

# Progress on Velocity Profile in Water Flow with Submerged Vegetation Canopy

Yanhong Li<sup>1</sup>, Liquan Xie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

<sup>2</sup>Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: yyhli@sjtu.edu.cn

Received: Dec. 1<sup>st</sup>, 2018; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 25<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Macrophyte of submerged vegetation canopy in water flow can provide habitat, food, and play environment for all kinds of aquatic fauna. It can purify the flow and improve water quality by absorbing fine particles of pollutant and releasing oxygen as well. Consequently, it has substantial significance for river, lake and coast to protect, restore and improve their ecological environments. The issue of environmental fluid mechanics in the submerged vegetated flow has obtained more and more concerns. The vertical profile of the time-averaged mean velocity is one of the fundamental studies, because it is directly related to the issues of resistance and mass transport in flow. The present paper describes the velocity profile in three categories: logarithmic law, inverse tangential or hyperbolic profile with inflection point, and the superposition of segments of mixing profiles. The main characteristics and application situations of these three profiles are summarized, and the future advances of the development of velocity profile are presented based on its forming mechanics: turbulent structures and momentum mixture. The present paper aims at providing assistances in the management and restoring of the ecological environment for engineers, and in the distinguishment of fundamental scientific issues for researchers.

## Keywords

Submerged Vegetation Canopy, Profile of Flow Velocity, Environmental Fluid Mechanics

---

# 含淹没水生植物冠层的水流时均流速分布研究进展

李艳红<sup>1</sup>, 谢立全<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学水利工程系, 上海

Email: yyhli@sjtu.edu.cn

## 摘要

大型淹没水生植物冠层可以为各种水生生物提供栖息地、食物和游乐场所, 同时也能通过吸收细颗粒污染物和释放氧气等净化水体、提高水质, 因而对河流、湖泊和海岸生态环境的保持、修复和改善具有重要意义。其环境水动力学问题已经被全球越来越多的研究所关注, 其中一个最基本的问题是水流时均流速的垂向分布, 它直接关系到水流的阻力和质量输送。本文将流速分布形式分为三大类: 对数分布; 具有拐点的反正切和双曲形分布; 以及分段叠加混合型分布。分别对这三类分布形式的主要特征和适用特点进行概括性综述, 并根据形成的紊动和动量传递机理对其未来发展方向进行展望。该进展综述旨在为水流生态管理和修复工程提供基本思路指导, 也方便研究者高效定位科学问题。

## 关键词

淹没水生植物冠层, 水流时均流速分布, 环境水动力学

Copyright © 2018 by authors 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

河流、湖泊和海岸等天然水体环境中, 常常在水底自然生长着各种大型淹没水生植物, 这些植物在中等密度分布情况下即形成冠层(过密则形成水流底部边界, 过疏则对水流整体特征不构成影响)。淹没水生植物冠层可以为水生动物提供优质的食物、良好的栖息地和天然的游乐场所; 可以通过其大孔径的茎叶表面的吸附作用捕捉悬浮于水中的细颗粒污染物; 能够通过光合作用向水体释放氧气以净化水体; 也能够固定水流底床, 改变河床和海岸的冲蚀和演变规律, 因而是大型水体生态系统中的重要组成成分。

近年来, 随着河流、湖泊和海岸污染问题的日益突出, 大型淹没水生植物冠层对水环境的自然生态保持、修复和改善作用越来越受到关注, 所涉及的水动力学研究也逐渐成为热点问题。目前全球对含淹没水生植物冠层水流的研究主要集中在均匀、恒定流条件下进行垂向二维特征分析[1]-[10]。各研究均表明, 与无植物的水流相对比, 含淹没水生植物冠层的水流时均和紊动特征均发生了显著变化[11] [12] [13] [14] [15]。这导致时均流速的垂向分布明显不同于无植物水流: 淹没水生植物冠层的阻力使冠层内部流速降低, 且在一定的低值范围内保持定常; 而从冠层顶部开始向上直至水面附近流速迅速增加, 这使得冠层内、外两层水体流速差异很大[16]-[27]。

造成无植物和含植物两种水体流速分布差异的紊动机制在于: 在无植物的宽浅自然水体中, 水流的阻力主要来自于底床面, 其动量掺混主要起源于底床面附近的剪切和紊动, 因而时均流速的垂向分布通常可用向上平滑递增的对数分布来表达; 而在含植物冠层的水流中, 水流的阻力主要由粗糙植物冠层提供, 冠层顶部存在强剪切, 其动量掺混主要来源于这种强剪切引起的紊动, 再叠加底床面边界层紊动和植物后方尾涡紊动, 因而其时均流速的垂向分布相对较为复杂, 各研究者提出的流速分布形式也多种多样。总体上, 这些分布形式可以分为三大类: 冠层之上的对数流速分布规律; 全水深范围内具有拐点的反正切和双曲函数分布规律; 以及分段叠加的混合分布规律, 本文将这三种分布形式的研究进展分别进行综述。

## 2. 时均流速垂向分布形式研究进展

### 2.1. 冠层之上的对数流速分布规律

在冠层以上流动区域内, 有研究者观测到时均流速垂向分布仍然符合某种形式的基于 Nikuradse 水力粗糙度修正的对数规律(公式(1)), 他们认为植物冠层的存在使对数分布的零起点位置上移, 此外公式中的水力当量粗糙度( $z_0$ )和积分常数( $C$ )也发生变化。因此在 Nikuradse 公式[28]增加零平面位移参数( $d$ ) [27] (公式(2)), 并将公式中的  $z_0$  和  $C$  加以修正, 再辅以植物冠层波动修正项[25], 通常可以得到与观测值吻合较好的对数分布表达式,

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} + C \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} + C \quad (2)$$

式(1) (2)中 $z$ 代表水流中某点的垂向位置高度坐标;  $u$ 代表对应于 $z$ 点位置处的时均流速;  $u_*$ 代表水流的剪切流速;  $k$ 代表 Karman 常数;  $z_0$ 代表水力当量粗糙度;  $C$ 代表积分常数;  $d$ 代表零平面位移。

这类研究的关键在于确定植物冠层对 3 个参数  $z_0$ 、 $d$  和  $C$  的影响。较早的研究认为植物冠层的存在使流速分布的起始零平面从底床附近抬升至冠层顶部附近, 因而将冠层的几何高度( $h_p$ )合成为某种函数形式的粗糙长度参数( $f(h_p)$ ), 并将该参数放在 Nikuradse 公式中作为零平面位移  $d$  (公式 3), 然后通过调整积分常数  $C$  使公式与实测值吻合[1] [3] [9] [13] [27]。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z-f(h_p)}{z_0} + C \quad (3)$$

公式(3)中没有直接反映淹没水生植物冠层对  $z_0$  的影响, 它通过调整  $C$  将  $z_0$  对流速的影响反映出来。

进一步的研究认为在含淹没水生植物冠层的水流中,  $z_0$  由无植物情况下的砾石级尺度增加至冠层高度( $h_p$ )尺度, 因而假定  $z_0 = g(h_p)$  并将其直接代入 Nikuradse 公式中(公式 4) (图 1)。然而影响  $z_0$  的主要因素除了冠层的几何高度, 还有植物的分布密度、分布模式、植物形态、及其动态弯曲和波动特征。甚至有研究表明, 这些因素的总和可以使  $z_0$  达到  $h_p$  的 4 倍以上。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z-f(h_p)}{g(h_p)} + C \quad (4)$$

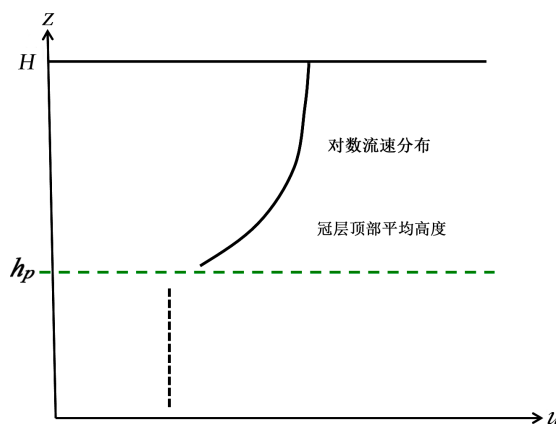


Figure 1. Schematic of the logarithmic law above vegetation canopy  
图 1. 冠层之上对数流速分布示意图

针对植物多因素对  $z_0$  的影响, 有研究者尝试使用新的反映水力当量粗糙度的尺度。例如: Christensen (1985) [1] 保持了 Nikuradse 公式中的积分常数值  $C = 8.5$ , 将零平面位移提高至弯曲植物冠层顶部, 把冠层以上因受植物影响而改变的流速完全由  $z_0$  来表达。该方法通过调整  $z_0$  可以得到与实测数据吻合较好的时均流速分布曲线, 然而由于  $z_0$  是通过调试的方法确定, 因此实际使用中只能根据经验估计其值。Stephan & Gutknecht (2002) [25] 定性分析了  $z_0$  和  $h_p$  的关系, 他们对三种柔性淹没水生植物进行了室内水槽实验研究, 将波动冠层的平均高度作为  $h_p$ , 分析得出  $z_0$  与  $h_p$  具有同阶数值, 且  $z_0$  随着  $h_p$  的增加而升高。

理论上, 从植物冠层内部较小的定常流速高度以上直到与冠层之上剪切流衔接的区域内, 上述对数流速分布律适用。然而, 实际上其适用范围可向上延伸至接近水面附近, 如: Nezu & Sanjou (2008) [29] 观测到其向上延伸到 2 倍以上冠层高度处。

综上所述, 对于淹没水生植物冠层以上区域的水流, 时均流速的对数流速分布规律仍然适用, 但公式中各参数的准确确定处于探索阶段。对于  $z_0$ ,  $d$  和  $C$  的确定, 目前仍主要依靠经验方法, 其精确取值需要大量的实测数据进行统计分析, 理论分析工作也有待进一步开展。

## 2.2. 具有拐点的流速分布规律研究

除冠层之上的对数流速分布律外, 另一种观点是针对全水深范围的具有拐点的反正切[15]或双曲形分布[20]。该分布规律的主要依据是: 在植物冠层顶部以下区域内, 水流因受到冠层的阻力作用而使流速较小; 在冠层以上区域内, 因植物阻力的突然消失而使流速急剧增加; 因而在这两层水体之间, 必然存在一个流速分布的拐点[22], 这个拐点正是反正切或双曲形分布的主要特征(图 2)。

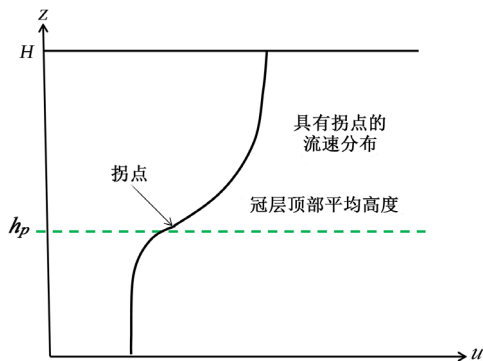


Figure 2. Schematic of velocity profile with inflection point  
图 2. 具有拐点的流速分布

对于时均流速分布在含植物水流中的变化, 其根源在于植物冠层的存在使水流的紊动特征发生了变化, 因而由紊动剪切所导致的动量扩散发生了本质变化, 最终改变了流速分布形态。因此, 有研究尝试从紊动混合的角度去分析流速分布。一些研究者根据实测资料得出[3]: 在冠层之上区域内紊动混合长度 ( $l$ ) 的值与水流所在位置点到冠层顶部的距离成正比, 即  $l \propto (z - z_p)$ ; 并且冠层顶部位置处  $l$  的值最小。他们基于这 2 项特征提出了一些  $l$  的经验表达式, 但由于缺乏进一步的限制条件来支撑微分式的定解, 因而没有进一步推导出时均流速分布公式。

Carollo *et al.* (2002) [15] 在上述基本特征的基础上, 再根据含淹没植物冠层水流紊动的新特征做出 2 项新的假定: 剪切应力在冠层顶部达到最大值, 即剪切应力 ( $\tau$ ) 对垂向位置坐标 ( $z$ ) 的一阶导数为零; 流速分布在冠层顶部出现拐点, 即流速 ( $u$ ) 对  $z$  的二阶导数为零。他们进一步以满足这 2 项假定为前提条件, 提出一个新的 Plandtl 混合长度参数(公式(5)),

$$l = \left[ k_l (z - z_p)^2 + l_0 \right] \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{\max}}} \quad (5)$$

式(5)中  $k_l$  代表数值常数;  $z_p$  代表冠层顶部处的位置高度;  $l_0$  代表冠层顶部处的混合长度;  $\tau$  代表对应于位置高度  $z$  的剪切应力;  $\tau_{\max}$  代表垂向最大剪切应力, 发生在冠层顶部位置。公式(5)也同时满足文献[1] [3] 提出的关于柔性植物冠层之上水流区域内  $l$  的基本特征。

Carollo *et al.* (2002) [15] 由公式(5)对  $z$  的全微分, 以他们所提出的 2 项新假定为定解条件, 推导出时均流速垂向分布的 4 系数表达式,

$$\frac{u_{\max}}{u_*} = b_0 + b_1 \arctan\left(\frac{1 - a_1}{a_2}\right) \quad (6)$$

式(6)中  $u_{\max}$  代表时均流速在垂向分布上的最大值;  $b_0, b_1, a_1, a_2$  分别是 4 个系数。

表达式(6)是典型的反正切分布形式, 其中 4 个系数对于分布曲线均有明确的几何涵义, 因而也具有明确的物理涵义。其中  $a_1$  和  $b_0$  分别表征分布曲线在垂向和水平方向上的过渡, 即植物冠层之内和之上两层水流之间的衔接处的弯曲程度;  $a_2$  表征曲线的陡度, 即冠层之上流速的增加速率;  $b_1$  表征两条垂向渐近线的距离, 即植物冠层之内和之上两个水流区域内的最大流速的差值。

公式(6)不仅表达了植物冠层之上的水流分布, 也表达了冠层之内的流速分布, 并且两层分布之间的衔接具有平滑的拐点, 是属于全水深范围内的表达式。相对比而言, 对数流速分布公式只能表达冠层之上的流速分布, 对于冠层之内的分布没有涉及。

大多关于含淹没水生植物冠层的水动力特征的研究, 都认可其时均流速分布在冠层顶部附近具有拐点[20], 也有研究认可双曲型分布[22]。Guo & Zhang (2016) [26] 通过解析的方法推导出冠层之上的双曲正弦和双曲余弦分布形态。这些函数表达式, 通过调节其中的各参数都能得到与实测值较好的吻合效果, 但公式中各项的物理含义有待进一步探讨。

### 2.3. 分段叠加混合分布规律

通常研究者认为时均流速的对数分布规律是属于边界层紊动垂向混合的结果, 而具有拐点的反正切或双曲形分布规律是属于混合层紊动垂向掺混的结果。前者的实质是将淹没水生植物冠层当作水流的粗糙边界层, 冠层之上的边界层紊动大涡不冠层内部穿透, 因而忽略冠层内外两层水体的互相掺混; 后者的实质是将植物冠层当作可供水流通过的粗糙孔隙介质, 在冠层内、外两层流速不同的水体互相掺混产生混合层紊动大涡, 从而引起其上区域内的动量交换。另外一些研究者根据冠层内、外两层水流区域内时均流速分布截然不同的特性, 试图将流速分布沿垂线方向分段表达, 并研究冠层之上这一段的流速分布[25]。Nikora *et al.* (2013) [22] 通过叠加的方法满足各段之间相互联系、衔接平滑的特征, 因此产生了第三类分布形式, 即分段叠加混合分布规律。

Nikora *et al.* (2013) 将边界层紊动和混合层紊动两种观点融合在一起, 提出了一种新的适用于全水深范围的分段叠加分布规律。他们将全水深自下而上分为 5 个区域: 受底床面粗糙度影响的边界层区域; 冠层以内的定常流速分布区域; 冠层顶部存在流速分布拐点的区域; 冠层之上的对数分布区域; 以及更上层的尾涡影响区域。他们假定各区域对流速分布的影响以线性叠加的方式依次向上层区域传递, 因而每一区域内的流速分布均由该区域内的主要影响因素所形成的分布形态线性叠加位于其上的各区域的分布形态而形成(图 3)。其解析表达式如下:

$$U_f = U_{NB} + U_{UD} + U_{ML} + U_{LL} + U_{WF} \quad (7)$$

式(7)中  $U_f$  代表时间 - 空间双平均流速;  $U_{NB}$  代表边界层内流速分布, 因其值较小, 通常忽略;



$U_{UD} = \left( \frac{gS_b}{0.5C_D a} \right)^{1/2}$  代表冠层内定常流速分布, 流速主要取决于植物特性及其阻力特征, 其中  $g$  是重力加速度,  $S_b$  是水流底坡,  $C_D$  是植物冠层的阻力系数,  $a$  是未弯曲冠层单位体积内的植物迎水总面积;

$U_{ML} = (U_i - U_{UD}) \left[ 1 + \tanh \left( \frac{z - z_i}{L_e} \right) \right]$  代表冠层顶部存在拐点的区域内的双曲正切形流速分布, 其中  $U_i$  是位于拐点  $z_i$  处的流速,  $L_e$  是紊动混合层的特征长度;

$U_{LL} = u_* \frac{1}{k} \ln \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$ ;  $U_{WF} = u_* \frac{2\Pi}{k} \sin^2 \left( \frac{\pi z}{2H} \right)$  代表尾涡影响区内的流速分布, 其中  $\Pi$  是 Cole's 紊动强度参数,  $\pi$  是圆周率,  $H$  是水深。

公式(7)的提出实质是基于两种基本假定: 1) 在 5 个区域内分别存在 5 种主要紊动模式, 即底床面边界层紊动、由植物拖曳力引起的尾涡紊动、混合层大涡紊动、对数层紊动和自由水体内的尾涡紊动; 2) 每一区域内的紊动均对其上部各区域内的动量掺混产生直接影响。该公式经过作者和其他研究者获取的数据验证, 与实测数据吻合良好。

然而公式(7)存在两个没有解释的问题: 1) 根据理论分析和实际观测, 各区内产生的紊动除了可以向上传递动量, 也可以向下传递动量, 特别是在冠层顶部附近的混合层紊动可以穿透植物向下传递动量[30], 而公式(7)在忽略这种向下传递的情况下, 仍与众多研究者观测的数据吻合良好, 其原因尚未出现明确的解释; 2) 各区内产生的紊动可以隔区向上层传递, 其传递机理有待进一步揭示。

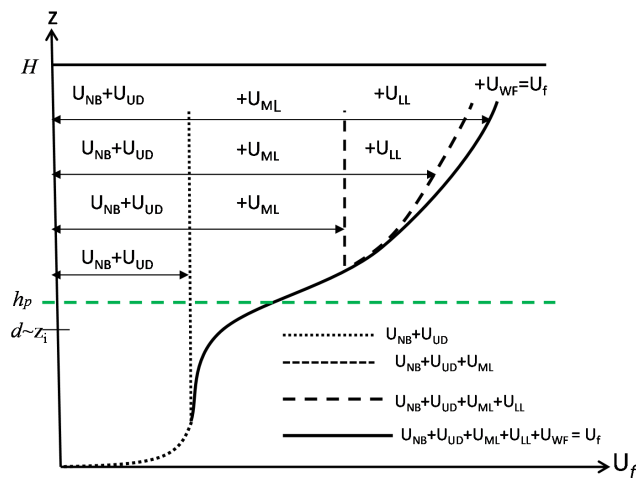


Figure 3. Velocity profile in superposition of segments [21]  
图 3. 分段叠加混合分布规律[21]

### 2.4. 三种流速分布规律的差异性对比

上述三种流速分布规律不仅在公式形式和适用水深范围上有区别, 在精度上也有差异: 1) 对数流速分布适用于植物冠层以上直至水面的水深范围, 公式中的 3 个可调参数不仅能够调整流速在起始和终止高度处的值, 还能够调节流速分布曲线的形状, 因而该分布规律可以使公式在其适用范围内整体达到最佳拟合状态; 2) 具有拐点的反正切或双曲型分布适用于除底床面附近边界层以外, 从边界层顶部至水面的全水深范围, 反正切型分布因其公式中最大流速值是根据实测结果给出, 而其最大和最小流速差值也能够由参数  $b_1$  准确描述, 其它 3 个参数用来调节曲线的陡度、以及拐点位置和流速值, 因而这类分布可以精确地表达水流底端和顶端位置处流速的最大值和最小值, 其它高度处则以整体拟合最佳为原则; 3) 分段叠加混合型分布适用于从水底至水面的全水深范围, 因其公式从水底至水面分为 5 个区域分别描述,

因而在各区内均有较高精度的拟合, 在 3 类分布中属于精度最高的表达形式, 其缺点是各段均需确定各自的参数, 运用上较为繁琐。

### 3. 结论及展望

含淹没水生植物冠层的水流时均流速的垂向分布主要有三种明确的函数表达形式: 冠层之上的对数流速分布; 适用于全水深范围的具有拐点的反正切或双曲形分布; 以及分段叠加混合形分布。这三种表达式都可以通过调节其中的参数获得与实测数据较好的吻合效果, 因而在指导生态水流管理和修复等实际工程中, 均可在结合物理模型和数值模型确定其各参数的基础上加以运用。然而, 由于各分布形态均缺乏明确的理论支撑, 因而其参数的确定难以用解析或其它通用的计算方法直接给出。

大型水体中水流时均流速的垂向分布受限于水流的紊动机理和动量传递机制, 因而取决于水流的紊动结构及其主要特征。上述三种流速分布中: 对数流速分布实质上对应于底床面边界层紊动大涡结构; 具有拐点的反正切或双曲形分布对应着产生于植物冠层顶部的混合层紊动大涡结构; 而分段叠加混合型分布, 则是在承认这两种紊动大涡共同作用下, 再叠加植物体尾涡和自由水流中尾涡而产生的结果。因而, 对于含淹没水生植物冠层水流中紊动结构和紊动特征的进一步深入研究, 将有助于水流时均流速垂向分布的通用形式的确定。

### 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] Chistensen, B.A. (1985) Open Channel and Sheet Flow over Flexible Roughness. *Proceedings of the XXI International Association for Hydraulic Research Congress*, Melbourne, 462-467.
- [2] Armanini, A. and Righetti, M. (1998) Resistenza al moto in alvei vegetati a scabrezza eterogenea. *Proceedings of the XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Catania, 3-14. (In Italian)
- [3] Temple, D.M. (1986) Velocity Distribution Coefficients for Grass-Lined Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**, 193-205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:3\(193\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:3(193))
- [4] Schlichting, H. (1968) *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, New York.
- [5] Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996) Three-Dimensional Organized Vortices above Flexible Water Plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**, 634-640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:11\(634\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:11(634))
- [6] Kutija, V. and Hong, H.T.M. (1996) A Numerical Model for Assessing the Additional Resistance to Flow Introduced by Flexible Vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, **34**, 99-114. <https://doi.org/10.1080/00221689609498766>
- [7] Kironoto, B.A. and Graf, W.H. (1995) Turbulence Characteristics in Rough Uniform Open-Channel Flow. *Proceedings of the Institute Civil Engineering*, **112**, 336-348. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.28114>
- [8] Kouwen, N., Unny, T.E. and Hill, H.M. (1969) Flow Retardance in Vegetated Channels. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **95**, 329-342.
- [9] El-Hakim, O. and Salama, M.M. (1992) Velocity Distribution inside and above Branched Flexible Roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **118**, 914-927. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:6\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:6(914))
- [10] Klopstra, D., Barneveld, H.J., van Noortwijk, J.M. and van Velzen, E.H. (1997) Analytical Model for Hydraulic Roughness of Submerged Vegetation. *Proceedings of the 27th IAHR Congress in San Francisco*, 775-780.
- [11] Plate, E.J. and Quraishi, A.A. (1965) Modeling of Velocity Distributions inside and above Tall Crops. *Journal of Applied Meteorology*, **4**, 400-408. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1965\)004<0400:MOVDIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1965)004<0400:MOVDIA>2.0.CO;2)
- [12] Nnaji, S. and Wu, I. (1973) Flow Resistance from Cylindrical Roughness. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **99**, 15-26.
- [13] Watanabe, T. and Kondo, J. (1990) The Influence of Canopy Structure and Density upon the Mixing Length within and above Vegetation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **68**, 227-234.

<https://doi.org/10.2151/jmsj1965.68.2.227>

- [14] Haber, B. (1982) Über den Erosionsbeginn bei der Überströmung von flexiblen Rauheitselementen. Mitteilungen des Leichtweiss Institutes für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig. Heft 74.
- [15] Carollo, F.G., Ferro, V. and Termini, D. (2002) Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, 664-673. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(664\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(664))
- [16] Inoue, E. (1963) On the Turbulent Structure of Air-Flow within Crop Canopies. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **41**, 317-326. <https://doi.org/10.2151/jmsj1923.41.6.317>
- [17] Järvelä, J. (2002) Flow Resistance of Flexible and Stiff Vegetation: A Flume Study with Natural Plants. *Journal of Hydrology*, **269**, 44-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00193-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00193-2)
- [18] Katul, G., Poggi, D. and Ridolfi, L. (2011) A Flow Resistance Model for Assessing the Impact of Vegetation on Flood Routing Mechanics. *Water Resources Research*, **47**, W08533. <https://doi.org/10.1029/2010WR010278>
- [19] Monin, A.S. and Yaglom, A.M. (1971) Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence. Vol. 1, MIT Press, Boston.
- [20] White, B. and Nepf, H. (2008) A Vortex-Based Model of Velocity and Shear Stress in a Partially Vegetated Shallow Channel. *Water Resources Research*, **44**, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2006WR005651>
- [21] Nepf, H.M. 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>
- [22] Nikora, N., Nikora, V. and Tom, O. (2013) Velocity Profiles in Vegetated Open-Channel Flows: Combined Effects of Multiple Mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**, 1021-1032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000779](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000779)
- [23] Pokrajac, D., Finnigan, J.J., Manees, C., McEwan, I. and Nikora, V. (2006) On the Definition of the Shear Velocity in Rough Bed Open Channel Flows. In: *Fluvial Hydraulics River Flow*, Vol. 1, Taylor & Francis, London, 89-98.
- [24] Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y. (1996) Coherent Eddies and Turbulence in Vegetation Canopies: The Mixing Layer Analogy. *Boundary-Layer Meteorology*, **78**, 351-382. <https://doi.org/10.1007/BF00120941>
- [25] Stephan, U. and Gutknecht, D. (2002) Hydraulic Resistance of Submerged Flexible Vegetation. *Journal of Hydrology*, **269**, 27-43. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00192-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00192-0)
- [26] Guo, J. and Zhang, J. (2016) Velocity Distributions in Laminar and Turbulent Vegetated Flows. *Journal of Hydraulic Research*, **54**, 117-130. <https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1136899>
- [27] Murota, A., Fukuhara, T. and Sato, M. (1984) Turbulence Structure in Vegetated Open Channel Flows. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, **2**, 47-61.
- [28] Nikuradse, J. (1933) Stromungsgesetze in rauhen Röhren. Forschungsheft 361. Ausgabe B. Band 4.
- [29] Nezu, I. and Sanjou, M. (2008) Turbulence Structure and Coherent Motion in Vegetated Canopy Open-Channel Flows. *Journal of Hydro-Environment Research*, **2**, 62-90. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2008.05.003>
- [30] Li, Y., Xie, L. and Su, T. (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)

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2376-4260, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ams@hanspub.org](mailto:ams@hanspub.org)