

含挺水植物和沉水植物水流紊动特性

王 忬^{1,2}, 王 超^{1,3}

(1. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 2 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098
3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在一定的水动力条件下, 不同水生植物对水流结构改变的程度及对底泥再悬浮的影响由于其形态结构的差异有所不同。在玻璃水槽中铺设太湖底泥并种植天然沉水植物(水蕹)和挺水植物(菖蒲), 通过水槽实验, 用三维声学多普勒流速仪 ADV 对植物段紊流特性进行测量研究, 分析含水生植物明渠水流的水力特性及底泥再悬浮规律。结果表明: 含沉水植物和挺水植物明渠水流的垂向流速分布各自遵循不同的规律; 其紊动强度和雷诺应力具有明显的各向异性特性; 在沉水植物冠层交界处及挺水植物的茎秆和枝叶分叉处, 紊流强度及雷诺应力均出现最大值; 在一定条件下沉水植物和挺水植物均能抑制底泥再悬浮, 但当雷诺数达到一定数值时, 水生植物的存在反而加剧了底泥的再悬浮, 与挺水植物相比, 沉水植物对底泥再悬浮的抑制效果要更好。

关键词: 水动力条件; 底泥再悬浮; 水生植物; 紊流特性

中图分类号: TV 133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)06-0816-07

河流湖泊中含有水生植物是一种常见而复杂的问题, 一方面, 水生植物能净化污染水体, 美化环境, 另一方面, 水生植物的存在又改变了水流结构进而影响水体中污染物迁移的规律、泥沙沉降和再悬浮规律等。根据植物在水体中所处的位置, 可将植物分为沉水植物、挺水植物和浮水植物。其中, 沉水植物是指水流完全将植物淹没, 挺水植物是指植物高于水面。不同水生植物对水动力学特性和底泥再悬浮的影响不同^[1]。因此, 探讨水生植物与水流运动以及底泥悬浮的相互影响, 对水资源的可持续利用, 河流及湖泊的生态修复、河道整治和管理等都具有重要意义。

王超^[2]用二维水深平均的水动力学数学模型计算了南四湖的水流流场, 发现非淹没水生植物(芦苇)与沉水植物对流场有较大的影响; 李艳红^[3]指出河流的紊动特性直接受水生植物的影响, 紊动强度垂向分布的最大值的大小及其出现位置与植物的排列密度、植物水深相对高度以及水流流速有密切关系; 刘云^[4]在其研究中指出植物的几何形态是影响含植物水流结构的重要因素; 顾峰峰等^[5]预测了非植物区内的流速分布, 并给出了非淹没和淹没情况下糙率系数的换算关系; 邱秀云等^[6]采用塑料树模拟沙棘等柔性植物, 实验研究了植物对水流及泥沙运动的影响; 刘诚和沈永明^[7]建立了可以研究水生植物对水流结构和泥沙运动特性影响的三维数学模型, 该模型可以计算研究区域的水动力特征、悬沙运动、床沙运动以及河床变形; 吴福生^[8]指出植物水流中泥沙运动和污染物输移规律是涉及生态环境并迫切需要了解的研究内容。水生植物的存在改变了水流运动特性, 并且控制着泥沙及污染物的输运规律, 因此对含水生植物明渠水流的阻力特性及紊流特性的研究显得非常重要。

河流湖泊中的水生植物能够抑制水动力因素对沉积物的扰动, 从而抑制底泥再悬浮, 降低营养盐释放。Dieter^[9]、Horppila 和 Numminen^[10-12]的研究表明, 在浅的沼泽湖泊, 挺水植物极大地降低了风浪引起的底泥再悬浮作用; Janes 等^[13-14]在其研究中指出狐尾藻和轮藻在生物量较大时都能够有效地增加底泥切应力, 降低再悬浮; 厉恩华^[15]指出不同沉水植物苦草和微齿眼子菜在抑制沉积物再悬浮、降低湖泊内源磷负荷中的

收稿日期: 2010-02-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2008CB418203); 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室资助(2008KJ004)

作者简介: 王忬(1974-), 女, 河北辛集人, 讲师, 主要从事流体力学研究。E-mail: Wangcun5158@sina.com

作用不同; 黄沛生^[16] 研究结果发现浮叶植物菱对沉积物的再悬浮有良好的抑制作用。底泥再悬浮的原动力是水流的紊动特性, 水生植物决定了渠道的紊流结构, 从水流紊动特性探讨不同水生植物对底泥再悬浮的抑制程度和机理是非常有必要的。本文通过室内水槽实验对含挺水植物与沉水植物水流的阻力特性、垂线流速分布、紊流特性及对底泥再悬浮影响进行了对比分析, 对浅水湖泊的生态修复及改建都具有重要的理论指导意义。

1 实验概况

实验在长 8 m, 宽 0.3 m, 高 0.4 m 的变底坡玻璃水槽中进行。水槽为自循环式, 用水为自来水。实验水槽结构如图 1 所示。为了模拟真实床面情况, 在水槽中用 PVC 板垒出一块长 2.0 m、宽 0.3 m、高 0.08 m 的凹槽, 用于放置底泥。将从太湖竺山湾中部区域取回的试验底泥铺于凹槽并用铲子轻压, 底泥厚度约 8 cm 左右。在底泥上种植沉水植物水蕨和挺水植物菖蒲, 待生长稳定后开始进行实验。试验所用水蕨为一年生水生草本, 高 5~7 cm, 根茎短而直立, 以须根固着于淤泥中。挺水植物菖蒲为多年水生草本植物, 生于池塘、湖泊岸边浅水区, 高 20 cm 左右, 根状茎横走, 粗壮, 稍扁, 直径 0.5~2 cm, 叶片剑状线形, 长 5~12 cm, 中部宽 1~3 cm, 叶基部成鞘状。

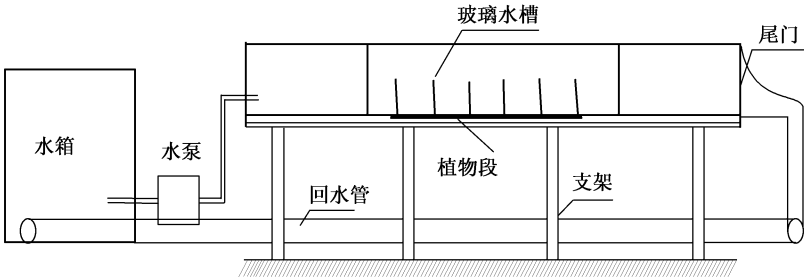


图 1 水槽结构示意图
Fig. 1 Scheme of tank structure

水生植物带长 2.0 m, 在距植物带开始断面约 1.0 m 处测定水流瞬时流速和采集水样。采样垂线上布置有 5 个位于不同深度的采样管, 采集位置距底泥 1.5 cm、4.5 cm、7.5 cm、10.5 cm、14 cm。水样采集利用虹吸原理, 以减小采样对流场的干扰, 每一样品又分成 3 组平行样, 采样后及时进行样品分析。

水生植物布置方式采用交错布置模式, 植物的密度为 200 株 /m²。植物的平面布置如图 2 所示。瞬时流速采用超声波多普勒流速仪 ADV 测量, 采样频率为 50 Hz, 采样时间为 50 s。温度计测量试验水温; 水深用测针量测; 流量用电磁流量计量测; 浊度用分光光度法测量。实验时水槽中起始断面的水深控制在 16.5 cm, 改变不同的流量, 实验条件见表 1。试验着重分析了流量 $Q = 0.009\,805\text{ m}^3/\text{s}$ $Re = 15\,613$ 时断面 $x = 1.0\text{ m}$ 含沉水植物与挺水植物水流的紊流特性, 图 3 为该流量条件下流经沉水植物和挺水植物的水流现象。

表 1 实验工况
Table 1 Experimental conditions

实验组次	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	Re	Fr
1	0.003 922	0.0800	6 246	0.062 9
2	0.005 506	0.1124	8 767	0.088 3
3	0.007 350	0.1500	11 704	0.117 9
4	0.009 805	0.2001	15 613	0.157 3
5	0.012 375	0.2526	19 705	0.198 5
6	0.014 861	0.3033	23 664	0.238 4
7	0.017 258	0.3522	27 481	0.276 9
8	0.019 753	0.4031	31 453	0.316 9

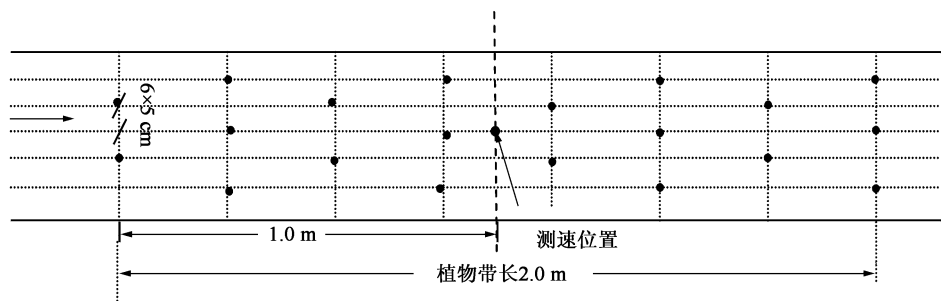
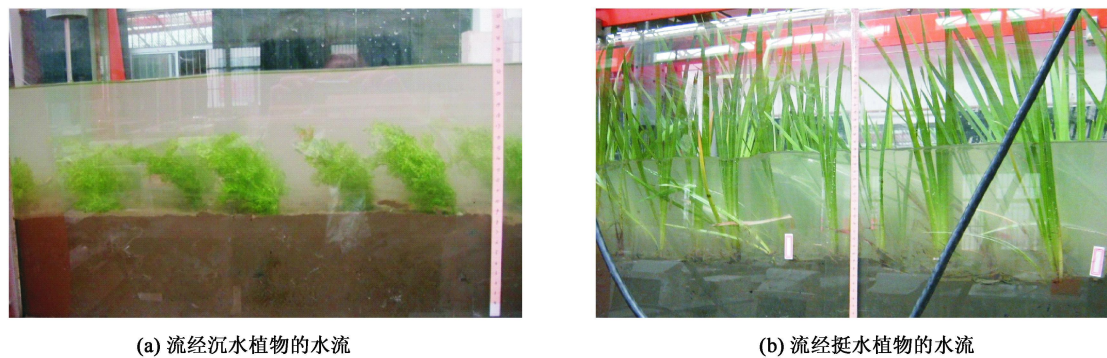


图 2 植物的平面布置示意图
Fig 2 Scheme of plant layout



(a) 流经沉水植物的水流 (b) 流经挺水植物的水流

图 3 流经沉水植物和挺水植物的水流特性
Fig 3 Flow characteristics of the emergent plant and the submerged plant

2 试验成果分析

2.1 含植物明渠水流特性

(1)植物区内水位的变化 图 4为相同流量条件下 ($Q=0.009805\text{ m}^3/\text{s}$ $Re=15613$), 植物区域内水位的变化规律, 植物段内水位变幅沿程增加断面水深下降, 并伴有波状起伏, 每排植物后存在明显的漩涡区。植物段末端 ($x=2.0\text{ m}$) 水深降至最低点, 再往下游水深逐渐增加, 在植物段下游, 水位的逐渐降低势必会造成流速逐渐增大, 会对槽底底泥有一定的冲刷作用。挺水植物段内水位下降的程度要比沉水植物段内大的多, 也就是说, 相同水动力条件下, 挺水植物段内的底泥相对于沉水植物更易冲刷而悬浮。

(2)时均流速的分布 研究水生植物内部的垂向流速分布, 可以了解植物对于垂直方向动量交换影响的情况。图 5为植物区域时均流速分布, 不同的水生植物对流速结构的影响不同。挺水植物流速垂线分布以植物的茎杆和枝叶分叉处为拐点分为两段, 拐点以上流速逐渐减小, 与无植物相比略有减小, 这是由于挺水植物枝叶部分细长而柔软, 随水流弯曲摆动, 枝叶互相摩擦扰动消耗大量动能所致; 拐点以下至水槽底部, 植物阻水面积大大减小, 流速则逐渐增大。而种植沉水植物的明渠水流流速分布呈现反“S”形分布, 在植物层上方水流受植物的影响越来越小, 流速增大; 在植物层内部由于植物层对动量的吸收作用, 流速削减迅速, 靠近渠底流速明显减小, 因此沉水植物与挺水植物相比更有利于悬浮泥沙的沉降。水流流速不均匀分布引起的对流作用直接影响着泥沙和污染物的输移扩散。

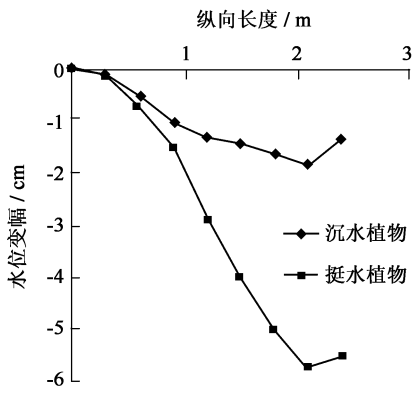


图 4 植物区域水位变幅

Fig. 4 Water level change at stations with plant

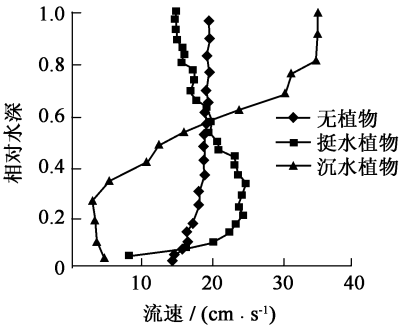


图 5 植物区域时均流速分布

Fig. 5 Vertical distribution of average velocity

(3)紊动强度的分布 图 6为植物区内紊动强度的垂向分布, 可见, 种植水生植物后 3个方向的紊动强度均显著增加, 在沉水植物顶层的位置即相对水深 $Y=0.25$ 左右和挺水植物的茎杆和枝叶分叉处即相对水深 $Y=0.2\sim 0.5$ 之间, 3个方向上的紊动强度均达到最大值。相比而言, 含挺水植物水流的紊动强度远高于含沉水植物水流, 特别在紊动强度达到最大值的位置, 表现得尤为显著, 这是因为挺水植物分散枝叶的摆动影响到整个水域。在相对水深 $Y=0.7$ 至水面部分, 沉水植物段水流逐渐脱离了植物摆动的影响, 紊动强度减小, 在水面附近与无植物情况重合; 而挺水植物段水流由于受柔软枝叶的摆动, 其紊动强度均有增大的趋势。由于水生植物的弯曲流线化, 植物沿垂向尺度变小, 紊流涡在垂向上的尺度也相应减小, z 向紊动强度则明显要小于 x 、 y 向紊动强度, 反映出含植物明渠水流具有明显的各向异性的紊流特性。

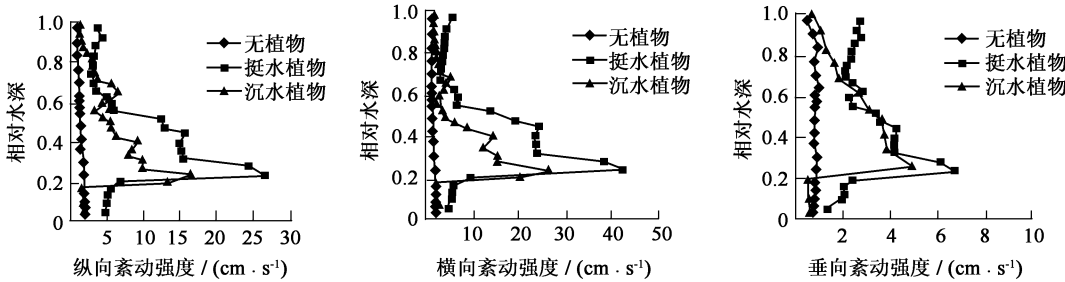


图 6 植物区域紊动强度垂向分布 ($Q=0.009805\text{ m}^3/\text{s}$, $Re=15613$)

Fig. 6 Vertical distribution of the turbulence intensity at station with plant

(4)雷诺应力的分布 雷诺应力可表示为

$$\tau_{yx} = -\rho \overline{u'_x u'_y}, \quad \tau_{zy} = -\rho \overline{u'_y u'_z}, \quad \tau_{xz} = -\rho \overline{u'_x u'_z} \quad (1)$$

式中 x 、 y 为水平方向; z 为垂直方向; x 为水流沿明渠的流向。

雷诺应力是由于流场中流速分布不均而产生的, 雷诺应力越大反映出该处流速分布越不均匀, 说明此处紊动越剧烈。图 7为植物区域雷诺应力垂向分布, 3个方向上雷诺应力的分布规律和紊动强度的分布是一致的, 由于紊流在相对水深 $Y=0.2\sim 0.5$ 之间紊动交换强烈, 此区域雷诺应力明显较大, 含挺水植物水流的紊动强度高于含沉水植物水流, 因此含挺水植物水流的雷诺应力远高于含沉水植物水流; 在相对水深 $0<Y<0.2$ 和 $0.5<Y<1$ 时, 流速分布趋于均匀化, 雷诺应力都很小, 基本接近于零, 这也是植物阻流的又一重要因素。同时, 这一规律对底泥悬浮规律起重要作用, 对河流、湿地的水生态修复具有重要意义。

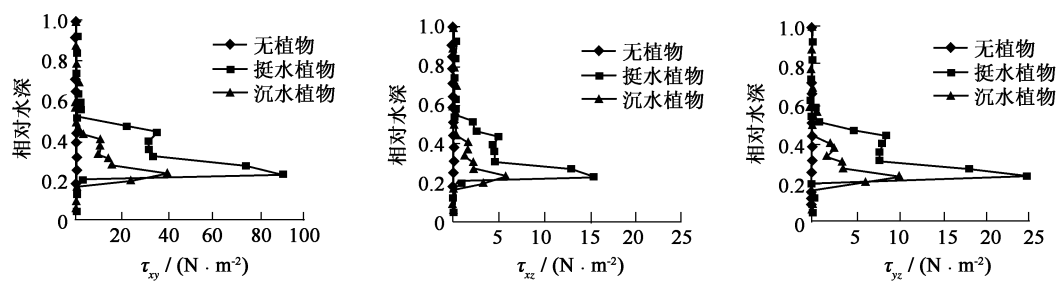


图 7 植物区域雷诺应力垂向分布 ($Q = 0.009805 \text{ m}^3/\text{s}$ $Re = 15613$)

Fig. 7 Vertical distribution of the Reynolds stress at station with plant

2.2 沉水植物和挺水植物对底泥再悬浮影响

(1)有无水生植物渠底切应力的改变 底部切应力的计算公式为

$$\tau = \rho u^2 \tag{2}$$

式中 τ 为渠底切应力, N/m^2 ; ρ 为水体密度; u 为摩阻流速, 计算公式为

$$u = K u_z / \ln(z/z_0) \tag{3}$$

式中 K 为卡门常数(本试验水体取为 0.4); u_z 为渠底以上 z 高度处的流速; z_0 为渠底物理粗糙度, 该参数对于计算结果不敏感, 取常数 $z_0 = 0.2 \text{ mm}$, $z = 0.5 \text{ cm}$ 。根据 ADV 所测得底层流速数据求解 u_* , 然后计算渠底切应力。

图 8 为有无水生植物渠道渠底切应力随流速变化的关系曲线, 从图中可以看出, 渠道中的水生植物, 大大削减了水流对底泥表面的剪切应力, 从而有利于水体中悬浮物的沉积, 降低沉积物质再悬浮的风险。而沉水植物使流速在近底泥表面削减迅速, 因此与挺水植物相比更能够有效地减弱动力因素对河流湖泊底泥的切应力从而降低再悬浮。

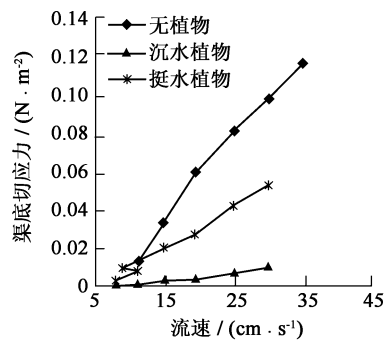


图 8 渠底切应力与流速的变化关系

Fig. 8 Relationship between bed shear stress and velocity

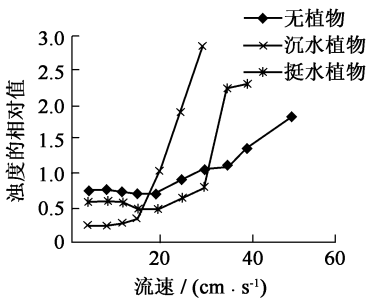


图 9 上覆水体浊度与流速的关系曲线

Fig. 9 Relationship between turbidity and velocity in the upper water

(2)有无水生植物上覆水体浊度的变化规律 由图 9 可以看出, 有沉水植物的渠道和有挺水植物的渠道内水体浊度存在明显差异。当流速较小即流速小于 20 cm/s 时, 渠道中种植水生植物均能有效降低上覆水体浊度, 但沉水植物渠道中水体浊度要高于挺水植物渠道, 这是因为还没有倒伏的沉水植物能更好的拦截悬浮泥沙。但当流速大于 20 cm/s 而小于 30 cm/s 时, 种植挺水植物的渠道水体很快变浑浊, 由图 4 可知, 与沉水植物相比, 挺水植物段内水深急剧下降, 流速沿程增加, 使得植物段末端以及植物段两侧壁渠底底泥严重冲刷, 水体浊度迅速增加, 反而高于无植物渠道。而沉水植物渠道中水体浊度也有所增加, 但仍低于无植物渠道。当流速大于 30 cm/s 时, 有植物渠道中水体浊度急剧增加, 均大于无植物渠道。由此可看出, 水流强度不同, 水生植物对底泥再悬浮的影响不同。不同水生植物对底泥再悬浮的抑制效果由于其形态结构的差异

也有所不同, 沉水植物群落比挺水植物群落能更有效地降低底泥再悬浮, 这一规律对河流、湖泊的水生态修复具有重要意义。

3 结 论

(1) 植物区域上游水位壅高, 植物段内水面沿程下降, 形成了典型的恒定非均匀流, 在相同水动力条件下, 挺水植物段底泥更易冲刷。

(2) 含挺水植物水流流速分布以其茎秆和枝叶分叉处为拐点, 上部流速减小, 下部则逐渐增大; 含沉水植物水流流速分布以植物冠层为拐点呈现反“S”形分布, 在植被层上方流速增大, 而在植被层内部流速削减迅速, 沉水植物对于水流的阻挡作用相当明显。

(3) 植物区水流的紊流特性具有明显的各向异性特性, 挺水植物段的紊动强度和雷诺应力的最大值在其茎秆和枝叶分叉处, 而沉水植物段的紊动强度和雷诺应力的最大值则出现在植物冠层附近。挺水植物段紊流强度和雷诺应力总体明显高于沉水植物段紊流。

(4) 在水流强度较小时, 两种水生植物均能有效降低上覆水体中浊度, 挺水植物段内水体浊度明显低于沉水植物段; 但当水流强度较大时, 水生植物的存在反而加剧了底泥再悬浮, 挺水植物段上覆水体中浊度明显高于沉水植物段。不同水生植物对水动力学和底泥再悬浮作用的影响不同, 沉水植物群落比挺水植物群落能更有效地降低底泥再悬浮。

参考文献:

- [1] VERMAAT J E, SANTAMARIA L, ROOS P J Water flow across and sediment trapping in submerged macrophyte beds of contrasting growth form [J]. *Archiv für Hydrobiologie* 2000, 148: 549-562
- [2] WANG Chao, ZHU Ping, WANG Peifang, et al Effects of aquatic vegetation on flow in the Nansi Lake and its flow velocity modeling [J]. *Journal of Hydrodynamics*, Ser B, 2006, 18(6): 640-648
- [3] 李艳红, 李栋, 范静磊. 含淹没植物河流水流紊动强度最大值及其影响因素 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 706-710 (LI Yan-hong, LI Dong, FAN Jing-lei Turbulence intensity maximum and its influence factors in submerged river flow with plant [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 706-710 (in Chinese))
- [4] 刘云. 流经柔性植物的明渠水流特性影响试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006 (LIU Yun The experimental study on the flow characteristics of open channel with the flexible vegetation [D]. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese))
- [5] 顾峰峰, 倪汉根, 戚定满. 高棵水生植物的阻力系数在非淹没与淹没条件下的相互换算 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(6): 823-828 (GU Feng-feng, NI Han-gen, QI Ding-man Transition of long-stalk vegetation resistance coefficient between unsubmerged condition and submerged condition [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(6): 823-828 (in Chinese))
- [6] 邱秀云, 阿不都外力, 程艳, 等. 植物“柔性坝”对水流的影响试验研究 [J]. *水利水电技术*, 2003, 34(9): 62-65 (QIU Xi-yun, ABDUWALI, CHENG Yan, et al Experiment research on the flow characteristics of vegetation flexible dam [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, 34(9): 62-65 (in Chinese))
- [7] 刘诚, 沈永明. 水生植物对水沙运动影响的三维湍流模型 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 851-856 (LIU Cheng, SHEN Yong-ming 3D turbulence model for the flow and sediment transport with aquatic vegetation [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 851-856 (in Chinese))
- [8] 吴福生, 王文野, 姜树海. 含植物河道水动力学研究与进展 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 456-461 (WU Fu-sheng, WANG Wen-ye, JIANG Shu-hai Hydrodynamics development in vegetated open channel [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 456-461 (in Chinese))
- [9] DE JETER C D. The importance of emergent vegetation in reducing sediment resuspension in wetlands [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1990, 5: 467-473
- [10] HORPPILA J, NURMINEN L. The effect of an emergent macrophyte (*Typha angustifolia*) on Sediment in a shallow north temperate lake [J]. *Freshwater Biology*, 2001, 46: 1447-1455

- [11] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiedenvesi (Southern Finland) [J]. Water Research, 2003, 37: 4468-4474.
- [12] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake[J]. Hydrobiologia, 2005, 545: 167-175.
- [13] JAMES W F, BARKO JW, BUTLER M G. Shear stress and sediment resuspension in relation to submerged macrophyte biomass [J]. Hydrobiologia, 2004, 515: 181-191.
- [14] JAMES W F, BEST E P, BARKO JW. Sediment resuspension and light attenuation in Peoria Lake: Can macrophytes improve water quality in this shallow system? [J]. Hydrobiologia, 2004, 515: 193-201.
- [15] 厉恩华. 大型水生植物在浅水湖泊生态系统营养循环中的作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006 (LI En-hua Effects of aquatic macrophytes on nutrient cycling in shallow freshwater lake ecosystem[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese))
- [16] HUANG Pei-sheng, LU Zheng-wen, HAN Bo-ping. Floating-leaved macrophyte (*Tilapia quadrispinosa* Roxb.) beds have significant effects on Nitrogen resuspension in Lake Taihu[J]. Hydrobiologia, 2007, 581: 189-193.

Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes*

WANG Cun^{1, 2}, WANG Chao^{1, 3}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes

Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Under certain hydrodynamic conditions, different species of aquatic plants will have different impacts on the flow structure and sediment re-suspension due to the differences in plant morphology. In this study, the sediment collected from the Taihu Lake is placed in a glass tank planting with emergent and submerged macrophytes *calamus* and *water fern*. Using the flume experiments, the turbulent flow in the open channel with macrophytes is measured by a three-dimensional Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). The analysis of flow turbulence and sediment re-suspension is conducted. The results show that the vertical velocity distribution has different regularities in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes. Both turbulence intensity and Reynolds Number exhibit obvious anisotropy, and their maximum values are found to be at the junction of submerged plant canopy and at the bifurcation of emergent plant stems and branches, respectively. The sediment re-suspension process can be inhibited by the presence of emergent and submerged macrophytes under certain conditions. However, when the Reynolds Number reaches a certain value, the presence of these macrophytes can actually exacerbate the sediment re-suspension process. In comparison with emergent plants, submerged macrophytes would be more effective in inhibiting sediment re-suspension.

Key words hydrodynamic conditions; sediment re-suspension; aquatic macrophytes; turbulent characteristics

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2008CB418203).