

植被影响下滞水区水流流场和平均滞留时间研究

向珂, 杨中华*, 刘建华, 方浩泽

(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉, 430072, Email: yzh@whu.edu.cn)

摘要: 无论是人工丁坝群形成的滞水区(groin fields)还是自然河岸内陷形成的河湾(embayment), 都与河道主流间存在混合交换层。明渠滞水区通常存在低速度环流结构, 可以为水生生物提供有利的生存条件, 是生物生长的重要区域。尽管前人对侧空腔区域的水动力学进行了深入研究, 但植被条件下滞水区的相关研究相对较少。本研究采用大涡模拟(LES)研究了植被种群密度变化下矩形滞水区的紊动水流结构, 用物理模型实验测得的时均流场对数值模型进行了验证。发现植被的存在影响了滞水区的环形结构, 削弱了流速和湍动能, 这种负面影响随着种群密度的增加而加强。伴随着交界面前缘诱导的脱落涡的发展, 大尺度相干结构在混合层形成, 这种拟序结构的发展几乎不受种群密度变化的影响。分析了植被化滞水区的水体滞留时间, 发现随着种群密度增大, 平均滞留时间先减小后增大, 该现象是由大尺度相干结构、植株诱导的卡门涡街以及植被群阻滞效应 3 个因素共同作用的。

关键词: 明渠; 滞水区; 植被; 大涡模拟; 紊动水流

1 引言

自然河道中的滞水区一般是由自然河湾或是连续丁坝形成的, 它可以为水生生物提供合适的生长条件, 提高河流生态系统的生物多样性。滞水区水流速度相较于主渠比较小, 这有助于悬移质泥沙的淤积(泥沙通常附着重金属)以及增加污染物在滞水区的滞留时间。这种污染拦截效应对河流生态是很有利的^[1]。

由于细泥沙和有机物在滞水区的淤积, 滞水区为水生植物提供了生长环境。反过来, 植被的生长也会影响水流特性。Sukhodolov 等^[2]对布置了丁坝群和模型植被的自然河道开展了研究, 发现植被可以改变滞水区内的环流结构。Liu 等^[3]对植被化河湾进行了 3D 大涡模拟, 发现植被会对交界面处的质量交换产生影响。尽管上述研究对植被化滞水区提供了一定的认识, 但是许多方面还需要进一步探索。

基金项目: NSFC (grant nos. 51679170, 51439007, 51879199)

本研究旨在研究植被种群密度变化对滞水区水力特性的影响（植被类型：刚性挺水植被），采用大涡模拟方法，用模型试验成果对数值模型进行了验证。研究主要聚焦以下方面：①种群密度变化下，滞水区环流结构和紊动能的改变；②拟序结构的发展是否受种群密度变化影响；③植被种群密度对滞留时间的影响。

2 数学模型

通过对 3D 不可压缩 Navier–Stokes 方程过滤，可以得到 LES 的控制方程。方程中的亚格子应力项，反映了小尺度不可解物理量对水流运动的影响，可以通过涡黏性模型求解。采用 Smagorinsky 模型计算涡黏度。

2.1 模拟设置

试验概视图如图 1 所示。主渠宽 0.85 m，非淹没凹型滞水区（0.25 m 长，0.15 m 宽）布置在主渠左岸下游位置。主渠和滞水区底面齐平，试验水深 H 固定在 0.1 m。在滞水区内规则排列 1.5 mm 细铜丝近似水生刚性植被。

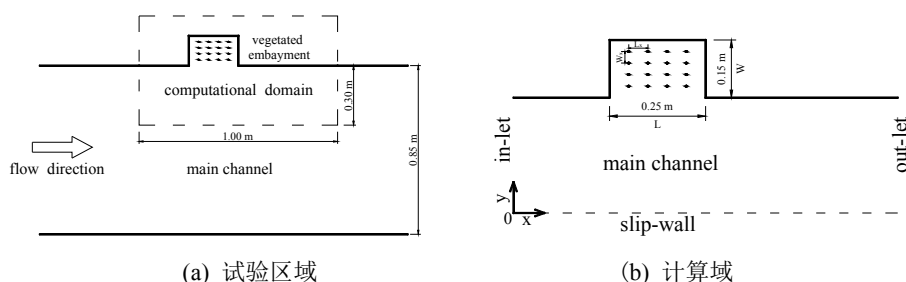


图 1 模型平面

主渠水流的雷诺数为 9000，对应的平均流速 $U = 0.101$ m/s；佛汝德数 $F_r = 0.102$ ，自由水面可以采用刚盖假定^[4]。为节省计算资源，只选取了 $0.3 \text{ m} = 2W$ 的主渠宽度，可以保证侧空腔区域不会影响到右边界（沿水流方向）^[5]，右边界采用自由滑移条件。上游边界以提前算好的瞬时速度场作为进口条件；该速度场通过对主渠段添加周期性条件而得到^[6]。下游边界采用对流出条件^[7]。壁面和植被面设置为不可滑移条件。

植被种群密度定义为 $a = nS_v / S_{DWZ}$ ， n 代表植株数量， S_v 表示植株水平截面面积， S_{DWZ} 表示空腔水平界面面积。不同工况下的网格分布规律是近似的，这里只介绍工况 $a = 1.32 \times 10^{-3}$ 的网格分布情况。这个计算域采用结构化六面网格，近壁面网格间距 Y^+ 接近 1（相当于一个壁面单元），远离壁面处的网格间距在流向，展向，垂向分别为 17，10，10 个壁面单元，网格总数量为 1.5×10^7 。

为研究植被种群密度变化对滞水区流场的影响，本研究选择了 6 种不同的种群密度，分别是 $a = 0, 1.32 \times 10^{-3}, 2.64 \times 10^{-3}, 3.96 \times 10^{-3}, 5.28 \times 10^{-3}, 6.27 \times 10^{-3}$ ；对应的网格数

量分别是 1.0×10^7 , 1.5×10^7 , 2.2×10^7 , 2.1×10^7 , 2.5×10^7 , 2.7×10^7 ; 对应的时间步长分别是 $0.005 H/U$, $0.004 H/U$, $0.0025 H/U$, $0.0025 H/U$, $0.002H/U$, $0.002 H/U$ 。

2.2 模型验证

矩形明渠长 20 m, 宽 1 m, 深 0.5 m, 坡降 1‰。顺着渠道左岸布置有机玻璃隔板来形成滞水区, 滞水区距上游进口 10.5 m, 能够保证来流到达滞水区时为充分发展紊流。PIV 系统采用双脉冲激光工作原理, 采样频率 14.5 Hz (采集 320 幅照片组)。测试粒子是中空玻璃珠, 直径 $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$, 密度 1.05 g/cm^3 。图 2 (a) 和 (b) 分别展示了工况 2 和工况 6 在 $z = 0.6H$ 水深平面整体平均流向速度 U 沿 y 轴的分布规律。两种工况下, 数值模拟结果与模型实验成果吻合度较好, 验证了 LES 的可靠性。

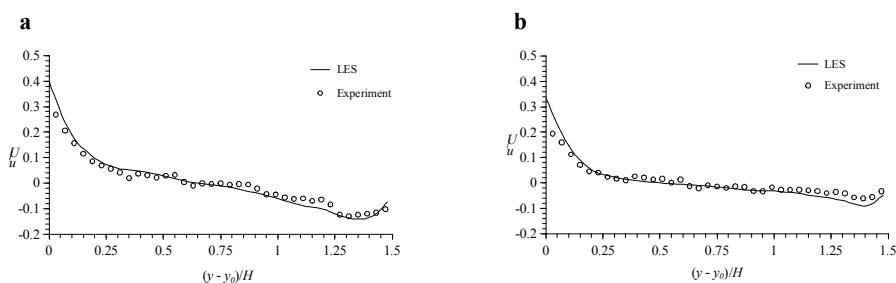


图 2 $z = 0.6H$ 平面上整体平均流向速度的比较: a 工况 2; b 工况 6

3 成果

3.1 时均流线

图 3 展示了部分工况的平面流线图。所有工况下, 滞水区中间存在一个逆时针主环流结构, 几乎占据滞水区 90% 的区域。当植被种群密度逐渐增加时, 由于植被群落阻滞, 滞水区内 x 向时均流速逐渐降低。需要说明的是, 当 $a < 2.64\text{‰}$ 时, 滞水区上游角落存在一个次环流结构; 当 $a > 2.64\text{‰}$ 时, 次环流结构消失。

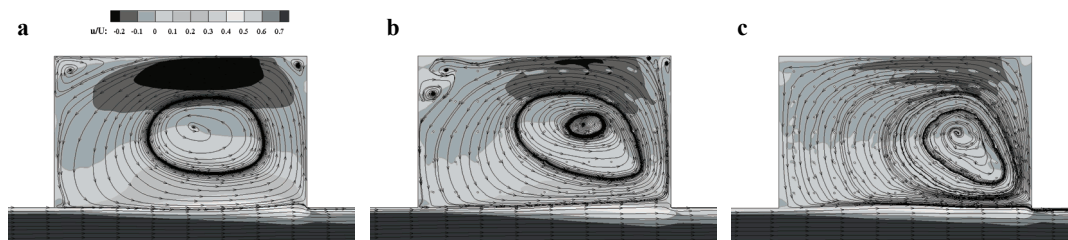


图 3 $z = 0.6H$ 平面时均流线图 (水流从左向右): a 工况 1; b 工况 3; c 工况 5

3.2 紊动能

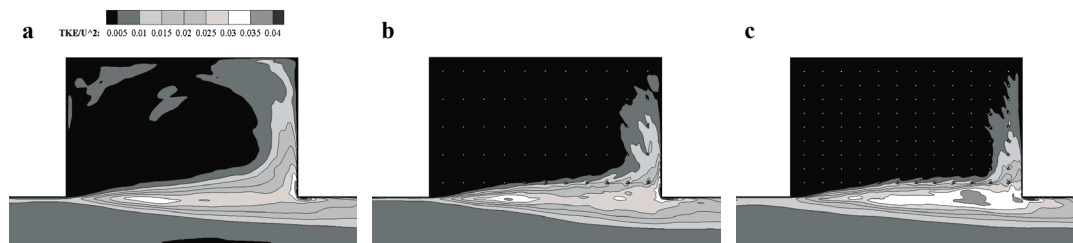


图4 $z = 0.6H$ 平面紊动能分布（水流从左向右）：a 工况 1；b 工况 3；c 工况 5

图4展示了部分工况下 $z = 0.6H$ 平面上的紊动能分布（以 U^2 无量纲化）。所有工况下，高紊动能集中在主渠和滞水区的混合层。这是由交界面处的不稳定强剪切和脱落涡随流发展共同造成的。最大的紊动能出现在交界面后缘，是水流撞击的结果。

当种群密度增加时，滞水区内的紊动强度逐渐降低。一方面是由于植被拖曳力的增加会导致进流（进入滞水区）衰减，因而被进流携带到滞水区的高紊动涡量也会减少；另一方面，高种群密度植被会对水体紊动产生抑制作用^[8]。

3.3 拟序结构

采用 Q 准则，对混合层拟序结构进行了可视化处理，如图5所示。与紊动能分布规律相似，夹带高涡量的拟序结构集中分布在交界面附近。当滞水区内存在植被时，混合层水流会撞击交界面附近的植被，形成圆柱绕流并产生卡门涡街。考虑到植被直径尺寸较小，经植株诱发的脱落涡尺度，相比于混合层拟序结构是较小的。

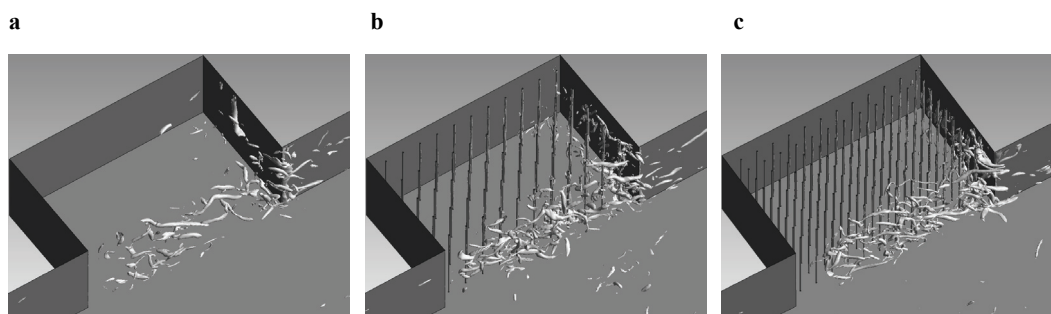


图5 3D 拟序结构（水流从左向右）：a 工况 1；b 工况 3；c 工况 5

3.4 平均滞留时间

平均滞留时间 T_{DWZ} 是滞水区的重要参数，可以等效为替换整个滞水区水体所需要的时间。根据上述定义，将滞水区水体体积除以交界面面积和水流交换速度，可以得到 T_{DWZ} ^[9]：

$$T_{DWZ} = \frac{LWH_{DWZ}}{\bar{E}LH_E} = \frac{1}{K_{DWZ}} \quad (1)$$

式中， H_{DWZ} 和 H_E 分别表示滞水区和交界面水深，本研究中等于是水深 H 。 \bar{E} 表示交界面的平

均交换速度，通过对多组瞬时交换速度求平均值得到。 K_{DWZ} 表示质量交换系数。

依据 Weitbrecht and Jirka^[10]提出的公式，瞬时交换速度 E 等于：

$$E = \frac{1}{2A_{int}} \int_{A_{int}} |v| \quad (2)$$

式中， A_{int} 表示交界面的面积， v 表示交界面微小单元的瞬时横向速度，用微元网格中心点的横向速度近似替代。

图 6 展示了随着种群密度 a 增加，平均滞留时间 T_{DWZ} 的变化规律。当 a 增加时， T_{DWZ} 先降低后升高，在 $a = 3.96 \times 10^{-3}$ 降到最小值。本研究认为是 3 种因素共同作用导致了上述结果。①混合层的大尺度拟序结构：它控制着主渠和滞水区的质量交换，与滞留时间呈负相关，也就是拟序结构越强，滞留时间越小；②植株诱发的卡门涡街：它可以促进水体交换^[11]，与滞留时间呈负相关；③搞种群密度植被的阻滞：它会抑制水体交换，与滞留时间呈正相关，也就是阻滞效应越强，滞留时间越大。

图 5 表明了所有工况下大尺度拟序结构基本是一致的，因而控制性因素不参与下述讨论。当 a 从 0 增加到 3.96×10^{-3} ，植株诱发的卡门涡街的不规则震荡越来越强烈，加速了主渠和滞水区的水体交换。这种促进作用大于植被的阻滞作用，因而滞留时间 T_{DWZ} 逐渐降低。当 $a > 3.96 \times 10^{-3}$ ，随着种群密度增加，植被群落的拖曳力加强，同时植被间距缩减会阻碍主渠和滞水区之间的动量交换，植被对水体交换的抑制作用大于促进作用，因而滞留时间 T_{DWZ} 逐渐增大。

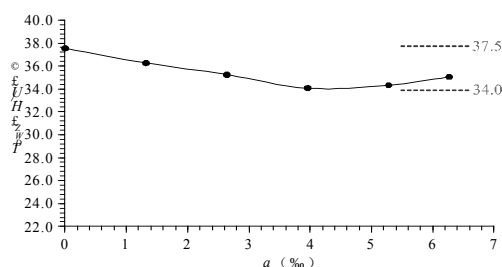


图 6 滞留时间 T_{DWZ} 随种群密度 a 的变化

4 结论

本文采用 LES 方法研究了植被种群密度变化对河湾滞水区紊流结构的影响，用模型试验成果验证了数学模型的可靠性。研究成果丰富了对植被化滞水区的认识，表明了植被可以有效地衰减滞水区环流速度和紊动能，从而促进泥沙和有机物的沉降，这有利于滞水区水生生物的生长。同时，植被种群密度变化可以调节滞水区水体滞留时间，该认识可以帮

助河道治理者通过调整种群密度提高植被化滞水区对主渠水体的净化效率。

参 考 文 献

- 1 Huaixiang L, Yongjun L. Experiment of hydraulic structure s effect on pollutant transport and dispersion[C]//2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013). Atlantis Press, 2013.
- 2 Sukhodolov A N, Sukhodolova T A, Krick J. Effects of vegetation on turbulent flow structure in groyne fields[J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, 55(1): 1-15.
- 3 Lu J, Dai H C. Large eddy simulation of flow and mass exchange in an embayment with or without vegetation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(17-18): 7751-7767.
- 4 Alfrink B J, Van Rijn L C. Two-equation turbulence model for flow in trenches[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(7): 941-958.
- 5 Brevis W, Garcia-Villalba M, Niño Y. Experimental and large eddy simulation study of the flow developed by a sequence of lateral obstacles[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2014, 14(4): 873-893.
- 6 Sanjou M, Akimoto T, Okamoto T. Three-dimensional turbulence structure of rectangular side-cavity zone in open-channel streams[J]. International journal of river basin management, 2012, 10(4): 293-305.
- 7 Constantinescu G, Sukhodolov A, McCoy A. Mass exchange in a shallow channel flow with a series of groynes: LES study and comparison with laboratory and field experiments[J]. Environmental fluid mechanics, 2009, 9(6): 587.
- 8 Nepf H M. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(3): 262-279.
- 9 Weitbrecht V. Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers[M]. Universität Karlsruhe, Institut für Hydromechanik, 2004.
- 10 Weitbrecht V, Jirka G H. Flow patterns in dead zones of rivers and their effect on exchange processes[C]//Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics. 2001.
- 11 Sanjou M, Nezu I. Large eddy simulation of compound open-channel flows with emergent vegetation near the floodplain edge[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1): 565-569.

Study on turbulent flow field and mean retention time in a dead-water zone with or without vegetation

XIANG Ke, YANG Zhong-hua, LIU Jian-hua, FANG Hao-ze

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072. Email: yzh@whu.edu.cn)

Abstract: Both the groin fields formed by the artificial consecutive groynes and the embayment formed by the natural indentation of the river banks, have a mixing layer with the river mainstream,

and there generally existing a circulation structure with a low level of velocity in the lateral cavity (called dead-water zone). Dead-water zones in the open channel can provide favorable growing conditions for aquatic organisms, and is an important area for biological growth. Although flow hydrodynamics in the lateral cavity have been well studied, the impact of vegetation on recirculating flow is rarely considered. This study adopts large eddy simulation (LES) to examine the turbulent flow structure in a rectangular embayment zone with different population densities of vegetation, and the numerical model is validated by the the physical experiment. Vegetation rearranges the circulation structure in the DWZ and weakens the velocity and turbulent kinetic energy. This negative effect increases with increasing population density. With the development of the shedding vortex induced in the front edge of the channel-embayment interface, the large-scale coherent structure forms in the mixing layer and is hardly affected by the variation of population density. As the vegetation density increases, the mean retention time first decreases and then increases as a result of the combined action of three factors, namely, the large-scale coherent structure, the plant-induced Karman vortex street, and the blocking effect of dense vegetation.

Key words: Open channel; Dead-water zone; Vegetation; Large eddy simulation; Turbulent flow.