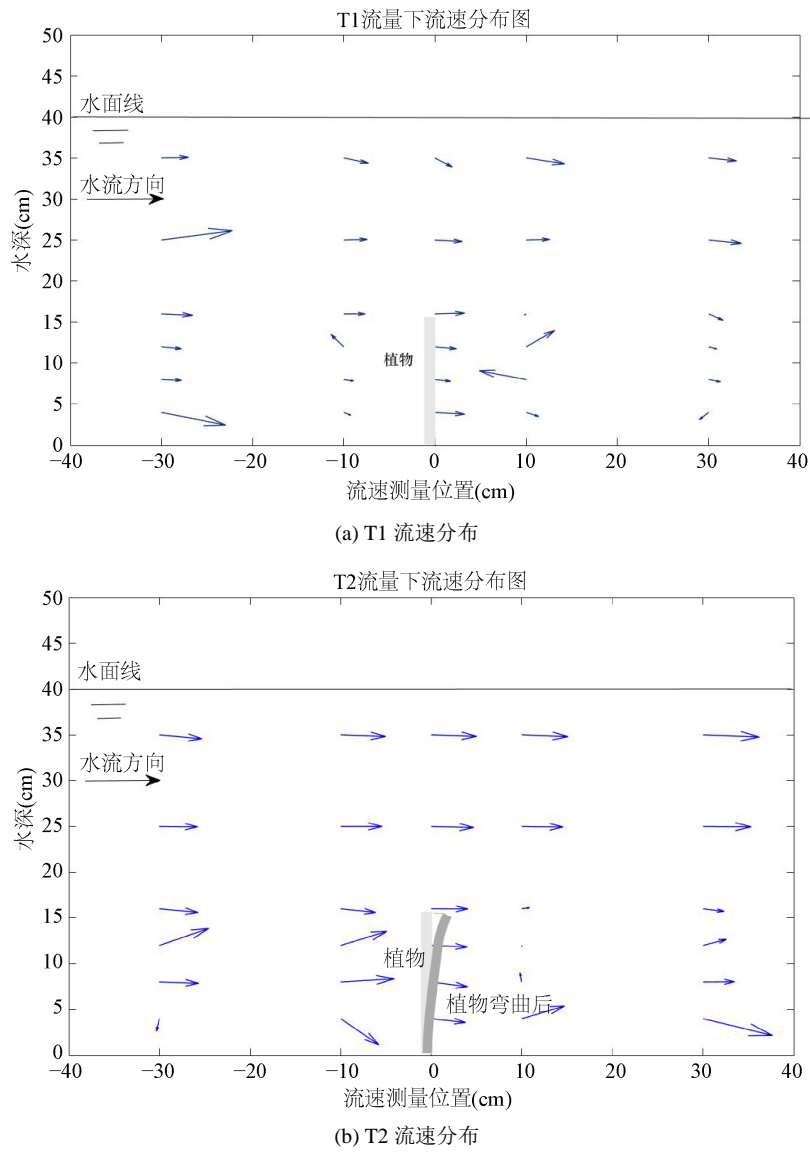
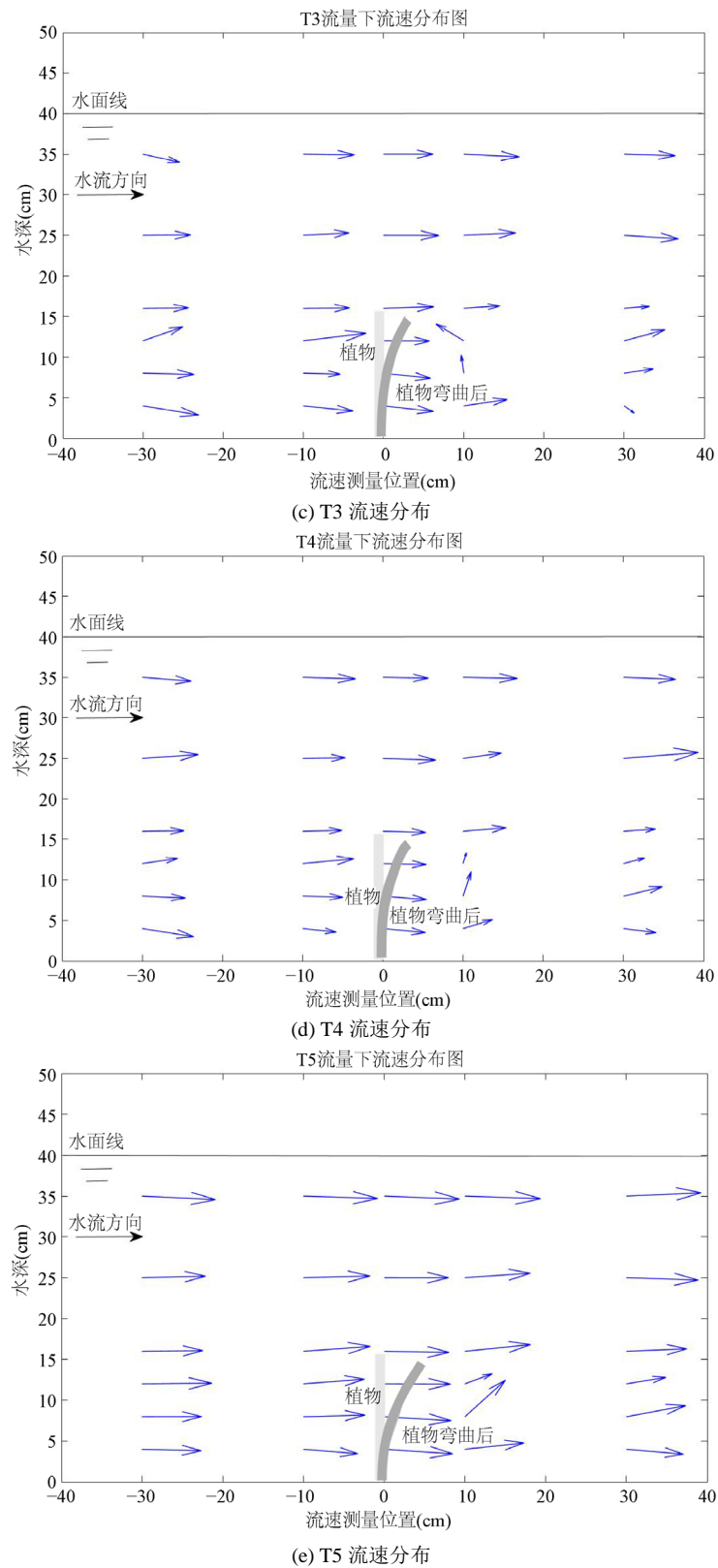


Figure 6. The curvature degree of model ① under T1-T5 test conditions  
图 6. 模型①在 T1~T5 工况下弯曲程度





**Figure 7.** Velocity profile of model ① under T1-T5 test conditions

**图 7.** 模型①在 T1~T5 工况下流速分布图

由于植物模型冠部面积较大，茎部面积较小，在植物背水面，受冠部影响的区域水流只能从宽度上较远的边缘绕流通过或是从模型冠部剪开的缝隙中通过，因此会在冠部与茎部交界处形成漩涡。同时，随着流量的增大，植物呈现出流线型，植物背水面产生漩涡程度逐渐减小，水流逐渐趋于平缓。此外，对比图 7(a)~(e)也可以发现，随着工况流量的增大，植物逐渐发生弯曲，并且弯曲角度越来越大，同时植物弯曲后的有效高度减少，因此在背水面和下游两个断面上受到植物影响范围深度也逐渐减小。

模型②的试验测试结果，与模型①类似，但因其茎部的宽度减小了 37.5%，因此在同样的工况下，其发生的弯曲将更大，同时茎部更细对水流的影响相较①来得更小。在植物冠层以上的表层区域，因不直接受到植物影响(特别是植物冠部)，两者水流流速较为接近。

### 3.2. 群体水生植物对水流的影响作用结果分析

群体水生植物试验分别对植株纵向沿程均匀分布、植株横向并行排列进行了系列试验，图 8、图 9 给出其试验时的植物弯曲照片。下面分别对两类植株排列工况的结果进行分述与水流特征总结。



Figure 8. The test of longitudinally arranged plants  
图 8. 植物沿程纵向排列模型试验

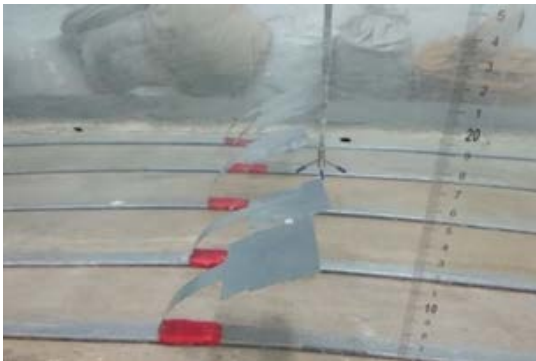


Figure 9. The test of laterally arranged plants  
图 9. 植物横向排列模型试验

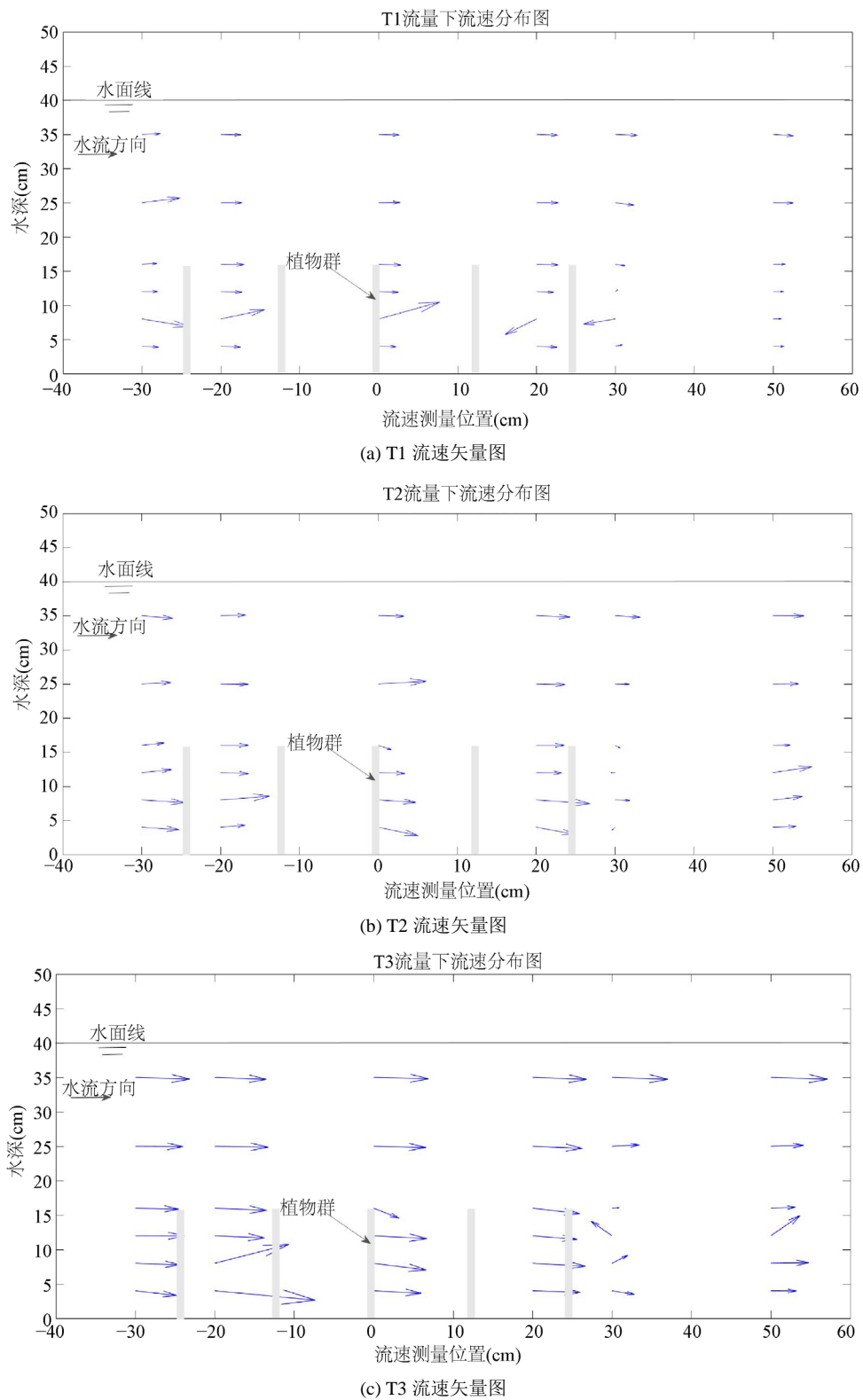
#### 3.2.1. 沿程纵向分布情况

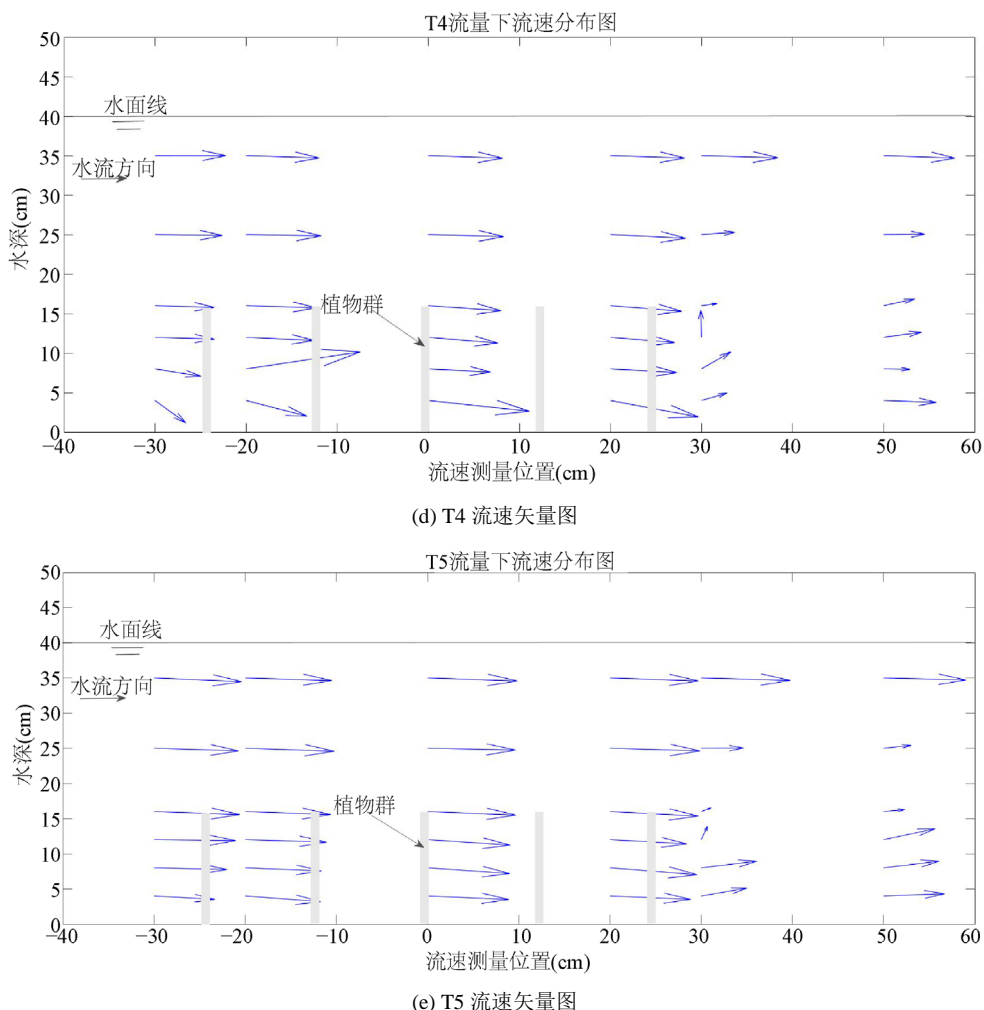
与单株植物的影响作用相比，沿程纵向的群体水生植物情况要复杂得多。除了位于队列最前端的植物的迎水面是与单株的情况相同之外，位于后列的植物的迎水面都将不同程度地受到前者的尾流的影响。

从图 8 可见，在中间段的植物弯曲程度受其前后植物影响，产生不同程度弯曲。位于队列最尾端的植株由于其下游无植物，其下游水流更为流畅，所以植物也就受到更大的水流作用力，产生更大的弯曲。同时在试验过程中，还观察到下游的几棵植株都在发生一定周期的小幅摆动。



图 10 给出了五个流速工况下的垂线流速测试结果。从图可见，植物侧面流速状况与单株植物相似，但植物冠部以上区域水流的流速明显增大，且最后一株植物下游均存在不规则的横轴漩涡。





**Figure 10.** Velocity profile of longitudinally arranged plants under T1-T5 test conditions  
**图 10.** 沿程纵向排列植物在 T1~T5 工况下流速分布图

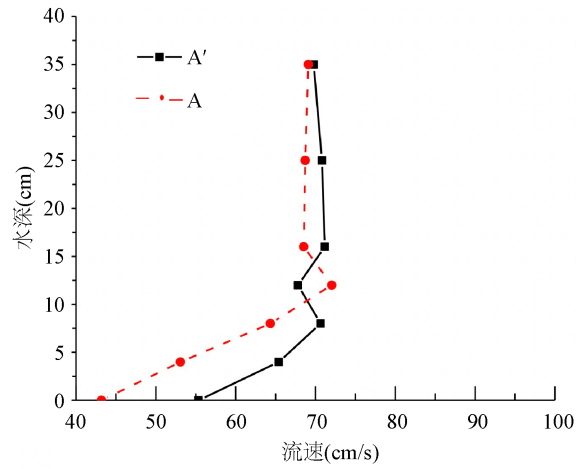
可以得出，沿程纵向排布的植物，由于其冠部对水流的阻碍作用会层层叠加，将会远大于单个植株的阻水作用，植物冠部以上的流速有所增大；而茎部影响区域阻水作用相对小得多，且沿程方向上形成了阻力较小的通道，使得该区域的水流影响很小。同时，位于中间段的植物，由于前后植物间隙中产生的涡流，因此发生周期性的摆动。

### 3.2.2. 横断面分布

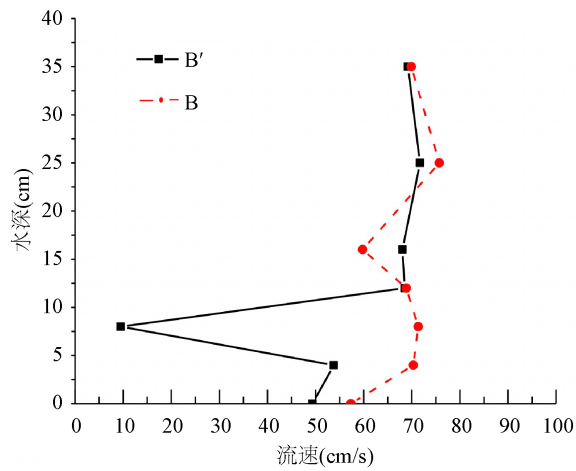
与单株、植株纵向排列的情况相比，并排排列的状态下关键是要研究相邻两棵植株之间的间隙会对水流产生不同的影响效果。在如图 6 所示的实验中，我们测量了植物中轴线与植物间隙中的各点流速情况。横断面排列植物在工况 T5 的各测点结果如图 11(a)~(c)，其中横坐标为所测点的流速(单位 cm/s)，纵坐标为测点深度(单位 cm)。

从图 11 可以看出，植物冠部以上区域，因距离植物较远，植物对水流产生影响较小，中轴线与间隙处的水流流速近似相等。在植物的迎水面上，由于植物冠部与茎部交界处影响，黑色曲线普遍高于红色曲线，即间隙处流速大于中轴线。在植物背水面，水流绕植物流过，产生漩涡，对流速产生影响，导致红色曲线普遍高于黑色曲线，即中轴线上流速大于两侧。该流速分布可以看出，并排植物群下游的流速

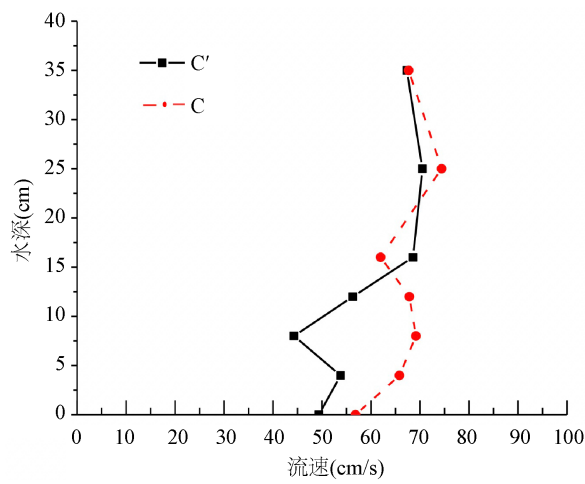
分布因多个横轴漩涡的复杂作用而变得紊乱。



(a) A、A'流速分布



(b) B、B'流速分布



(c) C、C'流速分布

Figure 11. Velocity distribution under T5 test condition

图 11. 横断面排列植物在工况 T5 各点流速分布

## 4. 结论

(1) 单株弯曲水生植物对于水流的影响, 主要产生在植物的背水面以及下游部分, 其迎水面及上游部分影响较小, 且冠部周围的影响强于茎部。随着流速的增大, 植物弯曲过后将导致对水流的影响深度变小。

(2) 沿程纵向排列水生植物对于水流的阻碍作用, 总体大于单个植物。在植株群内部, 纵向排列植物之间会产生衰减保护作用, 靠后植株受到的水流冲刷作用变小, 且中间段植株在植株群上下游漩涡作用下往往呈现为周期性的摆动。

(3) 沿横断面布置的植物, 使得水流过流面积减少, 断面收缩而流速增大, 尤其是植物冠部以上区域、相邻植物之间空隙处的流速显著增大, 但其下游的流速分布因多个横轴漩涡的复杂作用而变得紊乱。

## 致 谢

本论文受国家自然科学基金(项目批准号: 51479109, 51479137)的资助, 在此向国家自然科学基金委致谢!

## 参考文献

- [1] 吴一红, 郑爽, 白音包力皋, 穆祥鹏. 含植物河道水动力特性研究进展[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 123-129.
- [2] 李艳红, 谢立全. 含淹没水生植物冠层的水流时均流速分布研究进展[J]. 海洋科学前沿, 2018, 5(4): 155-162.
- [3] Li; Y.-H., Xie, L.Q. and Su, T.-C. (2018) Resistance of Open-Channel Flow under the Effect of Bending Deformation of Submerged Flexible Vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, **144**, Article ID: 04017072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001419)
- [4] 宋为威, 周济人, 奚斌. 含植物河道水流紊动特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 209-213.
- [5] 渠庚, 张小峰, 陈栋, 陈静婷, 丁兵. 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.
- [6] 丁瑞, 洪大林, 姬昌辉. 含沉水植物河道水流流速特性研究[J]. 吉林水利, 2012(3): 9-13.
- [7] Righetti, M. (2008) Flow Analysis in a Channel with Flexible Vegetation Using Double-Averaging Method. *Acta Geophysica*, **56**, 801. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0032-z>
- [8] 黄文沛. 非淹没刚性植被对水流阻力和水流能量特性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [9] 李晶, 张敏霞. 生态水力研究进展[A]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集(上卷). 北京: 中国环境出版社. 2008: 764-768.
- [10] 时钟, 李艳红. 含植物河流平均流速分布的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1254-1260.
- [11] 王付. 有植被的河道水流试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2003.
- [12] 刘锋, 邱秀云, 周著, 等. 植物“柔性坝”在不同底坡下水流特性的试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2005(3): 56-60.
- [13] 焦志洋, 拾兵, 朱玉伟, 等. 复式河道滩地植物对水流紊动结构影响的试验研究[J]. 海洋湖沼通报, 2006(1): 28-36.